مدیریت صنعتی
Journal of Industrial Management
دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران
دورهٔ ۷، شمارهٔ ۲
تابستان ۱۳۹۴
ص. ۳۶۴- ۳۳۳

حل مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده (DICA)

حسین صفری[۱]، علیرضا فقیه[۲]

چکیده: مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) جزء مسائل غیرچندجمله‌ای سخت (NP-Hard) است که برای حل آن، روش‌های ابتکاری و فراابتکاری در مقایسه با راه‌حل‌های دقیق، کارایی بیشتری دارند. در این تحقیق از الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده برای حل مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع در حالت تک‌حالته و همچنین از الگوریتم محاسبهٔ جواب موجه ابتدایی برای افزایش سرعت الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده با استفاده از حذف فضای غیرموجه جست‌وجو، استفاده شده است. الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله بر روی مجموعهٔ مسائل استاندارد کتابخانهٔ PSPLIB آزمایش و از نظر کارایی با تعدادی از روش‌های موجود مقایسه شده است. نتایج آزمایش‌ها، کارایی و امکان‌پذیری الگوریتم پیشنهادی را در حل مسائل استاندارد زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم در حل مسائل با داده‌های واقعی، دو پروژهٔ انجام‌گرفته توسط شرکت قدس نیرو در قالب مسئلهٔ مدل‌سازی و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل شد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

واژه‌های کلیدی: الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده، الگوریتم محاسبهٔ جواب موجه ابتدایی، زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع، مدیریت پروژه.

۱. دانشیار مدیریت صنعتی، دانشکدهٔ مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. دانشجوی دکتری مدیریت گرایش تحقیق در عملیات، دانشکدهٔ مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰
تاریخ پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۹٤/۰۲/۰٦
نویسندهٔ مسئول مقاله: حسین صفری
E-mail: hsafari@ut.ac.ir

مقدمه

برنامه‌ریزی از جمله مواردی است که تأثیر آن در زندگی آدمی به‌ویژه در زمینهٔ اجرای امور تولیدی و پروژه‌ها مشهود است. زمان‌بندی و تخصیص منابع و بودجه‌بندی و تأمین سرمایه در سراسر یک پروژه از جمله مواردی است که برنامه‌ریزی پروژه را شکل می‌دهد. یکی از وظایف مهم و پرچالش مدیریت پروژه در مراحل طراحی و اجرا، زمان‌بندی مناسب و کارای فعالیت‌ها با توجه به محدودیت منابع در دست است. در موقعیت‌های مختلف با توجه به اهدافی که از اجرای پروژه مدنظر است و با توجه به محدودیت‌ها و شرایط مختلف ناشی از جنبه‌های مالی قرارداد یا ویژگی‌های فنی و ذاتی پروژه، مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه به‌صورت‌های گوناگونی مطرح می‌شود. در این بین، دسته‌ای از مسائل در تحقیق در عملیات و مدیریت پروژه مطرح می‌شود که مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP)[1] نام دارد. تاکنون محققان بسیاری با به‌کارگیری روش‌های مختلف برای حل مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع تلاش کرده‌اند، اما آنچه جای خالی آن هنوز حس می‌شود یافتن روشی است که با زمان و صرف هزینهٔ کمتر، جواب بهتر و کاربردی‌تری را برای این گونه مسائل بیابد. روش‌های حل این مسائل را می‌توان در قالب روش‌های دقیق، روش‌های ابتکاری و روش‌های فرا ابتکاری دسته‌بندی کرد.

در این تحقیق مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع با استفاده از یکی از روش‌های جدید فرا ابتکاری به نام الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده (DICA)[2] حل شده است. همچنین برای افزایش کارایی، الگوریتمی مبتنی بر روابط پیش‌نیازی پیشنهاد می‌شود که در آن با حذف جواب‌های غیرموجه از منطقهٔ جست‌وجوی الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده، کارایی به‌صورت چشمگیری افزایش می‌یابد.

پیشینهٔ پژوهش

قدمت مدیریت پروژه به ساخت اهرام مصر، سازه‌های ایران باستان و ... می‌رسد، ولی پیدایش مدیریت پروژه به‌عنوان یک علم یا مجموعه‌ای از تکنیک‌ها از جنگ جهانی اول آغاز شد؛ در سال ۱۹۱۷ هنری ال. گانت نمودار گانت[3] را ابداع کرد. بعدها سایر تکنیک‌ها نظیر CPM، PERT و GERT توسعه یافتند. براساس تعریف فرایندهای PMBOK-2008 زمان‌بندی پروژه[4] مهم‌ترین قسمت از فرایندهای برنامه‌ریزی پروژه[5] است. برنامه‌ریزی زمان، منابع و هزینه

1. Resource-Constrained Project Scheduling Problem
2. Developed Imperialist Competitive Algorithm
3. Gantt Chart
4. Project scheduling
5. Planning Process Group

از اجزای اصلی فرایند برنامه‌ریزی در مدیریت پروژه به‌شمار می‌رود. گونه‌ای از مسائل در زمینهٔ زمان‌بندی فعالیت‌ها با توجه به منابع در اختیار، مطرح می‌شود که با عنوان مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) شناخته می‌شود. این مسائل انواع گوناگونی دارند و در حالت‌های مختلفی بررسی شده‌اند که از آن جمله می‌توان به‌دسته‌بندی هارتمن و بریسکورن از مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع را با توجه به ماهیت و براساس هفت معیار اشاره کرد (هارتمن و بریسکورن، ۲۰۱۰).

جدول ۱. دسته‌بندی انواع مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع براساس ماهیت

ردیف	معیارهای دسته‌بندی	حالات مختلف
۱	ماهیت فعالیت‌ها	تک‌حالته/ چندحالته قابل انقطاع/ غیرقابل انقطاع احتمالی/ قطعی/ فازی
۲	نوع منبع	تجدیدپذیر، تجدیدناپذیر، دوگانه، منابع تجدیدپذیر جزئی، منابعی با ظرفیت وابسته به زمان، منابع پیوسته و ...
۳	نوع روابط پیش‌نیازی	جزئی، کل GPR
۴	نوع تابع هدف	منظم (Regular) یا غیرمنظم (Unregular)
۵	تعداد تابع هدف	single, bi-objective, multi-objective
۶	ماهیت اهداف	اهداف مبتنی بر زمان، ارزش فعلی، هزینه، منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، استحکام و ثبات و ...
۷	تعداد پروژه	تک‌پروژه، چندپروژه

زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن محدودیت منابع از جمله مسائل با ادبیات غنی در حوزهٔ مسائل تحقیق در عملیات و مدیریت پروژه و از دستهٔ مسائل NP-Hard است (بلازویچ، لنسترا و کَن، ۲۰۰۵). تاکنون مطالب زیادی در این زمینه به چاپ رسیده که دو دلیل عمده برای آن می‌توان برشمرد: ۱. این مسئله با توجه به شرایط متفاوت کاربردی و صنعتی از نظر تابع هدف، خصوصیات فعالیت‌ها، منابع و روابط پیش‌نیازی بسیار متنوع‌اند؛ ۲. با توجه به NP-Hard بودن این مسائل، محققان همواره به دنبال معرفی راه‌حل‌های کاراتری برای حل این مسائل بوده‌اند. نخستین طبقه‌بندی از مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع را براکر و همکارانش معرفی کردند (براکر، درکسل، موهرینگ، نیومن و پِش، ۱۹۹۹).

روش‌های بهینه‌یابی دقیق موجود با اینکه جواب بهینه را در اختیار قرار می‌دهند، برای حل این مسئله اغلب شامل تعداد زیادی متغیر و محدودیت‌اند که از کارایی عملی آن‌ها در حل مسائل

با ابعاد واقعی می‌کاهد. ازاین‌رو استفاده از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری در حل این مسائل مطرح است. روش‌های نادقیق برای حل این مسائل را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: دستهٔ اول روش‌های ابتکاری است که فعالیت‌ها را براساس یک قاعدهٔ اولویت‌دهی مرتب کرده و سپس در هر مقطع زمانی انتخاب می‌کنند. عیب اصلی این روش‌ها این است که نمی‌توان یک قاعدهٔ کلی برای مرتب کردن فعالیت‌ها ارائه کرد و مطلوبیت جواب حاصل از قواعد اولویت‌دهی مختلف، به شبکهٔ فعالیت‌های پروژه بستگی دارد و بدین معناست که اگر قاعده‌ای برای یک مسئلهٔ خاص، جواب بهینه را به‌دست دهد، لزوماً همیشه موفق نخواهد بود. از طرفی نیز این روش‌ها امکان توقف در جواب بهینهٔ محلی را دارند که ممکن است از جواب بهینه بسیار دور باشد. دستهٔ دوم، روش‌های فراابتکاری است که از یک یا چند جواب اولیه شروع می‌کنند و براساس جواب‌های موجود در هر تکرار به بهبود آن جواب‌ها و نزدیک شدن به جواب بهینه در مدت زمان مناسب اقدام می‌کنند (اقتباس از عالم تبریز، زندیه و محمدرحیمی، ۱۳۹۰).

در جدول ۲ روند توسعهٔ مسئلهٔ RCPSP تا سال ۲۰۰۰ نشان داده شده است (صادقی، صفی و برزین‌پور، ۱۳۸۹):

جدول ۲. روند توسعهٔ مسائل RCPSP تا سال ۲۰۰۰

سال	نوع روش	محقق
۱۹۶۱	روش مسیر بحرانی CPM	کلی
۱۹۶۲	روش MPM	روی
۱۹۶۳	روش RCPSP	کلی
۱۹۶۷	GERT	پریتاسکر
۱۹۶۹	اولین فرمول‌بندی مسئلهٔ RCPSP	پریتاسکر
۱۹۸۳	نشان دادن RCPSP به‌عنوان یک مسئلهٔ NP-Hard	بلازویچ
۱۹۸۸	فرمول‌بندی مسئلهٔ RCPSP با قابلیت انقطاع فعالیت‌ها	کاپلان
۱۹۹۳	فرمول‌بندی دیگری از RCPSP	آلوارز
۱۹۹۷	روش CCM	گولدرت
۱۹۹۸	فرمول‌بندی دیگری از RCPSP	مینگوتسی
۱۹۹۹	طبقه‌بندی مدل‌های RCPSP	براکر
۱۹۹۹	فرمول‌بندی دیگری از RCPSP	کلین
از سال ۲۰۰۰ تاکنون	استفاده از روش‌های حل مختلف برای مسائل گوناگون RCPSP	محققان مختلف

از جمله مسائل NP-hard که در تحقیق در عملیات و مدیریت پروژه مطرح می‌شود، مسائلی است که با نام مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) شناخته می‌شوند. شکل استاندارد مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع را می‌توان مانند یک مسئلهٔ بهینه‌سازی ترکیبی تعریف کرد که در آن متغیرهای تصمیم محدودیت‌ها و تابع هدف و ... وجود دارد. دسته‌ای از فعالیت‌ها و دسته‌ای از منابع (زمان فعالیت‌ها، نیاز به منبع هر فعالیت، منابع در دسترس، پیش‌نیازهای هر فعالیت) به‌عنوان مشخصه‌های اصلی مسئله خود را نشان می‌دهند. متغیرهای تصمیم زمان شروع فعالیت‌ها در دورهٔ زمانی به‌صورت عدد صحیح تعریف می‌شود. تابع هدف می‌تواند برای کمینه کردن در موارد مدنظر مانند بیشترین زمان تکمیل فعالیت‌ها، زمان تأخیر در اجرای پروژه و ... به‌کار رود. دو نوع محدودیت نیز مطرح است: ۱. محدودیت‌های پیش‌نیازی که بدین معنا هستند که قبل از آغاز هر فعالیت، باید فعالیت‌های پیش‌نیاز آن انجام گرفته باشند؛ ۲. محدودیت منابع که در دوره‌ای از زمان برای هر منبع تقاضایی که از سوی فعالیت‌ها مطرح می‌شود بیش از منابع در دسترس است (آرتیگِس، دماسی و نِرون، ۲۰۰۸: ۱۴-۱۳).

این مسائل را می‌توان بدین صورت تشریح کرد که یک پروژه شامل n فعالیت است که برای تکمیل پروژه باید هر یک از آن‌ها انجام گیرد. فعالیت‌ها براساس دو نوع محدودیت با یکدیگر ارتباط دارند:

۱. محدودیت‌های پیش‌نیازی: که به‌موجب آن یک فعالیت نمی‌تواند آغاز شود تا قبل از اینکه کلیهٔ فعالیت‌های پیش‌نیازش به اتمام رسیده باشد؛
۲. محدودیت‌های مربوط به کمیابی منابع: اجرای هر فعالیت در پروژه به منابع نیاز دارد و منابع در دسترس ما ظرفیت محدودی دارند. به‌عبارتی می‌توان این گونه موضوع را تشریح کرد که هر فعالیت j برای اجرا به $r_{۲}$ واحد از منبع نوع K نیاز دارد و هم‌زمان نیز فعالیت i به میزان $r_{۲}$ واحد از منبع نوع K نیاز دارد و این در حالی است که ظرفیت در اختیار از منبع نوع K به میزانی نیست که هم‌زمان در هر دو فعالیت استفاده شود (مونتویا و همکاران، ۲۰۰۹).

به‌صورتی جامع‌تر می‌توان گفت زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) عبارت است از زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه با توجه به روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع. مسئلهٔ RCPSP شامل یک پروژه با j فعالیت است که به‌صورت $j = ۱, \dots, J$ نمایش داده می‌شود. زمان اجرای هر فعالیت j با D_j نمایش داده می‌شود. هر فعالیت فقط یک بار می‌تواند شروع شود، و فعالیت

ممکن است قابل انقطاع[1] باشد یا نباشد. به‌علت نیازهای تکنیکی، یک رشته روابط پیش‌نیازی[2] بین فعالیت‌ها وجود دارد که به این صورت مجموعه‌ای از روابط به‌صورت P_j نمایش داده می‌شود، که نشان می‌دهد یک فعالیت j امکان شروع شدن ندارد، مگر در حالتی که همهٔ روابط پیش‌نیازی و پیش‌نیازهایش $(i \in P_j)$ کامل شده باشد. روابط پیش‌نیازی را می‌توان با استفاده از شبکه‌های فعالیت روی گره (AON)[3] نمایش داد که این با فرض غیر مدور بودن شبکه نشان داده می‌شود (کرزنر، ۲۰۰۹: ۴۹۶).

البته این تعریف بسیار ساده‌ای از این گونه مسائل بود. در واقع مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع در دسته مسائل بهینه‌سازی NP-hard قرار می‌گیرند که در عمل یکی از سخت‌ترین مسائل کلاسیک تحقیق در عملیات و مدیریت پروژه، به‌شمار می‌رود (آرتیگس، دماسی و نیرون، ۲۰۰۸: ۱۴-۱۳).

مدل پایهٔ مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با منابع محدود بدین صورت تعریف می‌شود:

فرض کنید یک پروژه براساس یک شبکهٔ AON به‌صورت $G(V, E)$ تعریف شود، که در آن V مجموعهٔ تمام گره‌هایی است که نمایندهٔ فعالیت‌ها هستند و E مجموعهٔ کمان‌هایی است که روابط پیش‌نیازی را به‌صورت FS مشخص می‌کنند (بلازویچ، لنسترا و کَن، ۱۹۸۳).

اگر N تعداد فعالیت‌ها در پروژه و $J=\{۱, ۲, \ldots, N\}$ مجموعهٔ تمام فعالیت‌ها و $\prod$ مجموعهٔ تمام جایگشت‌های تعریف‌شده بر روی J باشد، هر جایگشت $\pi \in \Pi$ به‌صورت N بردار $(\pi(۱), \pi(۲), \ldots, \pi(N))$ تعریف می‌شود. فعالیت‌های فرضی ۱ و N فعالیت‌های شروع و پایان پروژه و با زمان صفر هستند. فعالیت‌ها باید بدون انقطاع صورت گیرند.

مجموعهٔ $K = \{۱, \ldots, K\}$ نیز مجموعهٔ منابع تجدیدپذیر مسئله است. فعالیت‌های مجموعهٔ J دو نوع محدودیت دارند: محدودیت‌های پیش‌نیازی و محدودیت‌های منابع. محدودیت‌های پیش‌نیازی ترتیب اجرا شدن فعالیت‌ها را مشخص می‌کنند. بنابراین هر فعالیت j باید بعد از تکمیل مجموعهٔ تمام پیش‌نیازهایش P_j زمان‌بندی شود. محدودیت‌های منابع نیز مشخص‌کنندهٔ ظرفیت محدود منابع مورد نیاز فعالیت‌ها هستند.

فعالیت در حال پردازش j در هر بازهٔ ثابت از طول مدت d_j به $r_{j,k}$ واحد از منبع تجدیدپذیر $k \in K$ نیاز دارد. منبع نوع k دارای ظرفیت محدود R_k در هر نقطه از زمان است. برای فعالیت‌های ابتدا و انتهای پروژه $k \in K, r_{.,k} = r_{n+۱,k} = ۰, d_. = d_{n+۱} = ۰$ است. زمان آغاز هر فعالیت با $S_j (۰ \leq j \leq n + ۱)$ و زمان پایان آن با $F_j (۰ \leq j \leq n + ۱)$ نشان داده

1. Preemptive
2. Precedence Relations
3. Activity On Node

می‌شود. منظور از زمان‌بندی، انتساب زمان‌های شروع S_j به فعالیت‌های $j = ۰, ۱, \ldots, n+۱$ است. همهٔ اطلاعات به‌صورت قطعی است و پارامترها دارای مقادیر صحیح و غیرمنفی‌اند.

هدف RCPSP، یافتن یک زمان‌بندی برای فعالیت‌ها با توجه به محدودیت‌های منابع و پیش‌نیازی است، به‌طوری‌که زمان تکمیل پروژه حداقل شود. اهداف دیگری مانند کاهش هزینه، افزایش سوددهی پروژه یا کارایی منابع نیز در برخی از انواع این مسائل وجود دارد. به‌طور معمول اهداف با هم تضاد دارند؛ برای مثال کاهش مدت زمان‌بندی با اختصاص منابع بیشتر به فعالیت‌ها امکان‌پذیر است، اما در مقابل هزینهٔ کلی پروژه افزایش می‌یابد. با افزایش اهداف، امکان ایجاد تضاد در بین آن‌ها بیشتر می‌شود و باید سازوکاری برای تعیین ارتباط بین آن‌ها و تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام هدف مهم‌تر است تعریف شود (بارتشی، ۱۹۹۶؛ براکر، درکسل، موهرینگ، نیومن و پش، ۱۹۹۹؛ هارتمن و بریسکورن، ۲۰۱۰).

مسئلهٔ RCPSP در حالت پایه به‌صورت برنامهٔ صحیح باینری زیر تعریف می‌شود.

رابطهٔ ۱)
$$Min \quad F_{n+1}$$
$$F_h \leq F_j - d_j \qquad j = 0, 1, \ldots, n+1; \quad h \in P_j$$
$$\sum_{j \in A(t)} r_{j,k} \leq R_k \qquad k \in K; t \geq 0$$
$$F_j \geq 0 \qquad j = 0, 1, \ldots, n+1$$

مجموعهٔ $A(t) = \{j \in J \mid F_j - d_j \leq t \leq F_j\}$، مجموعهٔ فعالیت‌هایی است که در زمان ثابت t در حال پردازش‌اند. تابع هدف مسئله، زمان اتمام فعالیت انتهایی پروژه را کمینه می‌کند؛ بنابراین زمان تکمیل پروژه حداقل خواهد شد. محدودیت اول بر محدودیت‌های پیش‌نیازی در بین فعالیت‌ها تأکید دارد و محدودیت دوم برای هر منبع نوع K و هر زمان ثابت t، تقاضای منبع فعالیت‌ها را محدود می‌کند تا در حین پردازش از ظرفیت موجود تجاوز نکنند. سرانجام قسمت آخر مدل نیز متغیرهای تصمیم را تعریف می‌کند (کولیش و هارتمن، ۱۹۹۹؛ تورموس و لووا، ۲۰۰۱).

هنگامی که ترتیب فعالیت‌ها در یک جایگشت π با ارتباطات پیش‌نیازی در پروژه سازگار باشد، یک «ترتیب ممکن» یا جواب موجه براساس محدودیت‌های پیش‌نیازی نامیده می‌شود. این بدان معناست که فعالیت‌ها می‌توانند به همان صورت گفته‌شده در «ترتیب» کامل شوند. هر جایگشت، لزوماً یک ترتیب ممکن نیست. در حالت پیش‌فرض تعداد این جایگشت‌ها برابر است با N! که در آن N نشان‌دهندهٔ تعداد فعالیت‌های پروژه است.

فرض کنید F مجموعهٔ تمام جایگشت‌های ممکن روی $\prod$ باشد در این حالت می‌توان پروژه را براساس ترتیب ممکن مشخص‌شده و با رعایت محدودیت منابع زمان‌بندی و زمان کل اجرای پروژه را تعیین کرد.

در این مقاله دسته‌بندی در قالب تکنیک‌های حل مسئله مطرح می‌شود. در دسته‌بندی مسائل RCPSP با توجه به تکنیک حل، دو دسته بزرگ از روش‌ها مطرح است:

الف) روش‌های دقیق[1]؛

ب) روش‌های شبه دقیق[2].

الف) روش‌های دقیق

این دسته از روش‌ها شامل الگوریتم‌هایی هستند که در صورت رسیدن به جواب، جواب بهینهٔ مسئله را به‌دست خواهند داد. از جملهٔ این الگوریتم‌ها می‌توان برنامه‌ریزی خطی (LP)، برنامه‌ریزی عدد صحیح (ILP)، برنامه‌ریزی صفر و یک (BP)، و برنامه‌ریزی غیرخطی(NLP) و... را نام برد. پاره‌ای از تحقیقات صورت‌گرفته با روش‌های دقیق در جدول ۳ ذکر شده است. با پیشرفت روزافزون علوم کامپیوتر و استفاده از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری، کاربرد روش‌های دقیق در پژوهش‌های اخیر سیر نزولی داشته است.

جدول ۳. استفاده از روش‌های دقیق برای حل RCPSP

محقق و سال تحقیق	شرح تحقیق	تکنیک
پریتسکر، واترز و ولف (۱۹۶۹)	حل مسئلهٔ RCPSP بدون GPR	برنامه‌ریزی صفر و یک
مگیدوت و ایچیمور (۱۹۸۵)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئله RCPSP	برنامه‌ریزی خطی
کاپلان (۱۹۸۸)	حل مسئلهٔ RCPSP	برنامه‌ریزی صفر و یک
آلوارز و تماریت (۱۹۹۳)	حل مسئلهٔ RCPSP	برنامه‌ریزی عدد صحیح
مینگوتسی، مانیِتسو، ریچیاردلی و بیانکو (۱۹۹۸)	حل مسئلهٔ RCPSP	برنامه‌ریزی صفر و یک
براکر، کناست، شو و تیله (۱۹۹۸)	حل مسئلهٔ RCPSP	تکنیک شاخه و کران
کلاین و شول (۱۹۹۹)	حل مسئلهٔ RCPSP	برنامه‌ریزی صفر و یک
وانگ، پرکینز و کورانا (۲۰۰۲)	حل مسئلهٔ RCPSP	برنامه‌ریزی خطی

1. Exact algorithm
2. Non Exact algorithm

ب) روش‌های شبه‌دقیق

روش‌های ابتکاری: تاکنون روش‌های ابتکاری زیادی با توجه به ماهیت مسائل زمان‌بندی در سازمان‌های مختلف و با توجه به شرایط هر یک ارائه شده است. روش‌های ابتکاری به روش‌هایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها با فدا کردن جواب دقیق، مدل سعی دارد سرعت رسیدن به جواب نزدیک به بهینه را افزایش دهد. ازاین‌رو در مدل‌های ابتکاری گرچه مدل به جواب بهینه نمی‌رسد، با سرعت بیشتری، جوابی خوب را که نزدیک به جواب بهینه است در اختیار می‌گذارد. به‌عنوان مثال می‌توان به تحقیقات ذکرشده در جدول ۴ اشاره کرد.

جدول ٤. روش‌های ابتکاری برای حل RCPSP

محقق و سال تحقیق	شرح تحقیق	تکنیک
گولنکو گینزبورگ و گانیک (۱۹۹۸)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	ابتکاری
لووا، ماروتو و تورموس (۲۰۰۰)	بیشینه کردن استفاده از منابع به‌همراه کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	ابتکاری
هوانگ و لیو (۲۰۰۵)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	ابتکاری
بودهاکولسومسیری و کیم (۲۰۰۶)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	ابتکاری
کاتساوونیس (۲۰۰۷)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	ابتکاری
یوسفی، غضنفری، شاهنعقی و حیدری (۲۰۰۷)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	ابتکاری
کروگر و شول (۲۰۰۸)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	ابتکاری
وایتهاوس، دیپوی و موراگا رِینالدو (۲۰۰۹)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	ابتکاری
باچویژ، باناسژاک و موسزینسکی (۲۰۰۹)	تخصیص منابع در پروژه	ابتکاری
گورچیتسا و یانیاک (۲۰۰۹)	حداقل کردن حداکثر زمان درگیری منابع در مسئلهٔ RCPSP	ابتکاری
لیو و وو (۲۰۱۰)	ارائهٔ مدل ماتریس ظرفیت منابع	ابتکاری

روش‌های فراابتکاری: در سال‌های پس از ۲۰۰۰ تاکنون استفاده از این روش‌ها همزمان با پیشرفت کامپیوترها و روی کار آمدن برنامه‌های قوی‌تر قوت گرفته است، به‌طوری‌که روش‌های فرا ابتکاری بسیاری با حالت‌های گوناگون مطرح شد. از جملهٔ این روش‌های می‌توان به الگوریتم ژنتیک، الگوریتم جست‌وجوی ممنوع، الگوریتم شبکه‌های عصبی، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم جست‌وجوی پراکندگی[1]، شبکه‌های پتری، الگوریتم مورچگان، الگوریتم زنبور عسل و... اشاره کرد. تحقیقات ذکرشده در جدول ۵ از این دسته‌اند.

1. Scatter search

جدول ۵. روش‌های فراابتکاری برای حل RCPSP

محقق و سال تحقیق	شرح تحقیق	تکنیک
هارتمن (۱۹۹۸)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
ردی، کومانان و چتی (۲۰۰۱)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
فاطمی قمی و اشجاری (۲۰۰۱)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	آنیل شبیه‌سازی‌شده
هارتمن (۲۰۰۲)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
کوچتوف و استولیار (۲۰۰۳)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم جست‌وجوی ممنوع
بولیمِن و لکوک (۲۰۰۳)	حل مسئلهٔ RCPSP	آنیل شبیه‌سازی‌شده
آلکاراز، ماروتو و رویز (۲۰۰۴)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
لیو، ژائو، دو و لی (۲۰۰۵)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
دبلز، درِیک، لیوس و وانهوک (۲۰۰۶)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم جست‌وجوی پراکندگی
رنجبر و کیانفر (۲۰۰۷)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
مینگ، یوان و هایشانگ (۲۰۰۷)	بیشینه کردن کارایی منابع در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم مورچگان
چهارسوقی و میمند کرمانی (۲۰۰۷)	کمینه کردن هزینه‌ها و کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم مورچگان
جاربویی، داماک، داماک و ربای (۲۰۰۷)	کمینه کردن زمان دیر کرد در پروژه در مسئلهٔ RCPSP	آنیل شبیه‌سازی‌شده
لووا، تورموس، سروانتس و باربر (۲۰۰۸)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
سروانتس، لووا، تورموس و باربر (۲۰۰۸)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
چن و شاهندشتی (۲۰۰۸)	کمینه کردن زمان دیرکرد در پروژه در مسئلهٔ RCPSP	آنیل شبیه‌سازی‌شده
چن، هسو و چانگ (۲۰۰۸)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	شبکهٔ پتری
مخیا و مونتویا (۲۰۰۸)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	شبکه پتری
پتگم و وانهوکی (۲۰۰۹)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
مونتویا و همکاران (۲۰۰۹)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ژنتیک
صادقی، صفی و برزین‌پور (۱۳۸۹)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم زنبور عسل
دامغانی، توکلی مقدم و شاه‌علیزاده (۱۳۹۰)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم مورچگان اصلاح‌شده
قلی‌پور و شهبازی (۲۰۱۱)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم جست‌وجوی هارمونی
آگاروال، کولاک و ارنگوچ (۲۰۱۱)	کمینه کردن زمان تکمیل پروژه در مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم نئوروژنتیک
موبینیا، موبینیب و رابانیا (۲۰۱۱)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم ایمن‌سازی مصنوعی
چن (۲۰۱۱)	حل مسئلهٔ RCPSP	الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

با بررسی جدول ۵ مشاهده می‌شود که در سال‌های اخیر، توجه و استفاده از روش‌های شبه‌دقیق (ابتکاری و فراابتکاری) افزایش یافته و تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است.

روش بررسی‌شده در این پژوهش در دستهٔ روش‌های فراابتکاری قرار می‌گیرد که به‌تازگی توسط یک محقق ایرانی مطرح شده است. تاکنون الگوریتم‌های بهینه‌سازی مطرح‌شده، اغلب الهام‌گرفته از فرایندهای طبیعی‌اند و در ارائهٔ این الگوریتم‌ها به سایر نمودهای تکامل انسانی توجهی نشده است.

اغلب الگوریتم‌های بهینه‌سازی مطرح‌شده در گذشته، شبیه‌سازی کامپیوتری فرایندهای طبیعی‌اند. شاید یک دلیل برای این کار، ملموس بودن و سادگی فرموله کردن و درک تکامل این فرایندها باشد. در نقطهٔ مقابل، در ارائهٔ الگوریتم‌های بهینه‌سازی، علی‌رغم توجه به تکامل زیستی انسان و سایر موجودات، به تکامل اجتماعی و تاریخی او به‌عنوان پیچیده‌ترین و موفق‌ترین حالت تکامل، توجه چندانی نشده است. الگوریتم رقابت استعماری، یک الگوریتم الهام‌گرفته از تکامل اجتماعی انسان، برای بهینه‌سازی، توسعه داده شده است. این الگوریتم با الهام‌گیری از یک فرایند اجتماعی- سیاسی، نسبت به روش‌های مطرح‌شده دارای توانایی زیادی بوده و تا حد بسیار زیادی نیز سریع است (آتش‌پز گرگری، ۱۳۸۷).

همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم، نیز با تعدادی جمعیت اولیهٔ تصادفی شروع می‌شود که هر کدام از آن‌ها یک «کشور» نام دارد. تعدادی از بهترین کشورهای اولیه، به‌عنوان امپریالیست یا استعمارگر[1] انتخاب می‌شوند. باقی‌ماندهٔ کشورها نیز مستعمره[2] در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با روندی خاص به‌سمت خود می‌کشند. قدرت کل هر امپراتوری، به هر دو بخش تشکیل‌دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (به‌عنوان هستهٔ مرکزی) و مستعمرات آن بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراتوری به‌صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافهٔ درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل شده است.

با شکل‌گیری امپراتوری‌های اولیه، رقابت استعماری میان آن‌ها شروع می‌شود. هر امپراتوری که نتواند در رقابت استعماری، موفق باشد و بر قدرت خود بیفزاید (یا دست‌کم از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنهٔ رقابت استعماری، حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراتوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراتوری‌های رقیب، و چیرگی بر آن‌ها خواهد بود. در

1. Imperialist
2. Colony

نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به‌تدریج بر قدرت امپراتوری‌های بزرگ‌تر افزوده شده و امپراتوری‌های ضعیف‌تر، حذف خواهند شد. امپراتوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. با گذشت زمان، مستعمرات، از لحاظ قدرت به امپراتوری‌ها نزدیک‌تر خواهند شد و نوعی همگرایی به‌وجود خواهد آمد. حد نهایی رقابت استعماری، زمانی است که یک امپراتوری واحد در دنیا وجود داشته باشد، با مستعمراتی که از لحاظ موقعیت، به خود کشور امپریالیست، خیلی نزدیک‌اند.

ازآنجاکه الگوریتم رقابت استعماری الگوریتمی نوپاست، تحقیقات در این حوزه کم‌تعدادند. بیشتر تحقیقات این حوزه نیز به بهینه‌سازی در حوزهٔ مهندسی برق، مکانیک و ... پرداخته‌اند. در این بین برخی تحقیقات نیز در حوزهٔ مهندسی صنایع و مدیریت صنعتی صورت گرفته که در جدول ۶ به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

جدول ٦. پژوهش‌های صورت‌گرفته با الگوریتم رقابت استعماری

محققین و سال تحقیق	موارد کاربرد	عنوان پژوهش
آتش‌پز گرگری (۱۳۸۷)	ارائهٔ الگوریتم رقابت استعماری	توسعهٔ الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن
رضایی (۱۳۸۸)	حل مسئلهٔ کنترل موجودی چندسطحی	ارائهٔ الگوریتم فراابتکاری کارا برای حل مدل کنترل موجودی چندسطحی
شکرانه‌پور (۱۳۸۸)	زمان‌بندی سیستم مونتاژ جریان کاری دومرحله‌ای	زمان‌بندی دومعیارهٔ سیستم مونتاژ جریان کاری دومرحله‌ای توسط روش‌های فراابتکاری
طالبی (۱۳۸۹)	انتخاب و بهینه‌سازی سبد سهام	انتخاب و بهینه‌سازی سبد سهام با استفاده از روش‌های فراابتکاری و مقایسهٔ آن با سبدهای تشکیلیِ خبرگان و تازه‌کارها در بازار بورس اوراق بهادار تهران
باقری، زندیه و فارسیجانی (۲۰۱۰)	تعادل خط تولید U شکل	Balancing of stochastic U-type assembly lines: an imperialist competitive algorithm
بهنامیان و زندیه (۲۰۱۱)	کمینه کردن هزینهٔ دیرکرد در مسائل تولید جریانی	A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties
پورکاظمی، فتاحی، مظاهری و اسدی (۱۳۹۲)	بهینه‌سازی سبد پروژه‌های با اثر متقابل	بهینه‌سازی سبد پروژه‌های با اثر متقابل با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA)
زنیار، کریمی، پورصباغ و نادری (۲۰۱۵)	بهینه‌سازی مسئلهٔ فروشندهٔ دوره‌گرد	A novel imperialist competitive algorithm for generalized traveling salesman problems
روزبه‌نیا، همتی فرب و اخوان نیاکیک (۲۰۱۵)	بهینه‌سازی مدیریت موجودی سبز	A hybrid genetic and imperialist competitive algorithm for green vendor managed inventory of multi-item multi-constraint EOQ model under shortage

روش‌شناسی پژوهش

این تحقیق از نظر هدف از نوع توسعه‌ای و کاربردی، و از نظر ماهیت و روش جمع‌آوری داده‌ها، از نوع توصیفی- تحلیلی و از شاخهٔ مطالعات موردی است. مراحل اجرای تحقیق به‌شرح زیر است:

۱. جمع‌آوری ادبیات تحقیق در زمینهٔ RCPSP: در این گام با مطالعهٔ پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینهٔ مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع، سعی در جمع‌بندی و بررسی تحقیقات و مطالعات پیشین در این حوزه می‌شود؛

۲. مدل‌سازی RCPSP در قالب الگوریتم رقابت استعماری: در این گام که اصلی‌ترین بخش این پژوهش به حساب می‌آید، مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع در قالب الگوریتم رقابت استعماری مدل‌سازی می‌شود؛

۳. کدنویسی مدل تهیه‌شده: در این مرحله از تحقیق با استفاده از نرم‌افزار MATLAB اقدام به کدنویسی این مدل می‌شود؛

۴. اجرای مدل در با استفاده از داده‌های استاندارد: در این گام مدل تهیه‌شده با استفاده از داده‌های استاندارد PSPLIB که در سایت کامپیوتری ProGen[1] به‌صورت فایل‌های مجزا ذخیره شده و می‌توان الگوریتم‌های جدید را بر روی آنها آزمون کرد، اجرا می‌شود؛

۵. مقایسه با سایر الگوریتم‌ها: در این گام نتایج اجرای مدل را با جواب بهینهٔ مدل که با روش‌های دقیق حاصل شده و نیز با الگوریتم‌های دیگر چون انواع الگوریتم ژنتیک، الگوریتم جست‌وجوی ممنوع، الگوریتم مورچگان، الگوریتم زنبور عسل، الگوریتم آنیل شبیه‌سازی شده و ... مقایسه می‌شود. برای این کار از سایت منبع http://www.mpsplib.com استفاده می‌شود؛

۶. مدل‌سازی موردپژوهی تحقیق: در گام آخر نیز براساس اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری شده دربارهٔ پروژه مورد مطالعه اقدام به مدل‌سازی و حل مدل RCPSP آن در قالب الگوریتم رقابت استعماری می‌شود.

الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده (DICA)

الگوریتم رقابت استعماری ماهیتی پیوسته دارد و این خاصیت آن استفاده از آن در مسائل گسسته را دشوار می‌کند و محقق مجبور خواهد شد از کلیدهای تصادفی برای تبدیل اعداد گسسته به

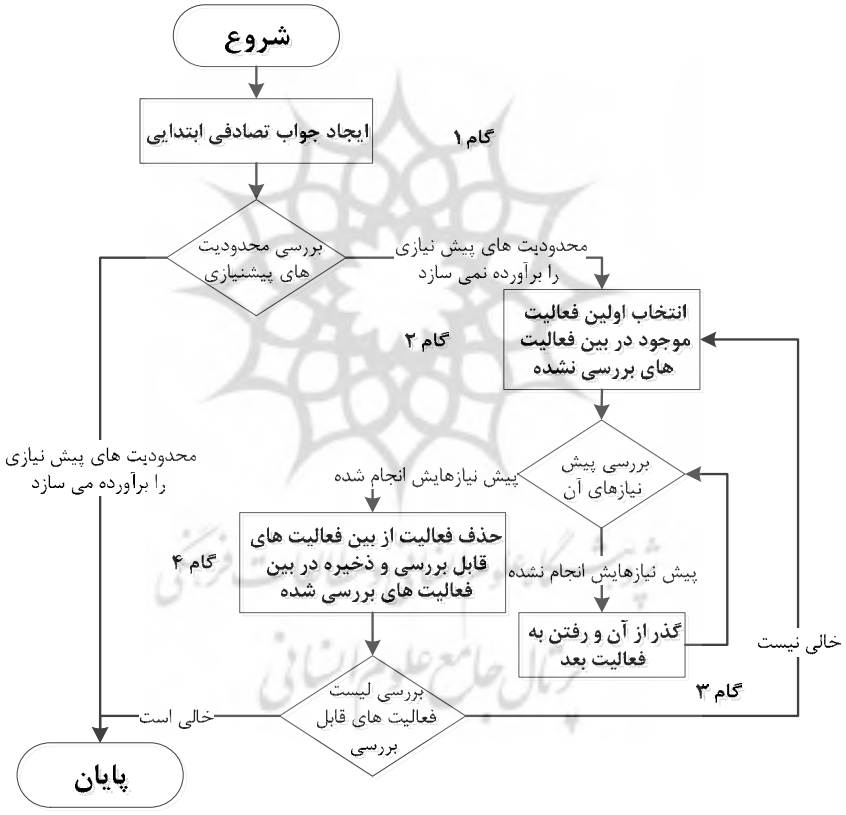
1. http://129.187.106.231/psplib

ماهیت پیوسته استفاده کند که این امر تا حد زیادی از کارایی الگوریتم رقابت اسـتعماری خواهـد کاست.

در این تحقیق با اصلاح ماهیت الگوریتم رقابت استعماری گونه‌ای خاص از آن به منظور حل مسائل گسسته جایگشتی (همچون مسئلهٔ RCPSP) ایجاد شده است.

الگوریتم محاسبهٔ جواب موجه ابتدایی

الگوریتم پیشنهادی مطرح‌شده در این تحقیق بر مبنای محدودیت‌های پیش‌نیازی بین فعالیت بنا نهاده شده است.



شکل ۱. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی تهیهٔ جواب موجه ابتدایی

گام‌های این روش به‌صورت زیر است:

۱. یک جواب تصادفی ابتدایی که اولویت اجرای فعالیت‌ها را به‌دست می‌دهد، ایجاد می‌شود؛ بدین صورت که از بین !N طریق ممکن در بین اولویت‌های اجرای فعالیت‌ها بدون توجه به محدودیت‌های مسئله یک جواب تصادفی انتخاب می‌شود. درصورتی‌که جواب تصادفی به‌دست‌آمده از لحاظ محدودیت‌های پیش‌نیازی صحیح باشد. جواب موجه ابتدایی حاصل شده است. در غیر این صورت به گام ۲ می‌رود؛
۲. اولین فعالیت در بین فعالیت‌های بررسی‌نشده را در نظر می‌گیرد؛ درصورتی‌که تمامی پیش‌نیازی‌های آن انجام گرفته باشد به گام ۴ و در غیر این صورت به گام ۳ می‌رود؛
۳. فعالیتی را که پیش‌نیاز آن انجام نگرفته رها می‌کند و به گام ۲ باز می‌گردد. از بین دیگر فعالیت‌های بررسی‌نشدهٔ موجود، فعالیت بعدی را انتخاب می‌کند؛
۴. فعالیت بررسی‌شده در گام ۲ را از فهرست فعالیت‌های قابل بررسی حذف می‌کند و به فهرست فعالیت‌های بررسی‌شده انتقال می‌دهد. درصورتی‌که هنوز فعالیت بررسی‌نشده‌ای باقی مانده باشد به گام ۲ باز می‌گردد. در غیر این صورت فعالیت‌های ذخیره‌شده در فهرست فعالیت‌های بررسی‌شده را به‌ترتیب ذخیره شدن مرتب می‌کند و به‌عنوان جواب ابتدایی اصلاح‌شده یا جواب موجه نشان می‌دهد.

گام‌های الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده

الگوریتم رقابت استعماری در حالت پایه، ماهیتی پیوسته دارد که استفاده از آن را در مسائل گسسته دشوار می‌کند و محقق مجبور خواهد شد از کلیدهای تصادفی برای تبدیل اعداد گسسته به ماهیت پیوسته استفاده کند که این امر تا حد زیادی از کارایی الگوریتم رقابت استعماری خواهد کاست. در این تحقیق با اصلاح ماهیت الگوریتم رقابت استعماری گونه‌ای خاص از آن به‌منظور حل مسائل گسسته جایگشتی (همچون مسئلهٔ RCPSP) ایجاد شده است.

گام ۱. ارزش‌دهی آغازین[1]: در اولین گام باید چارچوب‌های اولیهٔ مسئله را ایجاد کرد. هر کشور، معادل جایگشت از ترتیب اجرای فعالیت‌های پروژه است. البته باید توجه داشت ازآنجاکه همهٔ این کشورهای اولیه، توسط الگوریتم تعیین جواب موجه ابتدایی به‌دست آمده‌اند، همگی از لحاظ محدودیت پیش‌نیازی موجه‌اند. با در نظر گرفتن قید محدودیت منابع، مقدار تابع هدف (زمان) هر یک از کشورها به‌دست می‌آید. بسته به نوع مسئله، درصد خاصی از بهترین کشورها به‌عنوان امپریالیست انتخاب می‌شوند؛ سپس به‌نسبت میزان تابع هدف هر یک از امپریالیست‌ها، بقیهٔ کشورها (مستعمره‌ها) بین آن‌ها تقسیم می‌شوند. به‌منظور تعیین نسبت هر امپراتوری، مقدار

1. Initialization

زیر برای هر امپراتوری به‌دست می‌آید. در پایان این گام، کشورهای امپریالیست و مستعمره‌های هر یک مشخص شده و هزینهٔ (زمان) مربوط به هر یک نیز با توجه به تابع هدف مسئله مشخص می‌شود.

$$C_n = \max_i\{c_i\} - c_n \qquad \text{رابطهٔ ۲)}$$

$$p_n = \left| C_n \Big/ \sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i \right|$$

$$N.C._n = round\{p_n . (N_{col})\}$$

گام ۲. سیاست همگون‌سازی[1]: حالت پیش‌فرض الگوریتم رقابت استعماری با توجه به اینکه دارای ماهیتی پیوسته است، در مسئلهٔ RCPSP که از نوع مسائل جایگشتی است صحیح نیست. از این رو ماهیت سیاست همگون سازی طی دو مرحله اصلاح شد.

مرحلهٔ نخست: انتخاب سری بهینه از دل امپریالیست (الگوی برتر ترتیب اجرای فعالیت‌ها) با شرط کمترین طول سری متناظر در رشتهٔ زمانی: ابتدا α درصد از دو طرف این رشته حذف می‌شود. ضریب آلفا میزان انحراف از سیاست همگون‌سازی است که تأثیر همگون‌سازی را متعادل می‌کند. سپس از رشتهٔ باقی‌مانده، تمام سری‌های عددی متوالی به طول β درصد طول رشتهٔ باقی استخراج می‌شود. β ضریب سیاست همگون‌سازی است و هرچه بیشتر باشد مشابهت مستعمره پس از اجرای سیاست همگون‌سازی به امپریالیست بیشتر خواهد بود. سپس معادل عددی هر یک از این سری‌های عددی در رشتهٔ زمانی نوشته می‌شود و مجموع آن‌ها به‌دست می‌آید. سری عددی که کمترین مقدار را دارد، رشتهٔ منتخب در الگوی برتر ترتیب اجرای فعالیت‌ها در نظر گرفته می‌شود.

مرحلهٔ دوم: جایگزینی سری بهینهٔ انتخابی از دل امپریالیست (الگوی برتر ترتیب اجرای فعالیت‌ها) در مستعمره (الگوی ضعیف‌تر ترتیب اجرای فعالیت‌ها): در این مرحله باید سری به‌دست‌آمده از گام قبل در الگوی ضعیف‌تر ترتیب اجرای فعالیت‌ها ایجاد شود. بدین صورت اولین عنصر سری بهینه در الگوی امپریالیست پیدا می‌شود، سپس عنصر معادل آن در الگوی مستعمره نیز در نظر گرفته می‌شود و از سوی دیگر نیز عدد متناظر آن نیز در الگوی مستعمره تعیین و سپس جای عنصر متناظر و عدد متناظر در الگوی مستعمره عوض می‌شود. این کار بر سایر عناصر سری بهینه الگوی امپریالیست انجام می‌گیرد تا الگوی مستعمرهٔ همگون‌شده با الگوی امپریالیست حاصل شود.

---

1. Assimilation

گام ۳. انقلاب[1]: با توجه به پیوسته بودن الگوریتم رقابت استعماری در حالت پیش‌فرض نمی‌توان از عملگرها معمول انقلاب استفاده کرد. ازاین‌رو بروز انقلاب در الگوریتم رقابت استعماری اصلاح شده است. ازآنجاکه در شرایط واقعی احتمال بروز انقلاب کمتر از ۱ است، تنها برای درصدی از مستعمره‌های هر امپریالیست عملگرهای انقلاب اجرا می‌شود. این درصد توسط نرخ بروز انقلاب[2] تعیین می‌شود. مثلاً Revolution Rate = ۰/۲ بدین معناست که به‌طور تصادفی در بین ۲۰ درصد از مستعمره‌های امپریالیست‌ها انقلاب بروز می‌کند. برای اجرای انقلاب بین مستعمره‌ها ابتدا با توجه به نرخ بروز انقلاب درصدی از مستعمره‌های هر امپریالیست انتخاب شده و سپس به‌طور تصادفی یکی از سه عملگر زیر برای آن اجرا می‌شود.

- عملگر تعویض: این عملگر دو عضو از جایگشت را به‌صورت تصادفی انتخاب کرده و سپس جای این دو را با هم عوض می‌کند.
- عملگر معکوس‌سازی: این عملگر دو عضو از جایگشت را به‌صورت تصادفی انتخاب کرده و سپس ترتیب تمامی اعداد بین آن‌ها را معکوس می‌کند.
- عملگر حذف و انتقال: این عملگر دو عضو از جایگشت را به‌صورت تصادفی برمی‌گزیند و سپس بسته به اینکه کدام یک اول باشد و کدام دوم، عدد اول را به قبل از عدد دوم انتقال می‌دهد.

گام ٤. تعویض جای مستعمره با امپریالیست[3]: پس از اعمال سیاست جذب و انقلاب ممکن است به دلیل جابه‌جایی‌های صورت‌گرفته وضعیت یک مستعمره در یک امپراتوری بهتر از خود امپریالیست شود. در این حالت جای مستعمره با امپریالیست عوض می‌شود.

گام ۵. محاسبهٔ هزینهٔ کل هر امپراتوری[4]: پس از اعمال سیاست جذب و انقلاب و تعویض، اقدام به محاسبهٔ هزینهٔ کل هر امپراتوری با استفاده از فرمول زیر می‌شود.

$$T.C._n = Cost(imperialist_n) + \xi mean\{Cost(colonies\ of\ empire_n)\} \quad \text{رابطهٔ ۳)}$$

که در آن $T.C._n$ هزینهٔ کل امپراتوری nام و ξ عددی مثبت است که به‌طور معمول بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. کوچک در نظر گرفتن ξ، سبب می‌شود که هزینهٔ

1. Revolution
2. Revolution Rate
3. Exchange
4. Compute Total Cost

کل یک امپراتوری، تقریباً برابر با هزینهٔ حکومت مرکزی آن (کشور امپریالیست) شود و افـزایش ξ نیز موجب افزایش تأثیر میزان هزینـهٔ مسـتعمرات یـک امپراتـوری در تعیـین هزینـهٔ کـل آن می‌شود.

گام ٦. رقابت استعماری[1]: هر امپراتوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به‌تدریج حذف می‌شود و به مرور زمان، امپراتوری‌های ضعیف، مستعمرات خود را از دست می‌دهند و امپراتوری‌های قوی‌تر، این مستعمرات را تصاحب می‌کنند و بـر قـدرت خـویش می‌افزایند. برای مدل‌سازی رقابت میان امپراتوری‌ها بـرای تصـاحب مسـتعمرات، ابتـدا احتمـال تصاحب هر امپراتوری (که متناسب با قدرت آن امپراتوری است)، با در نظـر گـرفتن هزینـهٔ کـل امپراتوری محاسبه می‌شود بدین منظور ابتدا از روی هزینهٔ کل امپراتوری، هزینهٔ کل نرمالیزه‌شدهٔ آن تعیین می‌شود.

رابطهٔ ۴) $$N.T.C._n = m_i ax\{T.C._i\} - T.C._n$$

در این رابطه $T.C._n$، هزینهٔ کل امپراتوری nام و $N.T.C._n$ نیز، هزینهٔ کل نرمالیزه‌شدهٔ آن امپراتوری است. هر امپراتوری که $T.C._n$ کمتری داشته باشد $N.T.C._n$ بیشتری خواهد داشت. در حقیقت $T.C._n$ معادل هزینهٔ کل یک امپراتوری و $N.T.C._n$ معادل قدرت کل آن می‌باشـد. امپراتوری با کمترین هزینه، دارای بیشترین قدرت است. بـا داشـتن هزینـهٔ کـل نرمـالیزه‌شـده، احتمال (قدرت) تصاحب مستعمرهٔ مورد رقابت، توسط هـر امپراتـوری، بـه‌صـورت زیـر محاسـبه می‌شود:

رابطهٔ ۵) $$P_{Pn} = \left| N.T.C._n \Big/ \sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C._i \right|$$

با داشتن احتمال تصاحب هر امپراتوری، برای اینکه مستعمرات مذکور بـه‌صـورت تصـادفی، ولی با احتمال وابسته به احتمال تصاحب هر امپراتوری، بین امپراتوری‌ها تقسیم شود، بـردار P از روی مقادیر احتمال یادشده، به‌صورت زیر تشکیل می‌شود.

رابطهٔ ۶) $$P = \left[P_{p_1}, P_{p_2}, P_3, \dots, P_{p_{N_{imp}}}\right]$$

1. Imperialistic Competition

بردار P دارای سایز Nimp*1 است و از مقادیر احتمال تصاحب امپراتوری‌ها تشکیل شده است. سپس بردار تصادفی R، هم‌اندازه با بردار P تشکیل می‌شود. آرایه‌های این بردار، اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۰ ,۱] هستند.

رابطهٔ ۷)
$$R = \left[r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}}\right]$$
$$r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}} \in U(.,1)$$

سپس بردار D به‌صورت زیر تشکیل می‌شود.

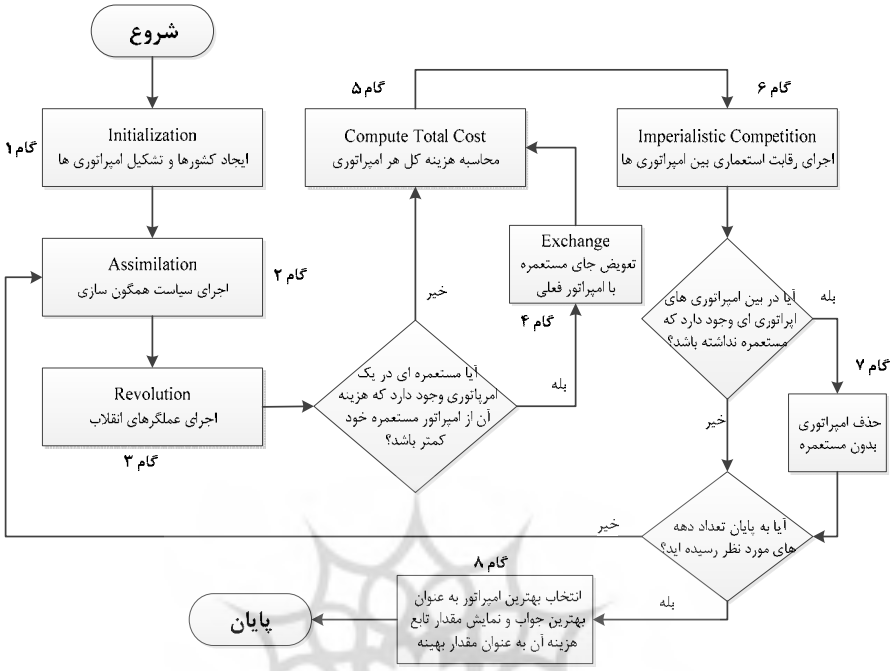
رابطهٔ ۸)
$$D = P - R = \left[D_1, D_2, D_3, \dots, D_{N_{imp}}\right]$$
$$= \left[P_{p_1} - r_1, P_{p_2} - r_2, P_{p_2} - r_3, \dots, P_{p_{N_{imp}}} - r_{N_{imp}}\right]$$

با داشتن بردار D، مستعمرات مذکور به امپراتوری‌ای داده می‌شود که اندیس مربوط به آن در بردار D بزرگ‌تر از بقیه است.

گام ۷. حذف امپریالیست بدون مستعمره: همان‌گونه‌که بیان شد، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، خواه‌ناخواه، امپراتوری‌های ضعیف به‌تدریج سقوط می‌کنند و مستعمراتشان به‌دست امپراتوری‌های قوی‌تر می‌افتد. در الگوریتم پیشنهادشده، یک امپراتوری زمانی حذف‌شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد.

گام ۸. استخراج نتایج: برای پایان یافتن الگوریتم می‌توان شروط متفاوتی را لحاظ کرد. در الگوریتم رقابت استعماری در حالت پایه شرط توقف الگوریتم، حذف همهٔ امپریالیست‌ها و باقی ماندن تنها یک امپریالیست است. در حالت اصلاح‌شدهٔ الگوریتم، علاوه‌بر اعمال این شرط توقف، شرط دیگر این است که تکرارهای الگوریتم (تعیین تعداد دهه‌های تکرار الگوریتم) به تعداد خاصی برسد.

در پایان الگوریتم دو جواب استخراج‌شدنی از الگوریتم برای مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع عبارت است از: تعیین بهترین الگو برای ترتیب اجرای فعالیت‌های پروژه با در نظر گرفتن محدودیت‌های پیش‌نیازی و محدودیت‌های منابع. این الگو همان الگوی منتسب به تنها امپریالیست باقی‌مانده در حالت شرط خاتمهٔ پیش‌فرض الگوریتم است و زمان تکمیل حاصل از این الگو به‌عنوان مقدار بهینه تابع هدف است. در حالتی که شرط خاتمهٔ الگوریتم تعداد تکرار انجام‌گرفته باشد، از بین همهٔ الگوهای منتسب به تمام امپریالیست‌های باقی‌مانده، الگویی که کمترین هزینه (کمترین زمان تکمیل پروژه) را دارد به‌عنوان الگوی بهینه انتخاب می‌شود. و همچنین زمان تکمیل حاصل از این الگو به‌عنوان مقدار بهینه تابع هدف است.



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده

یافته‌های پژوهش

نتایج مدل تحقیق در اجرای داده‌های استاندارد

مدل ارائه‌شده در این تحقیق بر روی ۸۰ نمونه از مسائل استاندارد زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع که در کتابخانهٔ الکترونیک PSPLIB (هر یک از پروژه‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ فعالیت ۲۰ نمونه) موجود است اجرا شد. براساس نتایج تجزیه‌وتحلیل داده‌های استاندارد مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع در حالت تک‌حالته نتایج در مدل‌های استاندارد با ۳۰ فعالیت، میانگین میزان انحراف از جواب بهینه به‌دست‌آمده از روش‌های دقیق با تعداد زمان‌بندی تولید شدهٔ ۱۰۰۰، ۰/۲۶ و با تعداد زمان‌بندی تولیدشدهٔ ۵۰۰۰ ، ۰/۲۱ است. در مدل‌های استاندارد با ۶۰ فعالیت، میانگین میزان انحراف از جواب بهینهٔ به‌دست‌آمده از روش‌های دقیق با تعداد زمان‌بندی تولیدشده ۱۰۰۰، ۱۱/۸۰ و با تعداد زمان‌بندی تولیدشدهٔ ۵۰۰۰ ، ۱۱/۱۰ است. در مدل‌های استاندارد با ۹۰ فعالیت، میانگین میزان انحراف از جواب به‌دست‌آمده از مسیر بحرانی کران پایین با تعداد زمان‌بندی تولیدشدهٔ ۱۰۰۰، ۱۰/۸۵ و با تعداد زمان‌بندی تولیدشدهٔ ۵۰۰۰، ۱۰/۴۰ است. در مدل‌های استاندارد با ۱۲۰ فعالیت، میانگین میزان انحراف از جواب به‌دست‌آمده از مسیر

بحرانی کران پایین با تعداد زمان‌بندی تولیدشدهٔ ۱۰۰۰، ۳۳/۱۰ و با تعداد زمان‌بندی تولیدشدهٔ ۵۰۰۰، ۳۱/۷۰ است.

به‌منظور سنجش پایداری نتایج الگوریتم ارائه‌شده، در هر نمونه ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ فعالیت، ۲۰ بار اجرا شد و زمان تکمیل پروژه به‌دست آمد. برای اثبات پایداری باید میزان انحراف معیار نتایج به‌دست‌آمده هم‌گرا به صفر باشد. واریانس نتایج حاصل از الگوریتم برای این نمونه به‌ترتیب ۰/۰۴۷، ۰/۰۵۱ ، ۰/۰۸۵ و ۰/۱۱۶ است. این اعداد پایداری قابل قبول نتایج به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد.

به‌منظور مقایسهٔ الگوریتم پیشنهادی تحقیق با نتایج دیگر تحقیقات موجود در کتابخانهٔ PSPLIB، نتایج به‌دست‌آمده در جدول‌های پیشین در مقایسه با نتایج سایر تحقیقات آورده شده است. نتایج این مقایسه‌ها با توجه به شاخص میانگین انحراف از جواب بهینه در پروژه‌های ۳۰ و ۶۰ فعالیتی و میانگین انحراف از مسیر بحرانی کران پایین در پروژه‌های ۹۰ و ۱۲۰ فعالیتی به قرار جدول‌های زیر است.

جدول ۷. میانگین انحراف از جواب بهینه برای مجموعهٔ ۳۰ فعالیتی

الگوریتم مورد استفاده	مرجع	حداکثر تعداد زمان‌بندی‌های تولیدشده	
		۱۰۰۰	۵۰۰۰
GA,TS-path relinking	کوچتوف و استولیار (۲۰۰۳)	۰/۰۱	۰/۰۴
Bees algorithm	صادقی و دیگران (۱۳۸۹)	۰/۱۷	۰/۱۱
DICA	این تحقیق	۰/۲۶	۰/۱۲
PSO	کموئه، سیلورین و آلین (۲۰۰۷)	۰/۲۶	۰/۲۱
electronmagnetism Scatter Search	دبلز، دیریک، لیوس و ونهوک (۲۰۰۶)	۰/۲۷	۰/۱۱
GA-hybrid	والس، بالستین و کوینتانیا (۲۰۰۳)	۰/۲۷	۰/۰۶
Ant colony optimization	مرکل، میدندورف و شِمِک (۲۰۰۲)	۰/۳۱	۰/۰۹
GA	والس، بالستین و کوینتانیا (۲۰۰۵)	۰/۳۴	۰/۰۲
GA	آلکاراز، ماروتو و رویز (۲۰۰۴)	۰/۳۵	۰/۰۶
GA	هارتمن (۲۰۰۲)	۰/۳۸	۰/۲۲
Tabu Search	نونوبه و ایباراکی (۲۰۰۲)	۰/۴۶	۰/۱۶
GA	هارتمن (۱۹۹۸)	۰/۵۴	۰/۲۵
Sampling-adaptative	شیرمر و رایزنبرگ (۱۹۹۸)	۰/۶۵	۰/۴۴

جدول ۸. میانگین انحراف از جواب بهینه برای مجموعهٔ ٦۰ فعالیته

الگوریتم مورد استفاده	مرجع	حداکثر تعداد زمان‌بندی‌های تولید شده	
		۱۰۰۰	۵۰۰۰
PSO	کموئه، سیلورین و آلین (۲۰۰۷)	۹/۵۲	۹/۰۱
GA,TS-path relinking	کوچتوف و استولیار (۲۰۰۳)	۱۱/۷۱	۱۱/۷۱
Scatter Search electronmagnetism	دبلز، دیریک، لیوس و ونهوک (۲۰۰۶)	۱۱/۷۳	۱۱/۱۰
DICA	این تحقیق	۱۱/۸۰	۱۱/۱۰
Ant colony optimization	مرکل، میدندورف و شِمِک (۲۰۰۲)	۱۱/۹۳	۱۱/۲۵
Bees algorithm	صادقی و دیگران (۱۳۸۹)	۱۱/۲۰	۱۱/۸۰
GA	آلکاراز، ماروتو و رویز (۲۰۰۴)	۱۲/۲۱	۱۱/۲۷
GA	هارتمن (۲۰۰۲)	۱۲/۲۱	۱۱/۷۰
GA	هارتمن (۱۹۹۸)	۱۲/۶۸	۱۱/۸۹
TS-activity list	نونوبه و ایباراکی (۲۰۰۲)	۱۲/۹۷	۱۲/۱۸
Sampling-adaptative	کولیش و درکسل (۱۹۹۶)	۱۳/۵۱	۱۳/۰۶
GA-problem space	لیون و رامامورتی (۱۹۹۵)	۱۴/۳۳	۱۳/۴۹

جدول ۹. میانگین انحراف از مسیر بحرانی کران پایین برای مجموعهٔ ۹۰ فعالیتی

الگوریتم مورد استفاده	مرجع	حداکثر تعداد زمان‌بندی‌های تولید شده	
		۱۰۰۰	۵۰۰۰
PSO	کموئه، سیلورین و آلین (۲۰۰۷)	۱۰/۳۴	۱۰/۱۰
GA,TS-path relinking	کوچتوف و استولیار (۲۰۰۳)	۱۰/۴۷	۱۰/۲۱
DICA	این تحقیق	۱۰/۸۵	۱۰/۴۰
Tabu Search	نونوبه و ایباراکی (۲۰۰۲)	۱۰/۸۷	۱۰/۵۴
Scatter Search electronmagnetism	دبلز، دیریک، لیوس و ونهوک (۲۰۰۶)	۱۰/۹۱	۱۰/۷۰
Ant colony optimization	مرکل، میدندورف و شِمِک (۲۰۰۲)	۱۱/۰۳	۱۰/۸۰
GA-hybrid	والس، بالستین و کوینتانیا (۲۰۰۳)	۱۱/۱۳	۱۰/۸۹
GA	هارتمن (۲۰۰۲)	۱۱/۲۹	۱۱/۰۲

جدول ۱۰. میانگین انحراف از مسیر بحرانی کران پایین برای مجموعهٔ ۱۲۰ فعالیته

الگوریتم مورد استفاده	مرجع	حداکثر تعداد زمان‌بندی‌های تولیدشده	
		۱۰۰۰	۵۰۰۰
PSO	کموئه، سیلورین و آلین (۲۰۰۷)	۳۲/۳۷	۳۱/۹۲
DICA	این تحقیق	۳۳/۱۰	۳۱/۷۰
GA,TS-path relinking	کوچتوف و استولیار (۲۰۰۳)	۳۳/۴۷	۳۲/۱۷
Tabu Search	نونوبه و ایباراکی (۲۰۰۲)	۳۴/۵۶	۳۳/۳۱
Ant colony optimization	مرکل، میدندورف و شِمِک (۲۰۰۲)	۳۵/۶۸	۳۴/۲۰
Scatter Search electronmagnetism	دبلز، دیریک، لیوس و ونهوک (۲۰۰۶)	۳۶/۰۹	۳۵/۴۰
GA	هارتمن (۲۰۰۲)	۳۶/۵۹	۳۵/۱۰
GA-hybrid	والس، بالستین و کوینتانیا (۲۰۰۳)	۳۸/۳۱	۳۷/۸۱

نتایج تجزیه‌وتحلیل داده‌های استاندارد با الگوریتم این تحقیق به نسبت سایر روش‌های مورد مقایسه کارایی خوبی دارد. همچنین با بررسی دقیق‌تر نتایج مشخص می‌شود که کارایی الگوریتم با افزایش تعداد فعالیت، نسبت به سایر روش‌ها بهتر می‌شود. بخش‌بندی پویای راه‌حل‌ها و سعی در نگهداری جواب‌های بهینه از یک دهه به دههٔ بعدی در هر امپراتوری موجب شده تا الگوریتم نتایج خوبی را به نسبت سایر روش‌ها داشته باشد.

شاخص‌های دیگری که اغلب برای مقایسهٔ روش‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شوند، سرعت رسیدن به جواب و تعداد تکرارها برای رسیدن به جواب است. روش پیشنهادی این مقاله با توجه به دو مرحله‌ای بودن و حذف همهٔ جواب‌های غیرموجه در مرحلهٔ اول، به نسبت سایر روش‌ها با سرعت بیشتر و تکرارهای کمتر به جواب می‌رسد.

نتایج مدل تحقیق در اجرای پروژه‌های واقعی

در این بخش از تحقیق اطلاعات دو پروژهٔ واقعی تجزیه‌وتحلیل شد. با توجه به گستردگی فعالیت‌ها این پروژه‌ها (۵۸۳۵ فعالیت برای پروژه تأمین تدارکات پتروشیمی کرمانشاه و ۱۰۶۵۲ فعالیت برای پروژهٔ راه‌اندازی Utility پتروشیمی کرمانشاه)، عملکرد مدل ارائه‌شده در این مقاله به‌خوبی بررسی می‌شود.

پروژهٔ تدارکات پتروشیمی کرمانشاه و پروژهٔ راه‌اندازی Utility پتروشیمی کرمانشاه براساس زمان‌بندی ابتدایی صورت‌گرفته توسط پیمانکار و بدون احتساب محدودیت‌های منابع، به‌ترتیب

۴۸۳ و ۵۱۲ روز کاری برای تکمیل نیاز داشته است. البته زمان اتمام کامل این پروژه‌ها بسیار بیش از این زمان و به‌ترتیب ۷۴۴ و ۸۸۴ روز کاری بوده است. دلیل اصلی تفاوت بسیار در زمان تکمیل بودجه‌شده و زمان تکمیل واقعی در پروژهٔ یادشده، بی‌توجهی به محدودیت منابع در دسترس، تحریم‌های اقتصادی و کمبود قطعات و اعتبارات و ... بوده است.

برای بررسی کارایی مدل تحقیق، ابتدا زمان‌بندی بودجه‌شدهٔ موجود در دور پروژهٔ فوق با فرض دخیل کردن محدودیت منابع ذکرشده در قالب نرم‌افزار MS-Project 2010 قرار داده شد و زمان به‌دست‌آمده در پروژهٔ تدارکات پتروشیمی کرمانشاه از ۴۸۳ روز به ۶۱۷ روز و زمان پروژهٔ راه‌اندازی Utility پتروشیمی کرمانشاه از ۵۱۲ روز به ۵۹۱ روز افزایش یافت. البته این امر با توجه به دخیل کردن منابع منطقی است. پس از مدل کردن مسئلهٔ یادشده در چارچوب مسئلهٔ RCPSP و حل آن توسط مدل تحقیق، زمان تکمیل بودجه‌شدهٔ پروژه تدارکات پتروشیمی کرمانشاه با ۱۳ درصد کاهش به ۵۳۶ روز، و زمان تکمیل پروژهٔ راه‌اندازی Utility پتروشیمی کرمانشاه با ۱۰ درصد کاهش به ۵۳۲ روز رسید. این کاهش ۱۳ و ۱۰ درصدی، نشان از کارایی خوب مدل تحقیق در زمان‌بندی پروژه‌های واقعی دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق برای حل مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع، مدلی جدید در دو مرحله ارائه شد. در مرحلهٔ اول روشی پیشنهاد شد که طی آن جواب‌های تصادفی و غیرموجه اولیه به جواب‌های موجه تبدیل می‌شود. استفاده از این روش کارایی کل الگوریتم را برای رسیدن به جواب بهینه بسیار بیشتر می‌کند، زیرا ورودی‌های بخش دوم مدل را محدود به جواب‌های موجه می‌کند و در نتیجه، سرعت الگوریتم برای رسیدن به جواب افزایش می‌یابد. در گام دوم مدل پیشنهادی، از الگوریتم رقابت استعماری اصلاح‌شده استفاده شد. روش پیشنهادی این مقاله با توجه به دو مرحله‌ای بودن و حذف همهٔ جواب‌های غیرموجه در مرحلهٔ اول، به نسبت سایر روش‌ها با سرعت بیشتر و تکرارهای کمتر به جواب می‌رسد. ازآنجاکه الگوریتم مذکور از دستهٔ الگوریتم‌های فراابتکاری پیوسته بوده و مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع از نوع مسائل گسسته جایگشتی است، در این تحقیق ضمن تغییر و اصلاح دو گام اصلی الگوریتم رقابت استعماری، نوع خاصی از این الگوریتم که برای حل مسائل جایگشتی مناسب است، ارائه شد.

نتایج حاصل از مدل تحقیق در تجزیه‌وتحلیل داده‌های استاندارد کتابخانه PSPLIB در مدل‌های استاندارد با ۳۰ فعالیت، ۶۰ فعالیت، ۹۰ فعالیت و ۱۲۰ فعالیت، میانگین میزان انحراف از جواب بهینه برای پروژه‌های ۳۰ و ۶۰ فعالیتی و میانگین میزان انحراف از جواب مسیر بحرانی

کران پایین برای پروژه‌های ۹۰ و ۱۲۰ فعالیتی به‌دست آمد. عملکرد الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم بررسی‌شده، قابل قبول بوده است.

براساس نتایج تجزیه و اطلاعات پروژهٔ تدارکات پتروشیمی کرمانشاه و پروژهٔ راه‌اندازی Utility پتروشیمی کرمانشاه که توسط شرکت قدس نیرو انجام گرفت، الگوریتم پیشنهادی ۱۳ درصد بهبود در زمان تکمیل بودجه‌شدهٔ پروژهٔ تدارکات پتروشیمی کرمانشاه و ۱۰ درصد بهبود در زمان تکمیل بودجه‌شدهٔ پروژهٔ راه‌اندازی Utility پتروشیمی کرمانشاه ایجاد کرد.

از جمله محدودیت‌های تحقیق، نبود اطلاعات کامل منابع و گاه زمان‌بندی در پروژه‌های واقعی و نیز محرمانه بودن شدید اطلاعات کامل پروژه‌ها بود. به‌منظور استفاده در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود انواع مدل ارائه‌شده در انواع دیگر مسئلهٔ زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (ذکرشده در جدول ۱) آزمون شود. همچنین استفاده از روش‌های کارامد جست‌وجوی محلی (الگوریتم ژنتیک، الگوریتم مورچگان، الگوریتم جست‌وجوی ممنوع، الگوریتم PSO و ...)، به‌منظور ترکیب با الگوریتم ارائه‌شده و نیز تعیین سازوکارهای یادگیری ترکیبی (انواع مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی) در الگوریتم ارائه‌شده می‌تواند مفید باشد.

References

Agarwal, A, Colak, S, Erenguc, S. (2011). A Neurogenetic approach for the resource-constrained project scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 38(1): 44–50.

Alamtabriz, A; Zandiye, M., Mohammadrahimi, A.R (2011). *Meta-heuristic algorithms in combinatorial optimization, neural networks, simulated annealing, genetic algorithms, eta.* Tehran, Safar- eshraghi press, second edition. (*in Persian*)

Alcaraz, J., Maroto, C. & Ruiz, R. (2004). Improving the performance of genetic algorithms for the RCPS problem. *Proceedings of the Ninth International Workshop on Project Management and Scheduling*, 40-43.

Alvarez, V.R. & Tamarit, J. M. (1993). The project scheduling polyhedron: Dimension, facets and lifting theorems. *European Journal of Operational Research*, 67(2): 204-220.

Ardalan, Z., Karimi, S, Poursabzi, O, Naderi, B. (2015). A novel imperialist competitive algorithm for generalized traveling salesman problems. *Applied Soft Computing*. 26, 546–555.

Artigues, Ch, Demassey, S, Néron, Em (2008). *Resource-constrained project scheduling: models, algorithms, extensions and applications.* ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.

Atashpaz gargari, I (2008). *Development of Social optimization algorithm and evaluate the effectiveness of this algorithm.* MS Thesis, Tehran, University of Tehran. (*in Persian*)

Bagher, M., Zandieh, M., Farsijani, H. (2010). Balancing of stochastic U-type assembly lines: an imperialist competitive algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(1-4): 271-285.

Bartschi, W.M. (1996) .A Genetic Algorithm for Resource-Constrained Scheduling. *Submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering at the Massachusetts Institute of Technology*, June.

Behnamian, J., Zandieh, M. (2011). A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties. *Expert Systems with Applications*, 38(12): 14490–14498.

Blazewicz, J, Lenstra, J.K. & Kan, A.R (2005). Scheduling Subject to Resource Constraints: Classification and complexity. *Discrete Applied Mathematic*, 5(1): 11-24.

Blazewicz, J., Lenstra, J. & Kan, A. R. (1983). Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 5(1): 11–24.

Bocewicz, G, Banaszak, Z.A. & Muszynski, W. (2009). Decision Support Tool for Resource Allocation Subject to Imprecise Data Constraints. Control and Automation. *IEEE International Conference*.

Bouleimen, K. & Lecocq, H. (2003). A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode versions. *European Journal of Operational Research*, 149(2): 268–281.

Brucker, P., Drexl, A., Mohring, R., Neumann, K. & Pesch, E. (1999). Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research*, 112(1): 3-41.

Brucker, P, Knust, S, Schoo, A, Thiele, O (1998). A branch and bound algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 107, 272-288.

Buddhakulsomsiri, J, Kim, D. S. (2006). Priority rule-based heuristic for multi-mode resource-constrained project scheduling problems with resource vacations and activity splitting. *European Journal of Operational Research*, 178(2): 374-390.

Cervantes, M., Lova, A., Tormos, P. & Barber, F. (2008). A Dynamic Population Steady-State Genetic Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *21st international conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems: New Frontiers in Applied Artificial Intelligence*, 611 – 620.

Chaharsooghi, S.K. &Meimand Kermani, A.H. (2007). An effective ant colony optimization algorithm (ACO) for multi-objective resource allocation problem (MORAP). *Applied Mathematics and Computation*, 200,167–177.

Chen, P.H and Shahandashti, S.M (2008). Hybrid of genetic algorithm and simulated annealing for multiple project scheduling with multiple resource constraints. *Automation in Construction*. 18, 434–443.

Chen, R.M (2011). Particle swarm optimization with justification and designed mechanisms for resource-constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications*. 38, 7102-7111.

Chen, Y.L, Hsu, P.Y, Chang, Y.B (2008). A Petri Net Approach to Support Resource Assignment in Project Management. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on.*

Damghani, K., Tavakoli Moghadam, R. & Shahalizadeh, M. (2011). Solving Project Scheduling with resources constrains using modified ant colony algorithm. *Journal of Industrial Engineering*, 45, 59-69. (*in Persian*)

Debels, D., De Reyck, B., Leus, R. and Vanhoucke, M. (2006). A hybrid scatter search electromagnetism meta-heuristic for project scheduling. *E European Journal of Operational Research*, 169, 638-653.

Fatemi Ghomi, S.M.T. & Ashjari, B. (2001). A simulation model for multi-projct resource allocation. *International Journal of Project Management*. 20, 127–130.

Gholipour, Y. & Shahbazi, M.M. (2011). Resource-Constrained Scheduling of Construction Projects Using the Harmony Search Algorithm. *Journal of Industrial Engineering*. Special Issue, 51-60.

Golenko Ginzburg, D, Gonik, A (1998). A heuristic for network project scheduling with random activity durations depending on the resource allocation. *International Journal of Production Economics*. 55,149–162.

Gorczyca, M, Janiak, A (2009). Resource level minimization in the discrete–continuous scheduling. *Eur. J.Oper. Res*. 203, 32–41.

Hartmann, S. & Briskorn, S. (2010). A survey of variants and extensions of the resource constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 207, 1-14.

Hartmann, S. (1998). A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling. *Naval Research Logistics*, 45(7): 733-750.

Hartmann, S. (2002). A self-adapting genetic algorithm for project scheduling under resource constraints. *Naval Research Logistics*, 49, 433-448.

Huang, C.Y, Lyu, M.R. (2005). Optimal Testing Resource Allocation and Sensitivity Analysis in Software Development. *Quantum Electronics, IEEE Journal*, 24(3): 507 – 511.

Jarboui, B., Damak, N., Damak, P. & Rebai, A. (2007). A combinatorial particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems. *Applied Mathematics and Computation*. 195, 299–308.

Kaplan, L. (1988). *Resource-constrained project scheduling with pre-emption of jobs*. Unpublished PhD Dissertation, Michigan, University of Michigan.

Katsavounis, S (2007). Scheduling Multiple Concurrent Projects Using Shared Resources with Allocation Costs and Technical Constraints. *Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 3rd International Conference on.*

Kemmoe T, Sylverin, M.G, Alain Q (2007). Solving Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Particle Swarm Optimization. *In: Proceeding of 3rd Multi-disciplinary Int. Scheduling Conference*, 251-258.

Kerzner, H (2009). *Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling*. 10edition, John Wiley & Sons, Inc.

Klein, R., A. Scholl. (1999). computing lower bound by destructive improvement: An application to resource-constrained project scheduling. *European Journal of Operational Research*, 112, 322–346.

Kochetov, Y., Stolyar, A. (2003). Evolutionary local search with variable neighborhood for the resource constrained project scheduling problem. *In: Proceeding of the 3rd International Workshop of Computer Science and Information Technologies*.

Kolisch, R. & Drexl, A. (1996). Adaptative search for solving hard project scheduling problems. *Naval Research Logistics*. 43(1): 23–43.

Kolisch R., Hartmann S. (1999). Heuristic Algorithms for Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis. Project scheduling: Recent models, algorithms and applications. *Kluwer, Amsterdam, the Netherlands*, 14, 147-178.

Krüger, D, Scholl, A. (2008). A heuristic solution framework for the resource constrained (multi-)project scheduling problem with sequence-dependent transfer times. *European Journal of Operational Research*, 197, 492–508.

Leon, V.J. & Ramamoorthy, B. (1995). Strength and adaptability of problem-space based neighborhoods for resource constrained scheduling. *Operations-Research-Spektrum*, 17(2): 173–82.

Liu, J., Wu, B. (2010). A Multi-agent System for the Flexible Resource Constrained Project Scheduling. *Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, Third International Conference on*.

Liu, Y, Zhao, S.L, Du, X.K, Li, S.Q (2005). Optimization of resource allocation in construction using genetic algorithms. *Machine Learning and Cybernetics, Inter. Conf. on.*

Lova, A., Maroto, C. & Tormos, P. (2000). A multicriteria heuristic method to improve resource allocation in multiproject scheduling. *European Journal of Operational Research*, 127, 408-424.

Lova, A., Tormos, P., Cervantes, M. & Barber, F. (2008). An efficient hybrid genetic algorithm for scheduling projects with resource constraints and multiple execution modes. *International Journal of Production Economics*, 117(2): 302-316.

Megiddot, N., Ichimor, T. (1985). A Two Resource Allocation Problem Solvable in Linear Time. *Mathematics of Operations Research*, 10(1): 7-16.

Mejía, G. and Montoya, C. (2008). Resource Assingment and Scheduling Using Petri Nets and Heuristic Search. *19th Inter. Conf. Prod. Res.*

Merkle, D., Middendorf, M. & Schmeck, H. (2002) .Ant Colony Optimization for Resource-Constrained Project Scheduling. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(4): 333 - 346.

Ming, Y., Yuan, L., Hai Shang, Y. (2007). Optimizing Resource Allocation in Manufacturing Project Based on Adaptive Ant Colony Algorithm. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, International Conference on*.

Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S. & Bianco, L. (1998). An exact algorithm for the multiple resource-constrained projects scheduling problem based on a new mathematical formulation. *Journal Management Science*, 44(5): 714–729.

Mobinia, M., Mobinib, Z., Rabbania, M. (2011). An Artificial Immune Algorithm for the project scheduling problem under resource constraints. *Applied Soft Computing*. 11, 1975-1982.

Montoya-Torres, J.R., Gutierrez-Franco, E. & Pirachicán-Mayorga, C. (2009). Project scheduling with limited resources using a genetic algorithm. *International Journal of Project Management*, 28(6): 619–628.

Nonobe, K. & Ibaraki, T. (2002). Formulation and tabu search algorithm for the resource constrained project scheduling problem (RCPSP). *In: Ribeiro, C.C., Hansen, P. (Eds.), Essays and Surveys in Metaheuristics, Kluwer Acad. Pub*. 557-588.

Peteghem, V.V., Vanhoucke, M. (2009). A genetic algorithm for the preemptive and non-preemptive multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 201, 409–418.

Pourkazemi, MH, Fatahi, M., Mazaheri, S. & Asadi, B. (2013). Portfolio optimization projects with interaction with the Imperialist competitive algorithm (ICA). *Journal of Industrial Management*, (5): 1-20. (*in Persian*)

Pritsker, A., Watters, L. & Wolfe, P. (1969). Multi-project scheduling with limited resources: A zero-one programming approach. *Management Science*. 16: 93–108.

Ranjbar, M.R., Kianfar, F. (2007). Solving the discrete time/resource trade-off problem in project scheduling with genetic algorithms. *Applied Mathematics and Computation*. 191(2), 451–456.

Reddy, J. P., Kumanan, S. & Chetty, O. V. K. (2001). Application of Petri Nets and a Genetic Algorithm to Multi-Mode Multi-Resource Constrained Project Scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(4): 305-314.

Rezaei, Z. (2009). *Providing efficient meta-heuristic algorithm for solving multi-level inventory control model*. MS Thesis, Tehran, Shahid Beheshti University. (*in Persian*)

Roozbeh Niaa, A., Hemmati Farb, M, Akhavan Niakic, S.T. (2015). A hybrid genetic and imperialist competitive algorithm for green vendor managed inventory of multi-item multi-constraint EOQ model under shortage. *Applied Soft Computing*, 30, 353–364.

Sadeghi, A., Safi, A. & Barzin Poor, F. (2010). Solving the project scheduling problem under resource constraints using meta-heuristic algorithm bees. *Sixth Inter. Conf. on Proj. Manag*. (*in Persian*)

Schirmer A. & Riesenberg, S. (1998). *Case-based reasoning and parameterized random sampling for project scheduling*. Technical Report. Germany, University of Kiel.

Shokrane Pour, E (2009). *Scheduling two criteria two-stage workflow assembly system by using of meta-heuristic algorithm*. MS Thesis, Tehran, Shahid Beheshti University. (*in Persian*)

Talebi, A. (2010). *Selection and optimization portfolio using meta-heuristic methods and compare them with portfolio of experts and beginners in Tehran Stock Exchange*. MS Thesis, Semnan, Technical University of Shahrod. (*in Persian*)

Tormos, P. & Lova, A. (2001). A Competitive Heuristic Solution Technique for Resource-Constrained Project Scheduling. *Annals of Operations Research*. 102, 65-81.

Valls V., Ballestin F., Quintanilla S. (2003*). A hybrid genetic algorithm for the RCPSP*. Technical Report, Department of Statistics and Operations Research, Spain, University of Valencia.

Valls, V., Ballestin, F. & Quintanilla, S. (2005). Justification and RCPSP: a technique that pays. *European Journal of Operational Research*, 165(2): 375–386.

Wang, Y, Perkins, J. R., Khurana, A (2002). Optimal resource allocation in new product development projects: a control-theoretic approach. Automatic Control. *IEEE Transactions on*. 47(8), 1267-1276.

Whitehouse, G. E., DePuy, G.W., Moraga Reinaldo, J. (2009). Meta-Raps approach for solving the resource allocation problem. *Automation Congress, Proceedings of the 5th Biannual World*.

Yousefli, A, Ghazanfari, M, Shahanaghi, K, Heydari, M (2008). A New Heuristic Model for Fully Fuzzy Project Scheduling. *Journal of Uncertain Systems*. 2(1), 75-80.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی