فصلنامه مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار
دوره چهارده، شماره پنجاه و پنج، تابستان ۱۴۰۲
نوع مقاله : علمی پژوهشی
صفحات : ۲۳۰-۲۰۷

توسعه مدل زمان بندی پروژه های نفتی و تعدیل هزینه های سبد پروژه با موازنه اهداف هزینه، زمان، کیفیت و اثرات زیست محیطی و حل آن با الگوریتم های متاهیستوریک

تاریخ دریافت مقاله : ۱۴۰۰/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۰۶/۱۴ صادق فیض اللهی[۱]

چکیده

امروزه در پروژه‌هایی نفتی بهره‌گیری از روش های نوین مدیریت و زمان‌بندی پروژه امری اجتناب ناپذیر است. از طرفی، در مساله زمان‌بندی کلاسیک تمرکز بر روی موازنه زمان و هزینه انجام پروژه‌ها است که در چنین شرایطی یکی از راه‌حل‌های ممکن برای کوتاه کردن زمان اجرای پروژه، تسریع در انجام فعالیت‌ها است که این تسریع علاوه بر تحمیل هزینه بیشتر، می‌تواند بر کیفیت انجام و اثرات زیست محیطی نیز تاثیر بگذارد. از این‌رو در این مطالعه، اثرات زشیست محیطی و شکیفیت انجام فعالیت‌ها نیز به عنوان شاخص‌های جدید در مساله موازنه‌ی هزینه-زمان پروژه در نظر گرفته شد و مدل ریاضی جدیدی با چهار شاخص؛ هزینه، زمان، کیفیت انجام و اثرات زیست محیطی ارائه شده‌است. بر خلاف مدل‌های سنتی که در آنها تنها یک حالت اجرا برای انجام فعالیت‌ها و یک نوع رابطه پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها مد نظر قرار می‌گرفت، حالت‌های اجرای فعالیت‌ها بصورت چند حالته و روابط وابستگی بین فعالیت‌ها از نوع روابط پیش‌نیازی تعمیم یافته است و لحاظ کردن این نوع روابط، مساله را به دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند. به دلیل NP-hard بودن مساله در ابعاد بزرگ از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل مدل استفاده شد.

کلمات کلیدی

اثرات زیست محیطی، کیفیت پروژه، پیش‌نیازی تعمیم یافته، الگوریتم زنبورعسل، الگوریتم ژنتیک نامغلوب.

۱-گروه مدیریت، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران. (نویسنده مسئول)Sadegh_ Feizollahi@yahoo.com

مقدمه

امروزه در پروژه‌های نفتی و طرح‌های بزرگ زیربنایی مانند ساخت پالایشگاه‌های نفت گاز و پتروشیمی، بهره‌گیری از روش های نوین مدیریت پروژه امری اجتناب ناپذیر است و اهمیت مدیریت چنین پروژه‌هایی به دلایل گستردگی، پیچیدگی و تنوع پروژه‌های مطرح در صنایع مذکور بیش از گذشته شده‌است. اما این‌که مدیران پروژه تا چه اندازه از روش‌های نوین برای مدیریت پروژه ها استفاده می‌کنند، قابل تامل است. به نظر می‌رسد مهم‌ترین دلایل تاخیر در اجرای طرح های بزرگ نفتی جدا از ماهیت پروژه، نداشتن برنامه ریزی و طرح‌ریزی در پروژه‌ها و استفاده نکردن از دانش پروژه است(جعفری اسکندری و همکاران، ۱۳۹۴). در مساله کلاسیک زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع، هدف کمینه کردن طول پروژه با در نظر گرفتن محدودیت منابع و اولویت‌بندی انجام فعالیت‌ها است(ریپون و همکاران ، ۲۰۱۶). در مساله زمان‌بندی کلاسیک تمرکز بر روی موازنه زمان و هزینه انجام پروژه ها است که در چنین شرایطی یکی از راه حل‌های ممکن برای کوتاه کردن زمان اجرای پروژه، تسریع در انجام فعالیت‌ها است که این تسریع علاوه بر تحمیل هزینه بیشتر، می‌تواند بر کیفیت انجام و اثرات زیست محیطی پروژه نیز تاثیر بگذارد.

از طرفی، در مدل‌های کلاسیک تنها یک حالت اجرا برای انجام فعالیت‌ها و یک نوع رابطه پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها اعمال می شد، به‌عبارتی دیگر، برای شیوه‌های اجرای هر فعالیت تنها یک شیوه و برای روابط پیش‌نیازی تنها یک نوع رابطه پیش‌نیازی بین فعالیت‌های سری مدنظر قرار می‌دهند. تمامی فعالیت‌هایی که به یک رویداد می‌رسند باید به‌طور کامل اجرا شده باشند تا فعالیت‌های خروجی از آن رویداد قابل شروع شدن باشد به‌عبارتی دیگر، روابط پیش‌نیازی در مدل های کلاسیک فقط از نوع پایان به آغاز است. از این‌رو در این مطالعه، برای نزدیک کردن مساله به دنیای واقعی، اثرات زیست محیطی و کیفیت انجام فعالیت‌ها نیز علاوه بر زمان و هزینه به عنوان شاخص‌های جدید به مساله موازنه‌ی هزینه- زمان پروژه اضافه و مدل ریاضی جدیدی با چهار شاخص؛ هزینه، زمان،کیفیت انجام و اثرات زیست محیطی ارائه گردید و حالت‌های اجرای فعالیت‌ها به‌جای تک حالته بودن به‌صورت چند حالته و روابط وابستگی بین فعالیت‌ها از نوع روابط پیش‌نیازی تعمیم یافته در نظر گرفته شد و علاوه بر رابطه پایان به آغاز، سه نوع ارتباط زمانی دیگر(آغاز به آغاز،آغاز- پایان و پایان به پایان) نیز بین فعالیت‌ها لحاظ گردید. در ادامه مقاله، بخش دوم به مرور ادبیات تخصیص داده شده و در بخش سوم، فرمول‌بندی مدل مساله ارایه شده‌است. در بخش چهارم، روش‌های ممکن برای حل

مدل و معیارهای ارزیابی و مقایسه‌یی تشریح می‌گردد و در بخش پنجم به نتایج محاسباتی خواهیم پرداخت و نهایتا در بخش ششم جمع بندی و نتیجه گیری ارائه می‌گردد.

مرور ادبیات

در چند سال گذشته مساله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع به دلیل اهمیت علمی آن و چالش‌های محاسباتی بوجود آمده در مدل‌های ارایه شده مورد توجه قرار گرفته‌است، البته بر خلاف تلاش‌های قبلی که بیشتر در راستای اصلاح مدل پایه ارایه شده بود امروز اکثریت تحقیقات در راستای توسعه روش راه‌حل بهتر با اهداف متنوع‌تر می‌باشد(ژیو و همکاران، ۲۰۱۵). همان‌طور که از خلاصه مطالعات در جداول پایین مشخص است در بیشتر مطالعاتی که در سال‌های اخیر انجام شده است،کمینه کردن زمان اتمام پروژه ها را مدنظر قرار داده‌اند و تنها در روش‌های حل نوآوری به وجود آورده‌اند.

جدول۱- مطالعات انجام شده

ردیف	نویسنده (سال)	اهداف	مفروضات مدل	روش حل
۱	محبی (۱۴۰۰)	کمینه سازی هزینه	منابع تجدید پذیر	الگوریتم سنجاقک
۲	مومیوند و همکاران (۱۴۰۰)	حداقل سازی زمان و هزینه	امکان سرمایه گذاری مجدد	الگوریتم ژنتیک
۳	پژوهنده (۱۳۹۹)	حداقل سازی زمان و هزینه	محدودیت منابع	الگوریتم ژنتیک
۴	هودانگ و همکاران (۲۰۲۰)	حداقل کردن زمان پروژه	محدودیت منابع	الگوریتم ممتیک
۵	همایون و همکاران (۲۰۲۰)	کمینه کردن زمان پروژه	محدودیت‌منابع‌وچندحالته‌بودن‌فعالیت ها	الگوریتم تکاملی جستجوی فاخته
۶	بورگرمن و همکاران (۲۰۱۸)	حداکثرسازی عدد وزنی حالت‌های اجرای فعالیت ها	چند حالته بودن اجرای فعالیت‌ها پیش نیازی کلی	روش‌های دقیق
۷	شا تائو و همکاران (۲۰۱۸)	کمینه کردن طول زمان پروژه	متغیرهای سلسله مراتبی	الگوریتم جلبک مصنوعی گسسته
۸	آلبرت موریتیبا و همکاران (۲۰۱۸)	کمینه کردن زمان پروژه	فعالیت‌های چند حالته	الگوریتم مسیریابی
۹	مارتین و همکاران(۲۰۱۷)	کمینه کردن زمان پروژه	منابع انعطاف پذیرند	الگوریتم ژنتیک
۱۰	سوندا و همکاران (۲۰۱۷)	کمینه کردن زمان پروژه	چند حالته محدودیت منابع	الگوریتم تکامل
۱۱	شهریار آستا و همکاران (۲۰۱۶)	کمینه کردن زمان پروژه	چند پروژه- چند حالته	مونت کارلو و الگوریتم ممتیک
۱۲	استفان کرتر و همکاران (۲۰۱۶)	کمینه کردن زمان	منابع تجدید پذیر	جستجوی باینری
۱۳	ریپون و همکاران (۲۰۱۶)	کمینه کردن زمان پروژه	فعالیت‌های غیر قابل انقطاع	مدل‌برنامه‌ریزی‌خطی‌عدد صحیح مختلط
۱۴	بابک و تبریزی (۲۰۱۶)	کمینه کردن هزینه ها بیشینه کردن پایداری برنامه	عدم قطعیت درزمان‌فعالیت ها و هزینه ها	الگوریتم های ژنتیک و تکامل تفاضلی چند هدفه
۱۵	محمد العباسی (۲۰۱۶)	کمینه‌کردن‌زمان و هزینه پروژه	پیش نیازی جزیی فعالیت‌های چند مد	الگوریتم ژنتیک
۱۶	برناردو و آلمیدا (۲۰۱۶)	کمینه کردن زمان پروژه	اختصاص‌برخی‌منابع‌به‌فعالیتی‌خاص‌درطول پروژه	الگوریتم ابتکاری

فرمول بندی مساله

مفروضات مدل

در طراحی مدل ریاضی مساله، باتوجه به ویژگی‌ها و شرایط کاربردی، فرض‌هایی به صورت زیر مدنظر قرار گرفته است:

- داده‌ها قطعی و مشخص هستند.

- فعالیت‌های پروژه دارای ماهیتی چند حالته می باشند، به‌عبارتی دیگر برای انجام هر فعالیت چند روش اجرا وجود دارد.

- فعالیت‌های پروژه غیرقابل انقطاع هستند، به‌عبارتی دیگر پس از شروع هر فعالیت توقف آن مجاز نیست.

- ظرفیت منابع محدود و مشخص است.

- به زمان آماده سازی برای انجام فعالیت‌ها نیازی نیست.

- روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها از نوع روابط پیش‌نیازی کلی است.

۳-۱- پارامترهای مدل

پارامترهای مدل ریاضی ارائه‌شده در این پژوهش به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

عنوان	توضیح پارامتر
i	فعالیت i
M_i	مجموعه حالت‌های اجرا برای فعالیت i
A	مجموعه فعالیت‌ها
L	مجموعه شاخص های کیفیت
ls_i	دیرترین زمان شروع فعالیت i ام
q_{iml}	شاخص کیفیت l در انجام فعالیت i در حالت اجرایی m
w_i	وزن فعالیت i
w_{il}	وزن شاخص کیفیت l برای فعالیت i
σ_i	کران پایین کیفیت فعالیت i
es_i	زودترین زمان شروع فعالیت i ام
C_{im}	هزینه انجام فعالیت i در حالت اجرایی m
E_{SS}	مجموع فعالیت هایی که رابطه پیش نیازی آنها به صورت شروع-شروع است.
E_{SF}	مجموع فعالیت هایی که رابطه پیش نیازی آنها به صورت شروع-پایان است.
E_{FS}	مجموع فعالیت هایی که رابطه پیش نیازی آنها به صورت پایان-شروع است.

E_{FF}	مجموع فعالیت هایی که رابطه پیش نیازی آنها به صورت پایان-پایان است.
SS_{IJ}	زمان تأخیر حالت شروع-شروع فعالیت i و j
SF_{IJ}	زمان تأخیر حالت شروع-پایان فعالیت i و j
FS_{IJ}	زمان تأخیر حالت پایان-شروع فعالیت i و j
FF_{IJ}	زمان تأخیر حالت پایان-پایان فعالیت i و j
d_{im}	زمان انجام فعالیت i در حالت اجرایی m
r^{rr}_{imk}	مقدار مصرف فعالیت i در حالت اجرایی m از منبع تجدیدپذیر نوع kام
$a^{rr}{}_{k}$	سطح دسترسی منبع تجدیدپذیر نوع kام در هر دوره
r^{nr}_{imk}	مقدار مصرف فعالیت i در حالت اجرایی m از منبع تجدیدناپذیر نوع kام
a^{nr}_{k}	سطح دسترسی منبع جدید تجدیدپذیر نوع kام در کل پروژه
P^{EI}_{im}	اثر زیست محیطی فعالیت i ام در حالت اجرایی m ام برای شاخص محیطی EI ام
P^{EI}	آستانه اثر زیست محیطی برای شاخص محیطی EI ام
T	سقف زمان تکمیل پروژه
t_i	بازه زمانی بین es_i تا ls_i
es_i	زودترین زمان شروع ممکن برای فعالیت i ام
ls_i	دیرترین زمان شروع ممکن برای فعالیت i ام تا تأخیری در زمان اتمام نهایی پروژه صورت ندهد
H	مجموعه از جفت فعالیت هایی است که دارای روابط پیش نیازی هستند.

برای فعالیت (i) در پروژه،M_i مجموعه حالت‌های مختلف اجرای فعالیت(i) است که در آن برای هر حالت اجرا مانند (m_i)، یک ترکیب چهارتایی(t,c,q,e) معرفی می‌شود که به ترتیب بیانگر زمان، هزینه،کیفیت و اثرات زیست محیطی یک فعالیت در آن حالت اجراست.

متغیرهای تصمیم

متغیر تصمیم مدل پیشنهادی متغیر تصمیم‌گیری همان X_{imt} است که باینری است. اگر فعالیت i در حالت اجراییm در زمان t آغاز شود مقدار یک و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد. این متغیر به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$x_{im_i t} \in \{0,1\}$$ رابطه (۱)

$$i = 0,1,2 \dots, n+1$$ رابطه (۲)

$$m_i = 1,2, \dots, M_i$$ رابطه (۳)

$$t = es_i, \dots, ls_i$$ رابطه(۴)

به علت اینکه مساله در حالت چند مد است سه شمارنده برای متغیر تصمیم در نظر گرفته شده‌است شمارنده اول که همانi است معرف شمارنده فعالیت مربوطه است و شمارنده m نیز حالت

اجرایی فعالیت i می‌باشد و در نهایت شمارنده t مربوط به زمان شروع فعالیت i است که این زمان بین زودترین و دیرترین زمان شروع فعالیت i است.

$$\begin{cases} X_{im_i t} = 1 & \text{شروع شودt ام در زمان i هر گاه فعالیت} \\ X_{im_i t} = 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

رابطه(۵)

مدل پیشنهادی

هدف اول؛مینیمم کردن هزینه‌های اتمام پروژه

نخستین هدفی که هم در مسائل زمان‌بندی پروژه و هم در چارچوب توسعه پایدار به آن توجه شده، هزینه‌های اتمام پروژه است. اجرای هر فعالیت و هر حالت اجرای آن نیازمند صرف هزینه‌ای است که با توجه به حالت انتخاب شده برای اجرای هر فعالیت، مجموع هزینه‌های فعالیت‌های انتخاب شده برابر با هزینه اتمام پروژه خواهد شد. در این تابع هدف مطابق رابطه زیر، از سایر هزینه‌های پروژه مانند منابع چشم پوشی شده است.

$$\boldsymbol{Min\ Z_1 = \sum_{i \in A} \sum_{m \in M_1} \sum_{t=es_i}^{ls_i} c_{im_i} \times X_{im_i t}}$$

رابطه (۶)

هدف دوم؛ مینیم کردن زمان اتمام پروژه

از مهم‌ترین اهدافی که در کلیه مسائل زمان‌بندی پروژه مورد توجه قرار می‌گیرد، زمان اتمام پروژه است. از آن‌جا که مدل ریاضی با توجه به شبکه فعالیت های پروژه نوشته می‌شود، در صورتی که زمان اتمام و یا شروع آخرین فعالیت پروژه(معمولاً فعالیتی مجازی است)کمینه شود، زمان کلی پروژه نیز کمینه خواهد شد؛ بنابراین تابع هدف دوم مطابق با رابطه زیر، مدل ریاضی پژوهش به کمینه سازی زمان اتمام پروژه می پردازد.

$$\boldsymbol{Min\ Z_2 = \sum_{t=es_{n+1}}^{ls_{n+1}} t.x_{(n+1)1t}}$$

رابطه(۷)

هدف سوم؛ماکزیمم کردن کیفیت کل پروژه

تابع هدف سوم کیفیت کل پروژه را با توجه به شاخص‌های کیفیت، وزن این شاخص‌ها و همچنین میزان اهمیت هر فعالیت ماکزیمم می‌کند.

$$Max\ Z_3 = \left(\sum_{i=1}^{n} w_i \sum_{l=1}^{L} \sum_{m=1}^{M_i} w_{il} q_{im_i l} X_{im_i t} \right)$$ رابطه(۸)

هدف چهارم؛مینیمم کردن اثرات زیست محیطی پروژه

تابع هدف چهارم، وجه تمایز مدل ارائه شده با مدل‌های موازنه؛ زمان-هزینه-کیفیت، موجود در این زمینه است. در این تابع کمینه سازی اثرات زیست محیطی درگیر با پروژه مدنظر است. از آن‌جا که هر پروژه با توجه به ماهیت و محیط اجرای آن، می‌تواند تبعات زیست محیطی متعددی را بر جای بگذارد، در حالت کلی می‌توان این تبعات را به سه دسته اثرات زیست محیطی پروژه بر هوا، اثرات زیست محیطی پروژه بر خاک، اثرات زیست محیطی پروژه بر آب تقسیم کرد (تقی زاده یزدی و همکاران، ۱۳۹۵).

به منظور حفظ کلیت مدل ارائه شده، هر سه دسته این اثرات در نظر گرفته می‌شود و تابع هدف نهایی از مجموع میزان اثرات هردسته به دست‌می‌آید؛ بنابراین تابع هدف چهارم این‌مساله به‌صورت زیر خواهد بود:

$$MinZ_4 = \frac{\sum_{i-1}^{I} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{im}^{EI(1)} . x_{imt}}{p^{EI(1)}} + \frac{\sum_{i-1}^{I} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{im}^{EI(2)} . x_{imt}}{p^{EI(2)}} + \frac{\sum_{i=1}^{I} \sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{im}^{EI(3)} . x_{imt}}{p^{EI(3)}}$$ رابطه (۹)

محدودیت‌های مدل:

- انتخاب یک حالت اجرا برای هر فعالیت

نخستین محدودیت مدل ریاضی ارائه شده، انتخاب تنها یک حالت اجرا برای هر فعالیت را در برنامه زمان‌بندی نهایی،تضمین می‌کند. از آن‌جا که در این پژوهش، فرض بر آن است که هر فعالیت پروژه می‌تواند در چندین حالت، اجرا شود، این محدودیت الزام انتخاب تنها یکی از حالت‌های اجرای فعالیت را تضمین می‌کند تا مدل در مرحله حل دچار اختلال نگردد.

$$\sum_{m_i=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} X_{im_i t} = 1 \qquad i = 1, \dots, n+1$$ رابطه(۱۰)

- محدودیت های روابط پیش نیازی کلی

محدودیت بعدی این مدل ریاضی با توجه به ماهیت روابط پیش‌نیازی چهارگانه (شروع- شروع، شروع- پایان، پایان- شروع و پایان- پایان) موجود بین فعالیت‌های پروژه است. اما از آن‌جا که فعالیت i ام تا

قبل از اتمام کلیه فعالیت‌های پیش‌نیاز آن که با توجه به مجموعه H مشخص می‌شود، قابل اجرا نیست؛ از این رو این محدودیت‌ها، اجازه شروع فعالیت را قبل از اتمام کلیه فعالیت‌های پیش‌نیاز آن نمی‌دهد.

$$\sum_{m_i+1}^{M_i}\sum_{t=es_i}^{ls_i}(t+ss_{ij})X_{im_it} \le \sum_{m_j=1}^{M_j}\sum_{t=es_j}^{ls_j} t.x_{jm_jt} \quad \forall(i,j)\in E_{ss} \qquad \text{رابطه(۱۱)}$$

$$\sum_{m_i+1}^{M_i}\sum_{t=es_i}^{ls_i}(t+SF_{ij})X_{im_it} \le \sum_{m_j=1}^{M_j}\sum_{t=es_j}^{ls_j}(t.d_{jm_j})x_{jm_jt} \quad \forall(i,j)\in E_{sf} \qquad \text{رابطه(۱۲)}$$

$$\sum_{m_i+1}^{M_i}\sum_{t=es_i}^{ls_i}(t+d_{im_i}+FS_{ij})X_{im_it} \le \sum_{m_j=1}^{M_j}\sum_{t=es_j}^{ls_j} t.x_{jm_jt} \quad \forall(i,j)\in E_{fs} \qquad \text{رابطه(۱۳)}$$

$$\sum_{m_i+1}^{M_i}\sum_{t=es_i}^{ls_i}(t+d_{im_i}+FF_{ij})X_{im_it} \le \sum_{m_j=1}^{M_j}\sum_{t=es_j}^{ls_j}(t+d_{jm_j})x_{jm_jt} \forall(i,j)\in E_{ff} \qquad \text{رابطه(۱۴)}$$

- محدودیت‌های مربوط به منابع تجدیدپذیر

این محدودیت، محدودیت منابع تجدیدپذیر است که در مسئله زمان‌بندی پروژه پایه نیز این محدودیت به چشم می‌خورد. تمامی منابع که میزان حداکثر استفاده آن در هر دوره قابل بکارگیری است در این محدودیت گنجانده شده‌اند. محدودیت‌های تجدیدپذیر مانند نیروی انسانی و تجهیزات و... همگی در این محدودیت گنجانده می‌گردد.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{m_i=1}^{M_i} r^{rr}{}_{im_ik} \sum_{s=Max\{t-d_{im},es_i\}}^{Min\{t-1,ls_i\}} x_{im_is} \le a^{rr}{}_{k}\, k=1,\dots,K, t= \qquad \text{رابطه(۱۵)}$$

- محدودیت های مربوط به منابع تجدیدناپذیر

این محدودیت، محدودیت منابع تجدید ناپذیر است که این منابع مقادیر کل آن‌ها در ابتدای پروژه مشخص است و با مصرف آن‌ها این میزان رفته رفته کاهش می‌یابد. منابعی از قبیل بودجه پروژه، انواع ملزومات و مواد مصرفی و... از این‌گونه مواد می‌باشند. از آن‌جا که هزینه انجام فعالیت‌ها هم از طریق تابع هدف هزینه مینیمم می‌گردد و بودجه پروژه را نیز می‌توان یک نوع منبع تجدید ناپذیر در نظر گرفت. لذا از آوردن محدودیت جدیدی برای جلوگیری از صرف هزینه اضافی صرف‌نظر شده است و محدودیت بودجه پروژه در این محدودیت گنجانده شده است.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{m_i=1}^{M_i} r_{imk}^{nr}\sum_{s=es_i}^{ls_i} x_{ims} \le a_k^{nr} \quad , \qquad k=1,2,\dots,K$$ رابطه(۱۶)

- محدودیت‌های مربوط به کیفیت

این محدودیت اطمینان می‌دهد که کیفیت انجام هر فعالیت از سطح از پیش تعیین شده‌ای که مدنظر می باشد،کمتر نمی‌باشد.

$$\sum_{m=1}^{M} q_{im}\sum_{t=es_i}^{ls_i} x_{imt} \ge \sigma_i$$ رابطه (۱۷)

- محدودیت‌های مربوط به سقف زمان تکمیل پروژه

این محدودیت اطمینان می‌دهد که زمان تکمیل پروژه از زمان مورد نظر(T)تجاوز نمی‌کند.

$$\sum_{m=1}^{M_i}\sum_{t=es_I}^{ls_I} t.x_{im_it} \le T$$ رابطه(۱۸)

- محدودیت‌های مربوط به متغیرهای تصمیم

این محدودیت هم همان باینری بدون متغیر تصمیمX_{imt} را نشان می‌دهد.

$$X_{imt} \in \{0,1\}$$ رابطه(۱)

$$m_i = 1,2,\dots,M$$ رابطه(۲)

$$i = 0,1,2,\dots,n+1$$ رابطه(۳)

$$t = 1,2,\dots,T$$ رابطه(۴)

$$l = 1,2,\dots,L$$ رابطه(۱۹)

مدل پایه RCPSP

فرض می‌کنیم که یک پروژه با یک شبکه AON (فعالیت بر روی گره ها) به صورت $G(V,E)$ تعریف شود که در آن V مجموعه گره ها که نماینده فعالیت‌ها می‌باشد و E مجموعه کمان‌ها که روابط پیش‌نیازی را به صورت FS با lag به میزان صفر مشخص می‌کنند. فعالیت ها از ۱ تا n شماره گذاری می‌شوند. فعالیت های فرضی ۱ و n فعالیت های شروع و پایان پروژه با مدت زمان صفر خواهند بود. فعالیت‌ها بایستی غیر قابل انقطاع باشند. میزان طول فعالیت با $(l < i < n)d_i$ و زمان شروع آن با S_i و زمان پایان آن با f_i مشخص می‌گردد. به تعداد K نوع منبع تجدیدپذیر مفروض می‌باشد به‌طوری که $(l \le i \le n, l \le k \le K)r_{ik}$ میزان ثابت نیازمندی‌های فعالیت i از منبع K می باشد و a_k میزان ثابت در دسترس از منبع نوع K می باشد. مساله RCPSP به صورت زیر مدل می‌شود.

1) $\text{Min } f_n$

Subject to

2) $f_1 = 0,$

3) $f_j \quad d_j \geq f_i, \forall (i,j) \in H,$

4) $\sum i \in s_t \, r_{ik} \leq a_{k,} t = 1,2 \ldots, f_n; k = 1,2 \ldots, K,$

H مجموعه ای از جفت فعالیت‌هایی است که دارای روابط پیش‌نیازی هستند و S_t مجموعه ای از فعالیت‌ها است که در بازه زمانی $[t\text{-}1,\ t]$ قرار دارند به طوری که $S_i = \{i | f_i - d_i < t \leq f_i\}$

مقایسه مدل ارائه شده با مدل کلاسیک

در مدل کلاسیک مدل به شکل تک هدفه تعریف شده و عامل اثرات زیست محیطی به‌صورت صریح در تعریف مساله بیان‌نشده است. اما در مدل پیشنهادی این مطالعه تعریف مساله موازنه چند هدفه؛ موازنه چهار هدف (زمان، هزینه، کیفیت و اثرات زیست محیطی) بصورت یکجا ارائه گردیده‌است. در مدل کلاسیک روابط میان فعالیت‌های پروژه به صورت روابط پیش‌نیازی جزئی در نظر گرفته شده‌است در حالی که این روابط همیشه به‌سادگی رابطه پیش‌نیازی پایان- شروع با تأخیر زمانی صفر نبوده و سایر روابط پیش‌نیازی هم‌چون روابط شروع- شروع، پایان- پایان و شروع- پایان با میزان مشخصی از تأخیر نیز در دنیای واقعی مدیریت پروژه وجود دارند. لذا در مدل ارائه شده روابط مذکور لحاظ گردید.

روش‌های حل و معیارهای ارزیابی

روش‌های حل مسائل چندهدفه به روش‌های کلاسیک و تکاملی تقسیم می‌شوند، دست‌یابی به تنها یک جواب بهینه در هر مرحله و نیافتن تمامی جواب‌های بهینه‌یابی چند هدفه از نقاط ضعف روش‌های کلاسیک می باشد. برای غلبه بر این موضوع، محققین از روش‌های تکاملی که قابلیت یافتن چندین راه حل بهینه در یک اجرا را دارند، استفاده می‌کنند. الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب(NSGA-II) به دلیل پیچیدگی محاسباتی کم‌تر و استفاده از عملگر فاصله ای ازدحام در حل مسائل چندهدفه از کارایی بالایی برخوردار است(عیدی و همکاران ، ۱۳۹۵) در ادامه به تشریح روش‌های حل بکار رفته در این مطالعه پرداخته می‌شود.

روش محدودیت اپسیلون

از آنجایی که مدل مسأله حاضر، چهار هدفه است، برای حل آن از روش محدودیت اپسیلون توسعه یافته که جز روشهای کلاسیک حل مسائل چندهدفه است، استفاده شده است. روش محدودیت اپسیلون، اولین بار در سال ۱۹۷۱ توسط هایمس و همکاران ارائه شده است. رویکرد این روش به گونه ای است که مسأله چند

هدفه را تبدیل به مسأله تک‌هدفه می‌کند؛ به این صورت که یکی از توابع هدف موجود $(fq(x),q=\{1,2,\ldots,Q\})$ انتخاب و حداقل سازی شده و سایر توابع هدف به محدودیت‌هایی با حد بالا تبدیل می شوند. روش اپسیلون محدودیت، مجموعه ای از راه حل‌های تعادلی را تحویل تصمیم گیرنده می‌دهد و سپس تصمیم گیرنده می تواند با توجه به شرایط، یک یا چند تا از این جواب‌ها را انتخاب نماید.

الگوریتم زنبور عسل

الگوریتم زنبور مبتنی بر الگوریتم جستجو است که اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسعه یافت. این الگوریتم شبیه سازی رفتار جستجوی غذای گروهای زنبور عسل است. پروسه جستجوی غذای یک کلونی به وسیله زنبورهای دیده بان آغاز می‌شود که برای جستجوی گلزارهای امید بخش(دارای امید بالا برای وجود نکتار یا گرده) فرستاده می‌شوند. زنبورهای دیده بان بصورت تصادفی از گلزاری به گلزار دیگر حرکت می‌کنند. در طول فصل برداشت محصول(گل دهی)،کلونی با آماده نگه داشتن تعدادی از جمعیت کلونی به عنوان زنبور پیش‌تاز(دیده بان)به جستجوی خود ادامه می‌دهند. هنگامی که جستجوی تمام گلزارها پایان یافت، هر زنبور دیده بان، بالای گلزاری که اندوخته‌ی کیفی مطمئنی از نکتار و گرده دارد، رقص خاصی را اجرا می کند. این رقص که به به نام رقص چرخشی شناخته می‌شود، اطلاعات مربوط به جهت تکه گلزار(نسبت به کندو)، فاصله تا گلزار وکیفیت گلزار را به زنبورهای دیگر انقال می‌دهد. این اطلاعات زنبورهای اضافی و پیرو را به سوی گلزار می‌فرستد. بیشتر زنبورهای پیرو به سوی گلزارهایی می‌روند که امید بخش‌تر هستند و امید بیشتری برای یافتن نکتار و گرده در آن‌ها، وجود دارد. وقتی همه زنبورها به سمت ناحیه ای مشابه بروند، بصورت کتره‌ای و بعلت محدوده‌ی رقص‌شان در پیرامون گلزار پراکند می‌شوند تا به موجب این کار سرانجام نه یک گلزار، بلکه بهترین گل‌های موجود درون آن تعیین موقعیت شوند. الگوریتم زنبور هر نقطه را در فضای پارامتری(متشکل از پاسخ‌های ممکن) به‌عنوان منبع غذا تحت بررسی قرار می‌دهد. زنبورهای دیده‌بان،کارگزاران شبیه سازی شده بصورت کتره‌ای فضای پاسخ‌ها را ساده می‌کنند و به وسیله‌ی تابع شایستگی کیفیت موقعیت‌های بازدید شده را گزارش می‌دهند(فام و اشرف افیفی ، ۲۰۰۷).

الگوریتم ژنتیک نامغلوب

الگوریتم ژنتیک در واقع شناخته شده ترین نوع از الگوریتم‌های تکاملی است که طی سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ توسط جان هلند و همکارانش ابداع و گسترش یافت. ایده محاسبات تکاملی در دهه ۱۹۶۰ توسط رچنبرگ در کتابی با عنوان استراتژی‌های تکامل معرفی شد. تحقیقات بر روی الگوریتم ژنتیک دقیقا پس از تحقیقات روی شبکه ها ی عصبی مصنوعی آغاز شد که در هر دو شاخه از سیستم‌های بیولوژیکی به عنوان مدل انگیزشی و محاسباتی الهام گرفته شده است. این الگوریتم دارای روند تکراری بوده و در هر تکرار با یک راه حل یا چندین

راه‌حل مختلف کار می‌کند الگوریتم ژنتیک جستجو را با جمعیتی از راه حل‌های اولیه تصادفی آغاز می کند. اگر معیارهای نهایی ارضا نشود، سه عملگر متفاوت تکثیر، جهش و ادغام به کار گرفته می شوند تا جمعیت به روز شود. هر تکرار از این سه عملگر به عنوان یک نسل شناخته می شود. از آن‌جا که نمایش راه حل‌ها در الگوریتم ژنتیک بسیار شبیه کروموزوم های طبیعی است و همچنین عملگرهای الگوریتم ژنتیک شبیه به عملگرهای ژنتیکی عمل می‌کنند، روند فوق را به نام الگوریتم ژنتیک نام‌گذاری کرده اند. در واقع، الگوریتم ژنتیک فضای حل را با تکرار سه گام ساده جستجو می‌کند.گام اول، گروهی از نقاط جستجو را که جمعیت نامیده می‌شود، بر اساس تابع هدف ارزیابی می‌کند. در گام دوم، بر اساس وضعیت ارزیابی شده، برخی از نقاط به عنوا ن کاندیداهای حل مساله انتخاب می شوند. در گام سوم نیز عملگرهای ژنتیک روی این کاندیداها اعمال می‌شوند تا جمعیت نسل بعدی ساخته شوند. این فرآیند تا زمانی که معیارهای نهایی به دست آید، تکرار می شود. معیار نهایی زمانی است که نتیجه ای در حد قابل قبول به دست آید یا تعداد حداکثر نسل تکرار شود(هوپت ، ۲۰۰۶).

نتایج محاسباتی برای مثال های ابعاد کوچک

در جداول (۲) و (۳) نتایج حاصل شده از الگوریتم های فراابتکاری پیشنهادی و روش دقیق محدودیت اپسیلون در ۵ مثال عددی مختلف در اندازه‌های کوچک آورده شده‌است. نتایج نوشته شده برای الگوریتم‌ها، بهترین مقدار از ۵ بار اجرای آن است.اعداد نوشته شده در قسمت زمان حل، زمان‌های اجرای هر یک از این روش‌های حل را بر حسب ثانیه نشان می‌دهند. زمان حل نرم افزار GAMS بر روی ۱۸۰۰ ثانیه تنظیم شده است و اگر تا آن زمان جواب بهینه ای حاصل نشد، همان مقدار به دست آمده در ۱۸۰۰ ثانیه، به‌عنوان جواب این روش ثبت می‌شود. پس از مقایسه جواب‌های الگوریتم‌های MOBEE و NSGA-II با روش محدودیت اپسیلون مشاهده می‌شود که زمان‌های حل الگوریتم‌های فراابتکاری در ۵ مثال حل شده کمتر از روش محدودیت اپسیلون است که البته الگوریتم NSGA-II با میانگین زمان اجرای (۷۰۲/۳) ثانیه به نسبت الگوریتم MOBEE با میانگین زمان اجرای(۷۱۱) ثانیه وضعیت مطلوب‌تری دارد. بنابراین می‌توان گفت که الگوریتم NSGA-II در حل مسائل کوچک تولید شده به نسبت الگوریتم MOBEE از منظر شاخص زمان اجرا در وضعیت عملکردی بهتری قرار دارد. ضمن اینکه با بررسی زمان‌های حل می‌توان به تاثیر افزایش فعالیت‌های پروژه در زمان حل پی‌برد.

جدول۲- مقایسه نتایج روش حل محدودیت اپسیلون و الگوریتم MOBEE

مساله	تعداد فعالیت	روش محدودیت اپسیلون					الگوریتم MOBEE				
		هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف چهارم	زمان حل	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف چهارم	زمان حل
۱	۷	۲۰۶۶۹۸	۱۴	۱۱/۰۶	۸/۲۲۰	۲۴۰	۲۱۱۹۶۶/۱	۱۲/۷۱	۱۱/۲۱	۷/۸	۹۲/۶۶
۲	۱۰	۳۶۲۵۱۴	۱۵	۱۴/۴۳۰	۹/۷۱	۶۰۰	۳۴۰۹۳۰/۵	۱۴/۹۱	۱۲/۶۳	۸/۱۹	۲۵/۴۶۱
۳	۱۳	۵۱۲۶۸۳	۱۰۵	۲۰/۸۴	۱۱/۰۵	۹۶۰	۴۹۳۸۹۰/۱	۹۲/۰۵	۲۰/۹	۱۴/۷۵	۷۹۴/۱۹
۴	۱۵	۴۸۴۴۵۵	۸۷	۲۵/۷۵	۱۱/۹۷	۱۲۰۰	۴۷۱۲۳۰/۵	۹۵/۶۳	۲۷/۵۳	۱۱/۴۵	۹۷۰/۷
۵	۲۰	۵۵۶۲۱۰	۱۴۳	۳۵/۸۴	۱۳/۱۴	۱۸۰۰	۵۴۷۰۴۱/۸	۱۳۵/۳۶	۳۷/۱۵	۱۲/۲۱	۱۲۳۶۰/۰۷
میانگین		۴۲۴۵۱۲	۷۲/۸	۲۱/۵۸	۱۰/۸۱	۹۶۰	۴۱۳۰۱۱/۸	۷۰/۱۳	۲۱/۸۸	۱۰/۹	۷۱۱

جدول۳- مقایسه نتایج روش حل محدودیت اپسیلون و الگوریتم NSGA-II

مساله	تعداد فعالیت	روش محدودیت اپسیلون					الگوریتم NSGA-II				
		هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف چهارم	زمان حل	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف چهارم	زمان حل
۱	۷	۲۰۶۶۹۸	۱۴	۱۱/۰۶	۸/۲۲۰	۲۴۰	۲۱۳۶۹۲/۶	۱۲/۶۱	۱۰/۵۳	۷/۷۵	۹۱/۳
۲	۱۰	۳۶۲۵۱۴	۱۵	۱۴/۴۳۰	۹/۷۱	۶۰۰	۳۳۸۰۲۸/۹	۱۵/۰۴	۱۳/۲۷	۸/۲۶	۴۷۲/۵
۳	۱۳	۵۱۲۶۸۳	۱۰۵	۲۰/۸۴	۱۱/۰۵	۹۶۰	۵۰۹۱۲۷/۱	۸۹/۳	۱۸/۳۱	۱۴/۲۲	۷۵۵/۰۴
۴	۱۵	۴۸۴۴۵۵	۸۷	۲۵/۷۵	۱۱/۹۷	۱۲۰۰	۴۶۸۳۲۱/۶	۹۶/۲	۲۶/۲۷	۱۱/۵۲	۹۵۴/۲۷
۵	۲۰	۵۵۶۲۱۰	۱۴۳	۳۵/۸۴	۱۳/۱۴	۱۸۰۰	۵۵۷۱۱۷/۳	۱۳۲/۹	۳۸/۳	۱۱/۹۹	۱۲۳۸/۴۸
میانگین		۴۲۴۵۱۲	۷۲/۸	۲۱/۵۸	۱۰/۸۱	۹۶۰	۴۱۷۲۵۷/۵	۶۹/۲۱	۲۱/۳۴	۱۰/۷۷	۷۰۲/۳

نتایج محاسباتی برای مثال های ابعاد بزرگ

در مسائلی با ابعاد بزرگتر از ۲۰ فعالیت که روش محدودیت اپسیلون قادر به حل آنها در زمان بیشتر از ۱۸۰۰ ثانیه نبود از الگوریتم‌های فرا ابتکاری بهره گرفته شد که در ادامه نتایج محاسباتی این مسائل ذکرگردیده و نتایج دوالگوریتم بکارگرفته‌شده با شاخص‌های ارزیابی‌موردمقایسه قرارگرفته‌است.

تنظیم پارامترها

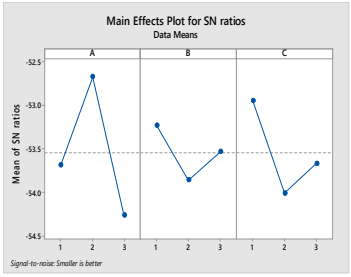
الگوریتم‌های فراابتکاری نسبت به پارامترهای خود بسیار حساس هستند و تغییر این پارامترها تاثیر به‌سزایی بر جستجوی آنها دارند. در این بخش برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های توسعه داده شده از روش طراحی آزمایش های تاگوچی استفاده شده است. در این روش از یک آرایه عمودی به منظور ساماندهی نتایج آزمایش استفاده می‌شود که با بهره‌گیری از نرم افزار مینی تب عملیاتی می‌گردد.

پارامترهای موثربرالگوریتم‌ها به‌همراه سطوح در نظر گرفته شده برای آنها درجدول‌زیرارائه شده‌اند.

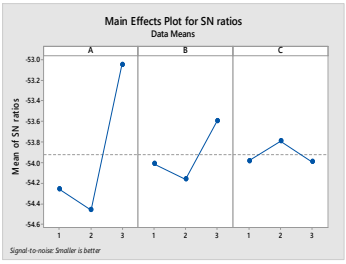
جدول۴- پارامترهای الگوریتم‌های MOBEE و NSGA-II بر اساس آزمایش‌های تاگوچی

پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم NSGA-II			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل npop	Crossover n_c	Mutation n_m
۱	(۴۰۰و۴۵۰)	۰/۶۵	۰/۱۱
۲	(۴۵۰و۵۰۰)	۰/۷۵	۰/۱۳
۳	(۵۰۰و۵۵۰)	۰/۸۵	۰/۱۸
پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم MOBEE			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل npop	تعداد زنبورها	نرخ میرایی شعاع همسایگی
۱	(۴۰۰و۴۵۰)	۳۰	۰/۸۵
۲	(۴۵۰و۵۰۰)	۴۰	۰/۹۰
۳	(۵۰۰و۵۵۰)	۵۰	۰/۹۵

طراحی آزمایشات تاگوچی در نرم افزار مینی‌تب به شکل آرایه‌های متعامد L9 مورد آزمون قرار گرفت که نتایج آن در شکل‌های زیر گزارش شده‌است.



شکل ۱- S/N الگوریتم NSGA-II



شکل ۲- S/N الگوریتم MOBEE

همان‌طور که مشاهده شد پارامترهای مناسب برای دو الگوریتم به قرار زیر خواهد بود:

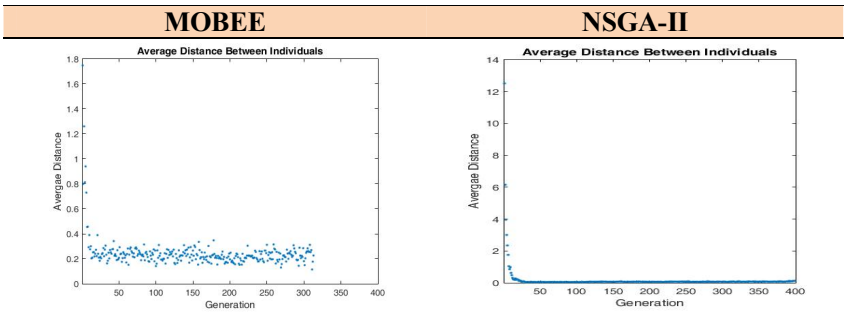
جدول۵- پارامترهای تایید شده برای الگوریتم‌ها

پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم NSGA-II			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل n_{pop}	Crossover n_c	Mutation n_m
۱	(۴۵۰و۵۰۰)	۰/۶۵	۰/۱۱
پارامترهای مورد آزمایش برای الگوریتم MOBEE			
سطح	اندازه جمعیت، تعداد نسل n_{pop}	تعداد زنبورها	نرخ میرایی شعاع همسایگی
۳	(۵۰۰و۵۵۰)	۵۰	۰/۹

حل نمونه مسائل با ابعاد متوسط و بزرگ

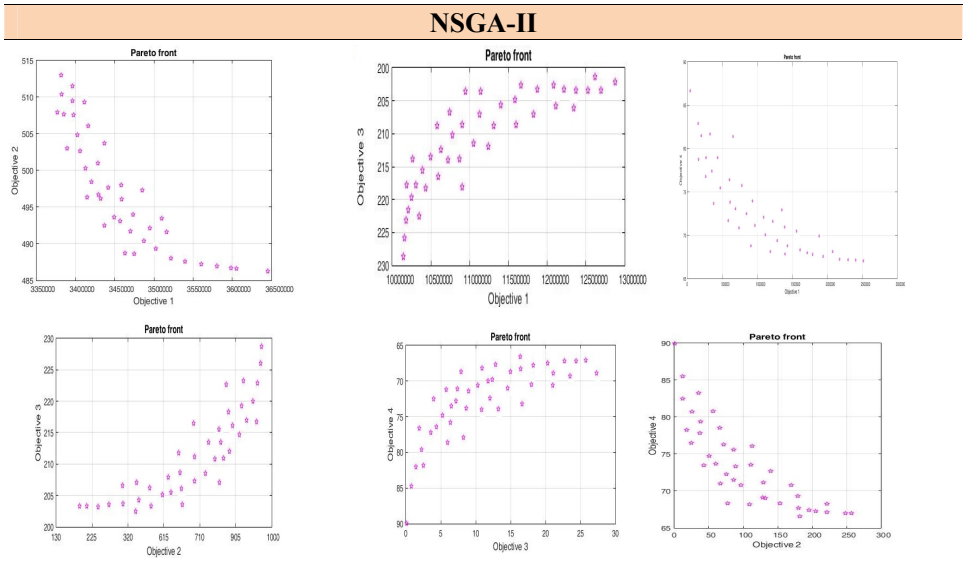
برای حل مسأله در ابعاد بزرگ، با استفاده از نرم افزار Matlab R2015a و در کامپیوتر ۷ هسته‌ای با

پردازشگر ۲,۴۵ گیگاهرتز و رم ۸ گیگابایت تعدادی مسائل نمونه در ابعاد مختلف تعریف و نتایج حل مسأله برای این نمونه مسائل در ادامه آورده شده است. به‌منظور حل مساله مدل‌سازی شده در ابعاد بزرگ از الگوریتم‌های MOBEE و NSGA-II استفاده شده است. الگوریتم‌ها با ۵۰۰ تکرار اجرا شدند که برای الگوریتم زنبور عسل در تکرار ۳۲۰ و برای الگوریتم ژنتیک در تکرار حدود ۴۰۰ شرایط بهینگی محقق شد و جواب‌ها از همگرایی لازم برخوردار شدند.



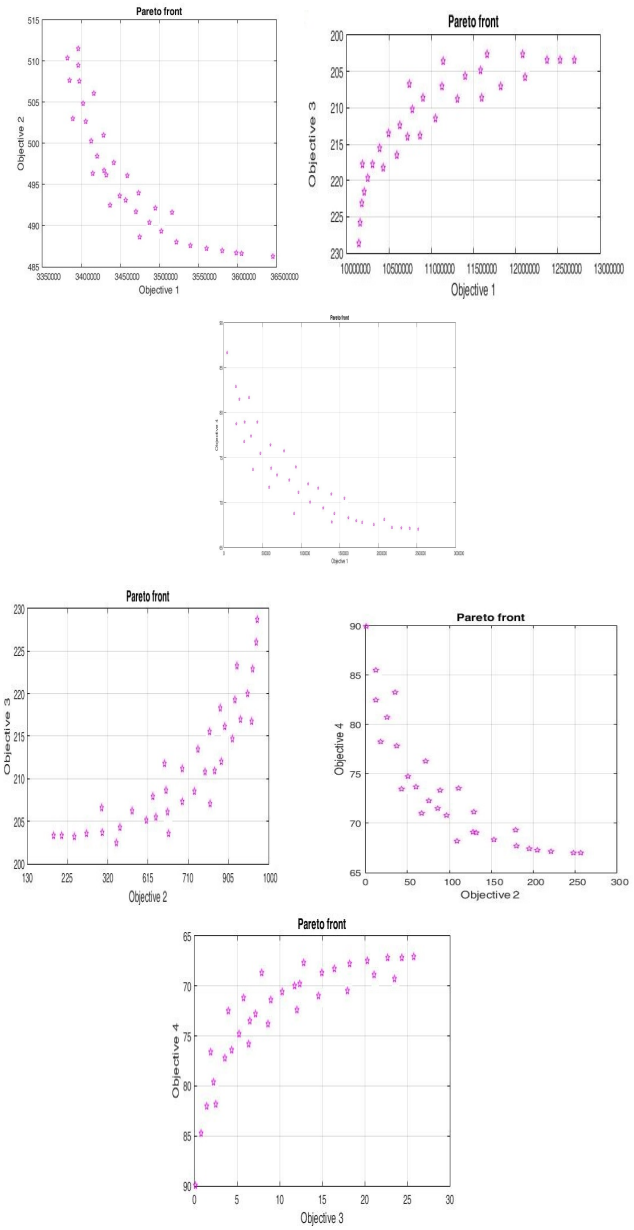
شکل ۳- تعداد تکرار حل مدل برای الگوریتم های پیشنهادی

در ادامه برای دستیابی به جبهه جواب بهینه، مقادیر توابع هدف به ازای هریک از جواب‌های نهایی الگوریتم‌ها بررسی گردید.که در نمودارهای پارتو دو الگوریتم NSGA-II و MOBEE در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل۴- مجموعه جواب پارتو با استفاده از الگوریتم NSGA-II

MOBEE



شکل۵- مجموعه جواب پارتو با استفاده از الگوریتم MOBEE

همان‌طور که مشاهده می‌شود مجموعه جواب پاراتو ارایه شده در هر دو الگوریتم از همگرایی مناسبی برخوردار است. بررسی دقیق‌تر از مجموعه جواب‌های ارایه شده نشان می‌دهد که همگرایی مجموعه جواب پاراتو الگوریتم MOBEE به نسبت مجموعه جواب پارتو ارایه شده برای الگوریتم NSGA-II از برتری نسبی برخوردار می‌باشد.

شاخص‌های ارزیابی

در مسائل بهینه سازی چند هدفه، جواب‌های مسأله تشکیل یک مرز بهینه پارتو را می‌دهند. برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های متفاوت که جواب‌های پارتو ارائه می‌دهند روش‌های گوناگونی وجود دارد. در این قسمت شاخص‌هایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند به اختصار توضیح داده شده است. در بسیاری از مطالعات از شاخص تعداد جواب‌های پارتو به عنوان یک معیار کمی عملکرد الگوریتم استفاده نموده‌اند هرچه تعداد جواب‌های پارتوی یک روش بیشتر و از همگرایی مناسبی برخوردار باشد آن روش مطلوب‌تر است. شاخص دیگری تحت عنوان شاخص فاصله و پراکندگی برای ارزیابی مجموعه جواب وجود دارند که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم.

شاخص فاصله

برای بیان محاسبه فاصله نسبی جواب‌های متوالی توسط اسکات (۱۹۹۵) معرفی شده است. این شاخص هرچه کمتر باشد بهتر است. شاخص فاصله به صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطه(۲۰)
$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \left| \bar{d} - d_i \right|}{(N-1)\bar{d}}$$

در رابطه بالا، N نشان‌دهنده تعداد جواب‌ها، d_i نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین هر دو جواب متوالی در مرز بهینه به دست آمده توسط هر الگوریتم است و $\bar{d}$ میانگین مقادیر d_i می‌باشد.

شاخص پراکندگی

شاخص پراکندگی میزان تنوع یا گوناگونی جواب‌ها را نشان می‌دهد و هرچه بیشتر باشد بهتر است(زیتزلر ، ۱۹۹۹)

رابطه(۲۱)
$$DM = \sqrt{\left(\frac{\max f_{1i} - \min f_{1i}}{f_{1,total}^{\max} - f_{1,total}^{\min}} \right)^2 + \left(\frac{\max f_{2i} - \min f_{1i}}{f_{2,total}^{\max} - f_{2,total}^{\min}} \right)^2}$$

زمان اجرا

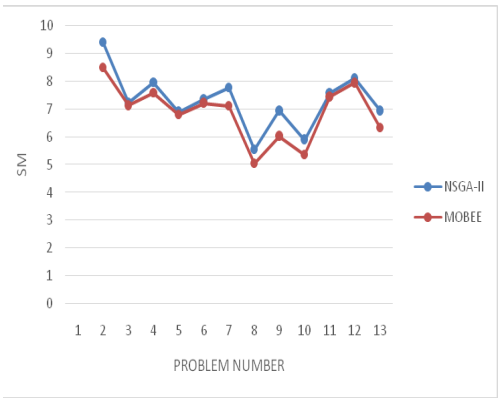
زمان رسیدن به جواب‌های نزدیک به بهینه همواره یکی از مهم‌ترین معیارهای بررسی کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری بوده است.

مقایسه الگوریتم‌ها

نتایج حاصل از آزمایش الگوریتم‌های زنبور عسل(MOBEE) و ژنتیک نامغلوب (NSGA-II) در قالب حل ۱۲ مسئله برای هر الگوریتم در جدول زیر ارائه شده است،کدنویسی الگوریتم‌ها در محیط نرم افزار متلب صورت گرفته و برای گزارش مقادیر هر مساله تولید شده توسط الگوریتم‌های فراابتکاری از متوسط نتایج بدست آمده از ۵ بار اجرای هر الگوریتم استفاده شده است.

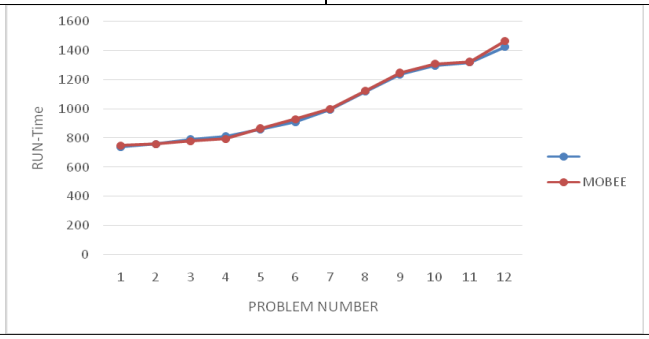
جدول۶- مقایسه عملکرد الگوریتم های MOBEE و NSGA-II در مسائل متوسط و بزرگ

شماره مساله	NSGA-II							MOBEE						
	تعداد فعالیت	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف چهارم	SM	DM	Run time	هدف اول	هدف دوم	هدف سوم	هدف چهارم	SM	DM	Run time
۱	۳۱	۲۵۳۴۳۴۵	۲۹۳	۸۶/۵۲۸۳۲	۵۶/۲۹۹۲	۹/۴۱	۰/۹۸	۷۴۰/۲۲۱	۲۵۷۲۴۱۹/۹	۲۹۷	۸۷/۸۲۸۲۹۲	۵۷/۱۴۵۰۲	۸/۴۹	۰/۹۹	۷۵۰/۱۲۱
۲	۳۳	۲۸۲۹۵۳۶	۳۰۹	۹۶/۷۰۲۷۵	۶۶/۲۴۰۳۲	۷/۲۵	۰/۶۹	۷۵۸/۳	۱/۲۸۷۲۰۴۸	۳۱۴	۹۸/۱۵۵۵۸۱	۶۷/۲۳۵۴۹۲	۷/۱۳	۰/۷۵	۷۵۹/۲۳
۳	۳۶	۹۱/۲۹۳۹	۳۳۱	۱۱۲/۰۵۰۶	۷۶/۲۸۲۸۸	۷/۹۶	۰/۵۹	۷۹۱/۱۷	۲۹۸۳۲۴۷/۳	۳۳۶	۱۳۱/۷۳۴۰۳	۷۷/۴۲۸۹۲۸	۷/۵۹	۰/۵۵	۷۸۰/۱۴
۴	۳۹	۳۰۳۰۳۸۷	۳۶۱	۱۴۰/۲۹۱۵	۸۱/۲۵۳۴۴	۶/۹۱	۰/۶۹۸	۸۱۲/۳	۳۰۷۵۹۱۴/۹	۳۶۶	۱۴۲/۳۹۹۲۱	۸۲/۴۷۴۱۶۴	۶/۸	۰/۷۰۱	۸۰۳/۳۳
۵	۴۴	۳۱۶۸۳۰۱	۳۹۴	۱۶۰/۹۴۴۷	۸۶/۵۲۸۳۲	۷/۳۶	۰/۶۹۸	۸۵۹/۲۵	۳۲۱۵۹۰۰/۸	۴۰۰	۱۶۳/۳۶۲۶۸	۸۷/۸۲۸۲۹۲	۷/۲۲	۰/۷۲۳	۸۷۵/۴
۶	۴۶	۳۲۸۵۸۹۴	۴۲۹	۱۶۲/۶۰۸۳	۹۱/۶۰۰۳۲	۷/۷۸.	۰/۹۸	۹۱۰/۵۶	۳۳۳۵۲۶۰/۶	۴۳۵	۱۶۲/۰۵۱۲۹	۹۲/۹۷۶۴۹۲	۷/۱۱	۱/۰۱	۹۳۰/۲۲
۷	۴۹	۳۵۰۶۷۶۷۶	۴۵۱	۱۶۷/۷۱۰۸	۹۶/۷۰۲۷۵	۵/۵۵	۱/۳۵	۹۹۵/۵۶	۳۵۵۹۴۵۲۱	۴۵۸	۱۷۰/۲۳۰۳۸	۹۸/۱۵۵۵۸۱	۵/۰۵	۱/۴۴۴	۱۰۰۰/۲۳
۸	۵۲	۳۶۴۱۴۰۴	۴۶۵	۱۷۳/۱۴۷۹	۹۹/۷۱۵۵۲	۶/۹۵	۱/۵۶	۱۱۱۹/۲۳	۳۶۹۶۱۱۱/۴	۴۷۲	۱۷۵/۷۴۹۲۵	۱۰۱/۲۱۳۶۱	۶/۰۳	۱/۵۹	۱۱۲۵/۲۳
۹	۵۵	۳۹۵۳۵۸۰	۴۸۴	۱۷۷/۸۵۴۸	۱۰۱/۷۴۴	۵/۹۱	۰/۹۱	۱۲۳۸/۳	۴۰۱۲۹۷/۹	۴۹۲	۱۸۰/۵۲۶۷	۱۰۳/۲۷۲۹	۵/۳۶	۱/۰۱	۱۲۴۹/۴
۱۰	۵۹	۴۰۱۳۸۵۳۳	۵۰۵	۱۹۰/۳۹۲۷	۱۰۴/۶۸۶۱	۷/۵۹	۰/۰۹	۱۲۹۸/۴	۴۰۷۴۱۵۶۱	۵۱۲	۱۹۳/۲۵۳۱۳	۱۰۶/۲۵۸۸۵	۷/۴۵	۰/۱۱	۱۳۱۱/۱۲
۱۱	۶۱	۴۱۸۵۲۰۱۰	۵۲۲	۱۹۳/۱۰۱۲	۱۰۶/۶۱۳۴	۸/۱۱	۰/۷۴	۱۳۲۰/۱۵	۴۲۴۸۰۷۸۰	۵۳۰	۱۹۶/۰۰۲۲۷	۱۰۸/۲۱۵۱۶	۷/۹۵	۰/۸	۱۳۲۵/۱۶
۱۲	۶۵	۴۳۱۹۲۰۸	۵۳۶	۲۰۱/۵۳۰۸	۱۱۱/۸۸۸۳	۶/۹۵	۰/۶۳	۱۴۲۵/۵	۴۳۸۴۰۹۸/۱	۵۴۴	۲۰۴/۵۵۸۵۸	۱۱۳/۵۶۹۲۹	۶/۳۳	۰/۶۹	۱۴۹۶/۵
میانگین	۴۲۳	۱۲۲۲۹۹۹۷	۴۲۶	۱۵۵/۲۳۸	۸۹/۹۶۲۹	۷/۳۱۰	۰/۸۲۶۳	۱۰۲۲/۱۸	۱۲۴۱۳۷۳۷	۴۲۶	۱۵۷/۵۷۱	۹۱/۳۱۴۴۸	۶/۸۷۵	۰/۸۶۴۸۳	۱۰۳۳/۸۴۰



نمودار۲- مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص SM

نمودار۱- مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص DM



نمودار۳- مقایسه الگوریتم‌ها بر اساس شاخص Run Time

مقادیر شاخص‌های ارزیابی دو الگوریتم برای ۱۲ نمونه مساله در ابعاد متوسط و بزرگ در جدول (۶) و نمودارهای(۱)، (۲) و (۳) ارایه شده‌اند. همان‌طور که قبلا تشریح شد هر الگوریتمی که دارای مقدار بزرگتری در شاخص(DM) و مقدار کوچکتری در شاخص(SM) باشد دارای عملکرد بهتری می‌باشد. با توجه به جدول (۶) و نمودارهای شاخص های پراکندگی و فاصله، میانگین مقادیر شاخص(DM) الگوریتم MOBEE بیشتر از الگوریتم NSGA-II و میانگین مقادیر شاخص(SM) مقادیر کمتری نسبت به الگوریتم NSGA-II گزارش می‌کند و این نشان دهنده برتری نسبی الگوریتم MOBEE نسبت به الگوریتم NSGA-II می‌باشد. اما برای شاخص زمان اجرای الگوریتم‌ها(Run Time) همان‌طور که در نمودار (۳) قابل مشاهده می‌باشد؛ الگوریتم NSGA-II نسبت به الگوریتم MOBEE داری عملکرد بهتری می‌باشد.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این مطالعه یک مدل ریاضی صفر و یک برای مسأله زمان‌بندی پروژه‌های نفت،گاز و پتروشیمی با اهدف کمینه کردن هزینه، حداقل سازی زمان، حداکثرسازی کیفیت پروژه و حداقل کردن اثرات زیست محیطی ارایه شد که برای این بهینه سازی، مفروضاتی در نظر گرفته شد و ضمن قطعی بودن داده‌ها و ظرفیت محدود منابع در دو دسته‌ی تجدید پذیر و تجدید ناپذیر، برای انجام هر فعالیت چند روش اجرا در نظر گرفته شد و پیش‌نیازی‌های جزیی به پیش‌نیازی‌های کلی تعمیم داده شد. در مدل کلاسیک مدل به شکل تک هدفه تعریف شده و عامل اثرات زیست محیطی به‌صورت صریح در تعریف مساله بیان‌نشده است. اما در مدل پیشنهادی این مطالعه تعریف مساله موازنه چند هدفه؛ موازنه چهار هدف (زمان،هزینه،کیفیت و اثرات زیست محیطی) بصورت یک‌جا ارائه گردیده‌است. در مدل کلاسیک روابط میان فعالیت‌های پروژه به صورت روابط پیش‌نیازی جزئی در نظر گرفته شده است در حالی که این روابط همیشه به‌سادگی رابطه پیش‌نیازی پایان- شروع با تأخیر زمانی صفر نبوده و سایر روابط پیش‌نیازی هم‌چون روابط شروع- شروع، پایان- پایان و شروع- پایان با میزان مشخصی از تأخیر نیز در دنیای واقعی مدیریت پروژه وجود دارند. لذا در مدل ارائه شده روابط مذکور لحاظ گردید. برای اعتباریابی مدل، ابتدا پنج مثال در ابعاد کوچک تولید و با بهره‌گیری از روش محدودیت اپسیلون توسعه یافته حل و بهترین مقادیر از مجموعه جواب‌های پارتو بدست آمده از توابع هدف گزارش گردید و با نتایج الگوریتم‌های MOBEE و NSGA-II مقایسه گردید و مشاهده گردید که زمان‌های حل الگوریتم‌های فراابتکاری در پنج مثال حل شده کمتر از روش محدودیت اپسیلون است که البته الگوریتم NSGA-II با میانگین زمان اجرای (۷۰۲/۳) ثانیه به نسبت الگوریتم MOBEE با میانگین زمان اجرای(۷۱۱) ثانیه وضعیت مطلوب‌تری داشت، به‌عبارتی دیگر الگوریتم NSGA-II در حل مسائل کوچک تولید شده به نسبت الگوریتم MOBEE از منظر شاخص زمان اجرا در وضعیت عملکردی بهتری قرار داشت.

از طرفی، چون روش دقیق محدودیت اپسیلون برای فعالیت‌های بالای ۲۰ در زمان ۱۸۰۰ ثانیه تعریف شده در نرم افزار گمز پاسخگو نبود در ادامه مساله هایی با فعالیت‌های بالای ۲۰ گره تعریف گردید و با توجه به NP-hard شدن مساله در این ابعاد، برای حل مدل از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شد و مدل با دو الگوریتم MOBEE و NSGA-II حل شد و نتایج عملکرد هر دو الگوریتم با هم مقایسه گردید. همان‌طور که در نمودارهای پارتو دیده شد هر دو الگوریتم برای حل مسئله بخوبی عمل‌کرده‌اند ولی از نظر معیار نظم جواب‌های پارتو الگوریتم MOBEE بهتر عملکرده است. برای

ارزیابی عملکرد این دو الگوریتم، از معیارهای ارزیابی معیار فاصله(DM)، معیار پراکندگی(SM) و معیار زمان اجرا استفاده شده‌است و با ارزیابی این معیارها به این نتیجه رسیدیم که عملکرد الگوریتم MOBEE در قیاس با الگوریتم NSGA-II برتری نسبی دارد و می‌توان برای مدل ریاضی ارائه شده از این الگوریتم فراابتکاری بهره گرفت. به منظور انجام تحقیقات آتی در این زمینه در نظر گرفتن پارامترهای مسائل زمان‌بندی پروژه در شرایط عدم قطعیت و همچنین بکارگیری روش‌های دیگری برای حل مساله را می‌توان پیشنهاد داد. ضمن اینکه می‌توان کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر را در حل این مدل مورد سنجش قرار داد و نتایج آن‌ها را با نتایج این الگوریتم ها مورد مقایسه قرار داد.

موضوع دیگری که می‌تواند در تحقیقات آتی مورد مطالعه قرار گیرد، در نظر گرفتن یک محدودیت جدید برای منابع در مدل مساله زمان‌بندی پروژه با منابع محدود است. زیرا تقسیم منابع به دو دسته تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر اگرچه از دید مصرف پذیری و بازه زمانی تعیین شده، تقسیم بندی معقولی به نظر می‌رسد، اما آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد این است که به مرور زمان منابع تجدیدپذیر مانند ماشین آلات، نیروی انسانی و غیره کارایی اولیه خود را از دست می‌دهند و گاه حتی همانند یک منبع تجدیدناپذیر به پایان می‌رسند.

تشکر و قدردانی

نگارنده‌ی این مقاله برخود لازم می‌داند از شرکت پالایش گاز ایلام به خاطر همکاری و مساعدت در جهت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی نماید.

منابع

۱) پژوهنده، آرش. (۱۳۹۹)، موازنه زمان، هزینه و کیفیت با محدودیت منابع در برنامه‌ریزی پروژه با استفاده از الگوریتم ژنتیک (بهبود جواب‌ها با استفاده از یک روش ترکیبی)،اولین کنفرانس بین‌المللی چالش‌ها و راهکارهای نوین در مهندسی صنایع و مدیریت و حسابداری،ساری،

۲) تقی‌زاده‌یزدی، محمدرضا و غفوری، سعید.(۱۳۹۵)،ارایه یک مدل ریاضی برای مسئله موازنه هزینه- زمان- اثرات زیست محیطی و حل آن با الگوریتم‌های فرا ابتکاری ازدحام ذرات و کرم شب تاب،چشم انداز مدیریت صنعتی،شماره ۲۲۴،صص ۱۲۱-۹۷.

۳) جعفری اسکندری، میثم، یعقوبی، سعید و فرهمند نظر، میثم.(۱۳۹۴)،حل مساله زمانبندی پروژه‌های نفتی تحت شرایط محدودیت منابع با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب، ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۳۱، صص ۴۰ – ۴۶.

۴) عیدی، علیرضا. فاروقی، هیوا. عیدی، فرید.(۱۳۹۵)، ارایه ی دو روش ابتکاری برای مسئله‌ی چند هدفه‌ی موازنه زمان- هزینه – کیفیت پروژه در حالت گسسته با محدودیت‌های پیش نیازی یافته، تعمیم مجله مهندسی صنایع و مدیریت شریف،دوره ۳۲-۱،شماره ۲، صص ۴۶-۳۵.

۵) محبی، علیرضا،(۱۴۰۰)، ارائه یک روش حل جدید برای مدل ریاضی توسعه یافته کمینه‌سازی هزینه تاخیر منابع در زمانبندی پروژه به همراه مطالعه‌ی موردی در یک پروژه حمل و نقل ریلی، دومین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و صنعت،

۶) مومیوند سوگند، داوری اردکانی حامد، مصدق هادی، ابویی اردکان مصطفی.(۱۴۰۰) انتخاب و زمان‌بندی پروژه چندحالتی با منابع محدود با در نظر گرفتن امکان سرمایه‌گذاری مجدد در افق زمانی انعطاف‌پذیر. روش‌های عددی در مهندسی،شماره ۴۰ ، صص۴۲-۱۷

7) Babak H. Tabrizi, Seyed Farid Ghaderi.(2016), A robust bi-objective model for concurrent planning of project scheduling and material procurement, Computers & Industrial Engineering 98 ، 11–29.

8) Bernardo, F. Almeida, Isabel Correia, Francisco Saldanha-da Gama. (2016), Priority-based heuristics for the multi-skill resource constrained project scheduling problem, Expert Systems with Applications 57 ، 91–103.

9) Haupt R.L. Haupt S.E. (2006), "Practical genetic algorithms", Hoboken, New Jersey, A Wiley- Inter science publication.

10) Humyun Fuad Rahman, Ripon K.Chakrabortty Michael J.Ryan.(2020), Memetic algorithm for solving resource constrained project scheduling problems, Automation in Construction ,Volume 111, March 2020, 103052.

11) Huu Dang Quoc, Loc Nguyen The , Cuong Nguyen Doan, Naixue Xiong ,(2020), Effective Evolutionary Algorithm for Solving the Real-Resource-Constrained Scheduling Problem, Data Analysis and Optimization for Intelligent Transportation in Internet of Things ,Volume 2020 |Article ID 8897710

12) Jeroen Burgelman, Mario Vanhoucke.(2018),Maximizing the weighted number of activity execution modes in project planning, European Journal of Operational Research 000,1–15.

13) Martin Tritschler, Anulark Naber, Rainer Kolisch.(2017), A Hybrid Metaheuristic for Resource-Constrained Project Scheduling with Flexible Resource Profiles, European Journal of Operational Research,pp:1-36.

14) Mohammed S. El-Abbasy, Ashraf Elazouni, Tarek Zayed.(2016), MOSCOPEA: Multi-objective construction scheduling optimization using elitist non-dominated sorting genetic algorithm, Automation in Construction 71 , 153–170.

15) Muritiba, Albert Einstein Fernandes, Rodrig ,Francíio Araùjo da Costa,(2018), A Path-Relinking algorithm for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem, Computers and Operations Research 92 , 145–154.

16) Pham D.T., Ashraf Afify. (2007). Ebubekir Koc Manufacturing cell formation using the Bees Algorithm". IPROMS Innovative Production Machines and Systems Virtual Conference, Cardiff, UK.

17) Ripon K. Chakrabortty, Ruhul A. Sarker, Daryl L. Essa M.(2016), Multi-mode resource constrained project scheduling under resource disruptions, Computers and Chemical Engineering 88 , 13–29.

18) Schott, J. R. (1995). Fault Tolerant Design Using Single and Multi criteria Genetic Algorithm Optimization (No. AFIT/CI/CIA-95-039). AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT PATTERSON AFB OH.

19) Shahriar Asta, Daniel Karapetyan, , Ahmed Kheiri, Ender Özcan, Andrew J. Parkes.(2016),Combining Monte-Carlo and hyper-heuristic methods for the multi-mode resource-constrained multi-project scheduling problem, Information Sciences 373 , 476–498.

20) Sha Tao, Changzhi Wu, Zhaohan Sheng and Xiangyu Wang.(2018), Stochastic Project Scheduling with Hierarchical Alternatives, Applied Mathematical Modelling ,Volume 58, Pages 181-202.

21) Sonda Elloumi, Philippe Fortemps,Taïcir Loukil,(2017), Multi-objective algorithms to multi-mode resource-constrained projects under mode change disruption, Computers & Industrial Engineering 106 , 161–173.

22) Stefan Kreter,Julia Rieck,Jürgen Zimmermann .(2016), Models and solution procedures for the resource constrained project scheduling problem with general temporal constraints and calendars, European Journal of Operational Research 251, 387–403.

23) Zhu G, Bard JF, Yu G. A branch-and-cut procedure for the multi-mode resource-constrained project-scheduling problem. INFORMS J Compute 18(3):377–90.

24) Zitzler, E. (1999). Evolutionary algorithms for multi objective optimization: Methods and applications (Vol. 63). Ithaca: Shaker.

یادداشت‌ها

1. Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)
2. Non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)
3. Multi-objective bee (MOBEE)
5. Spacing metric (SM)
6. Diversity metric (DM)
7. Run Time (RT)