پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۱، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵

ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه برای مسئله زمان‌بندی پروژه تحت شرایط محدودیت منابع و حل آن با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری کرم شب‌تاب و تبرید شبیه‌سازی شده

سعید غفوری[۱*]، محمدرضا تقی‌زاده یزدی[۲]

۱- کارشناسی ارشد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۶ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۰۱

چکیده

زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن محدودیت منابع از جمله مسائل با ادبیات غنی در حوزه تحقیق در عملیات و مدیریت پروژه است. تاکنون مقالات و کتب بسیاری در این زمینه به چاپ رسیده است که دو دلیل عمده بر این امر می‌توان برشمرد: نخست آنکه این مسائل بسیار متنوع هستند و دیگر اینکه با توجه به NP-Hard بودن این مسائل، محققان همواره به دنبال راه‌حل‌های کاراتر برای حل این مسائل بوده‌اند. این پژوهش به منظور ارائه مدلی چند هدفه با در نظر داشتن انواع روابط پیش‌نیازی و همچنین سنجش کارایی الگوریتم کرم شب‌تاب در حل مسائل RCPSP انجام شده است. از این رو نخست یک مدل ریاضی دو هدفه شامل زمان و هزینه با در نظر گرفتن روابط پیش‌نیازی کلی برای زمان‌بندی پروژه‌های استاندارد با محدودیت منابع ارائه شده است و سپس با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب ترکیب شده با یک الگوریتم ابتکاری جواب‌های پاره تو برای مسئله در نرم‌افزار متلب نسخه R2014a به دست آمده است، همچنین برای سنجش کارایی الگوریتم کرم شب‌تاب، مسئله با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده نیز حل شد که نتایج به دست آمده نشان از عملکرد مطلوب الگوریتم کرم شب‌تاب و عملکرد قابل قبول

* نویسنده مسئول مقاله: E-mail: SaeedGhafoori@ut.ac.ir

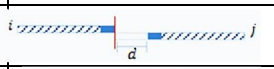
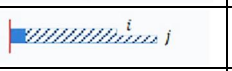
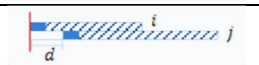
تبرید شبیه‌سازی شده در حل مسئله ذکر شده در مقایسه با بهترین جواب‌های موجود برای مسائل استاندارد تاکنون می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی پروژه، محدودیت منابع، الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم کرم شب‌تاب چندهدفه، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده چندهدفه.

۱- مقدمه

زمان‌بندی پروژه یکی از وظایف و فعالیت‌های اصلی در مدیریت پروژه است. وجود محدودیت منابع و همچنین روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها، مسئله زمان‌بندی پروژه را امری دشوار می‌سازد. مسئله زمان‌بندی پروژه در شرایط محدودیت منابع در واقع کلی‌ترین مسئله زمان‌بندی به حساب می‌آید. مسائل زمان‌بندی کارگاهی[۱]، جریان کارگاهی[۲] و سایر مسائل زمان‌بندی همگی زیرمجموعه‌هایی از این مسئله به حساب می‌آیند [۱، ص۲۱۲]. مسئله زمان‌بندی پروژه در شرایط محدودیت منابع عبارت است از زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه با توجه به روابط پیش‌نیازی و محدودیت منابع. این مسئله شامل یک پروژه با J فعالیت است که به صورت $J=1,\ldots,j$ نمایش داده می‌شوند. زمان انجام هر فعالیت J با D_j نمایش داده می‌شود. هر فعالیت فقط یک بار می‌تواند شروع شود و فعالیت می‌تواند قابل انقطاع[۳] باشد یا نباشد. به علت نیازهای فنی، یک مجموعه روابط پیش‌نیازی[۴] بین فعالیت‌ها وجود دارد که به شکل مجموعه‌ای از روابط به صورت P_j نمایش داده می‌شود و نشان می‌دهد که فعالیت J امکان شروع شدن ندارد مگر در حالتی که تمام روابط پیش‌نیازی و پیش‌نیازهای آن کامل شده باشد. روابط پیش‌نیازی می‌تواند با استفاده از شبکه‌های[۵] AON نمایش داده شود که این با فرض غیر مدور بودن شبکه نمایش داده می‌شود. روابط پیش‌نیازی براساس جدول ۱ می تواند چهار حالت کلی را داشته باشد.

جدول ۱ روابط پیش‌نیازی کلی (GPR) [۱، ص ۱۲۶]

روابط پیش‌نیازی	وقفه[۶] زمانی		
	صفر	مثبت	منفی
Finish to Start (FS)			
Start to Start (SS)			
Finish to Finish (FF)			
Start to Finish (SF)			

همچنین هر فعالیت یک مقدار مشخص از منابع را برای انجام و اجرا نیاز دارد [۲]. فعالیت J به r_{jk} واحد از منبع k در هر دوره‌ای که آن فعالیت در حال اجراست، نیاز دارد. دو فعالیت مجازی J=0 و J=J+1 که زمان آغاز و پایان پروژه را نشان می‌دهند، نیز در نظر گرفته می‌شود که زمان انجام این دو فعالیت صفر و بدون نیاز به منبع می‌باشند.

بیشتر مطالعات انجام شده در این حوزه دو هدف اصلی را دنبال کرده‌اند؛ دسته‌ای از مطالعات به توسعه مدل‌های ریاضی جدید در این زمینه پرداخته‌اند و دسته‌ای دیگر سعی در به‌کارگیری ابزارهای حل جدید و کارا برای این مسئله تلاش کرده‌اند. در این مطالعه سعی شد تا همزمان به هر دو جنبه توجه شود، نخست به دنبال ارائه مدل ریاضی جامعی خواهیم بود که علاوه بر در نظر گرفتن حالت‌های مختلف روابط پیش‌نیازی، همزمان بتواند دو هدف اصلی در هر پروژه، یعنی هزینه انجام و زمان تکمیل پروژه را کمینه کند و امکان برنامه‌ریزی فعالیت‌های دارای چندین حالت اجرا را نیز داشته باشد. از این رو مدل ریاضی ارائه شده در این مطالعه، یک مدل دو هدفه است و برای حل آن از مفهوم جواب پاره تو استفاده شده است و سپس به دنبال سنجش الگوریتم فراابتکاری جدیدی خواهیم بود که تاکنون در این مسئله مورد آزمون قرار نگرفته و در مسائل بهینه‌سازی دیگر جواب‌های قابل قبولی ارائه کرده است. در ادامه تعدادی از مطالعات صورت گرفته در این حوزه را مرور خواهیم کرد و پس از آن به فرموله کردن مدل ریاضی و حل آن خواهیم پرداخت.

۲- بررسی پیشینه پژوهش

از جمله مدل‌های معروفی که برای مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ارائه کرده است، می‌توان مدل پریتسکر و همکارانش در سال ۱۹۶۹ را نام برد که این مدل روابط پیش‌نیازی کلی را شامل نمی‌شود. مدل مذکور مبتنی بر برنامه‌ریزی صفر و یک بود و متغیر صفر و یک را به دو شکل زمان پایان یا زمان شروع در نظر می‌گرفت [۳]. دکرو و همکاران در سال ۱۹۹۱ با استفاده از یک الگوریتم تفکیک‌کننده اقدام به حل مسئله زمان‌بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع نمودند. استفاده از رویکرد بالا علاوه بر توانایی حل مسائل بزرگ امکان ایجاد یک سازوکار خاتمه دقیق را برای تصمیم گیرنده فراهم می‌کند [۴]. چیو و تسایی در سال ۲۰۰۲ با هدف در نظر گرفتن جریمه تأخیر و پاداش تکمیل زودهنگام برای مسئله زمان‌بندی چند پروژه ای در شرایط محدودیت منابع با جریان‌های نقدی تنزیل یافته یک الگوریتم ابتکاری کارا ارائه دادند. جریمه تأخیر و پاداش زودهنگام در تابع هدف لحاظ شد و اثربخشی الگوریتم ارائه شده با استفاده از ۴۲ مسئله کوچک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج گزارش شده حاکی از آن بود که الگوریتم پیشنهادی جواب‌هایی بسیار نزدیک به جواب بهینه ارائه کرده است [۵]. کیم، جن و یامازاکی در سال ۲۰۰۳ با ادغام یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی و کنترل کننده منطق فازی رویکرد جدیدی برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ارائه کردند. پس از نشان دادن برتری الگوریتم ژنتیک پیشنهادی بر بسیاری از الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده در ادبیات موضوع، تعدادی از عملگرهای ژنتیک مورد ارزیابی و نهایتاً در ساخت الگوریتم نهایی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج گزارش شده عملکرد مطلوب الگوریتم پیشنهادی را تأیید کردند [۶]. کومانان و همکاران در سال ۲۰۰۶ برای حل مسئله زمان‌بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع از یک الگوریتم ابتکاری و الگوریتم ژنتیک با هدف حداقل کردن زمان اتمام پروژه استفاده کردند. شیوه عمل الگوریتم ابتکاری پیشنهادی به این صورت بود که رشته‌های (زمان‌بندی‌های) تولید شده به‌وسیله الگوریتم ژنتیک ارائه شده نخست به‌وسیله الگوریتم مورد نظر ارزیابی می‌گردند، سپس در صورتی که رشته مورد نظر موجه نباشد پس از تبدیل به جوابی موجه مراحل باقیمانده را طی می کنند. به این ترتیب از ساخته شدن جواب‌های غیر موجه به‌وسیله الگوریتم پیشگیری می‌شود. در انتها روش پیشنهادی با مثال‌های عددی تست شد و نتایج قابل

قبولی به دست آمد [۷]. در سال ۲۰۰۶ تزنگ و چن یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی به نام ANGEL برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ارائه کردند. الگوریتم فوق از طریق ترکیب از بهینه‌سازی کلونی مورچگان، الگوریتم ژنتیک و جستجوی محلی ایجاد شد. کارایی این الگوریتم با تعدادی از مسائل استاندارد ارزیابی گردید و نتایج گزارش شده اثربخشی الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع را مورد تأیید قرار داد [۸]. گونچالوس و همکاران در سال ۲۰۰۷ برای حل مسئله زمان‌بندی چند پروژه‌ای با محدودیت منابع از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند و برای ایجاد زمان‌بندی‌های مختلف یک الگوریتم ابتکاری را مورد استفاده قرار دادند. عملکرد رویکرد مورد نظر با استفاده از چند مسئله که به طور تصادفی تولید شده بودند، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج گزارش شده اثربخشی رویکرد پیشنهادی را تأیید کردند [۹]. زیارتی، اکبری و ضیغمی در سال ۲۰۱۱ به بررسی عملکرد الگوریتم‌های زنبور عسل در حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع پرداختند. الگوریتم‌های زنبور عسل که شامل سه دسته هستند، مسئله بیان شده را با الهام از هوش جمعی زنبورهای عسل حل می‌کنند. تابع هدف مسئله به صورت کمینه کردن زمان اتمام پروژه تعریف شد و محدودیت‌ها نیز شامل محدودیت‌های مربوط به تقدم فعالیت‌ها و محدودیت‌های منابع بودند. به منظور کارایی بهتر در حل مسئله تغییراتی در الگوریتم‌های اولیه لحاظ شد. پس از حل تعدادی از مسائل استاندارد با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از دیگر الگوریتم‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که الگوریتم‌های پیشنهادی قادر به حل مسئله به صورت کارا می‌باشند [۱۰]. در سال ۲۰۱۱ شان شان وو و همکاران برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع یک الگوریتم سیستم ایمنی بهبود یافته مبتنی بر آشوب[۷] ارائه دادند. در انتها عملکرد الگوریتم ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفت و براساس نتایج گزارش شده مورد تأیید قرار گرفت [۱۱]. لینگ وانگ و چن فنگ در سال ۲۰۱۲ با استفاده از یک الگوریتم تخمین توزیع ترکیبی[۸] حل مسئله زمان‌بندی پروژه در شرایط محدودیت منابع را مورد توجه قرار دادند. به منظور بهبود کیفیت جستجو، یک تکرار پیش رو- پس رو و یک جایگشت مبتنی بر جستجوی محلی به الگوریتم اضافه شد. مقایسه نتایج به‌دست آمده با دیگر پژوهش‌های انجام شده اثربخشی الگوریتم

پیشنهادی را مورد تأیید قرار داد [۱۲]. نصیری در سال ۲۰۱۳ با ارائه یک الگوریتم شبه بهینه‌سازی انبوه ذرات به حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع پرداخت. ارزیابی عملکرد الگوریتم مورد نظر با استفاده از تعدادی از مسائل استاندارد نشان داد که الگوریتم پیشنهادی از تمام الگوریتم‌های بهینه‌سازی انبوه ذرات دیگر نتایج بهتری ارائه کرده است و توانایی رقابت با دیگر الگوریتم‌های موفق را نیز دارا می‌باشد [۱۳]. کولیناس و همکارانش در سال ۲۰۱۴ یک الگوریتم فوق ابتکاری بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ارائه کردند. الگوریتم پیشنهادی برای حل تعدادی از مسائل استاندارد مورد استفاده قرار گرفت و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج گزارش شده در ادبیات موضوع مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده اثربخشی الگوریتم ارائه شده بود [۱۴]. همچنین فهمی و همکاران در سال ۲۰۱۴ با ادغام تکنیک توجیه انباشته که از دو حلقه برای بهبود کیفیت جواب‌های به دست آمده استفاده می کند و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات اقدام به حل مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع نمودند [۱۵]. در سال۲۰۱۵ ژنگ و همکاران از یک الگوریتم ترکیبی حاصل از بهینه‌سازی ازدحام ذرات و رقابت استعماری برای حل این مسئله استفاده کردند. مدل ریاضی ارائه شده آنها چندین حالت را برای فعالیت‌ها در نظر می‌گیرد و برای سنجش این مدل و همچنین روش حل به کارگرفته شده، از داده‌های استاندارد موجود در سایت PSPLIB استفاده کرده‌اند [۱۶].

عمده مطالعات مرتبط با مسائل RCPSP (که به تعدادی از آنها در این قسمت اشاره شده است) می توان در سه دسته جای داد: دسته اول مطالعاتی هستند که هدف اصلی آنها ارائه یک مدل جدید برای این مسئله بوده است و تلاش کرده‌اند تا مدل را به دنیای واقعی نزدیک‌تر نمایند و مدل‌های غیر قطعی، احتمالی و قطعی جدیدی ارائه داده‌اند. دسته دوم مطالعاتی هستند که به دنبال یافتن راه‌حل‌های جدید و کارا برای مدل‌های ایجاد شده بوده و از الگوریتم‌های فراابتکاری جدید و یا ترکیب الگوریتم های فراابتکاری برای حل مدل استفاده کرده‌اند و درنهایت دسته سوم که تعداد کمتری از مطالعات را نیز شامل می شود، سعی در برنامه‌ریزی یک پروژه واقعی با مدل‌ها و الگوریتم‌های حل موجود داشته‌اند. در بین مدل‌های ارائه شده برای این مسئله، به‌کارگیری مدلی که همزمان چندین هدف را بهینه کند و روابط پیش‌نیازی بین

فعالیت‌ها را به صورت کلی در نظر گرفته باشد و بعلاوه چندین حالت اجرایی را برای فعالیت‌ها متصور شده باشد بسیار کم به چشم می‌خورد و از طرفی با توجه به مطالعات مرور شده، تاکنون از الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب برای حل این مسئله استفاده نشده است که در این مطالعه این دو قسمت به صورت همزمان مورد توجه قرار گرفته و سعی شده است مدلی ارائه شود که همزمان دو هدف هزینه و زمان را برای چندین حالت اجرایی فعالیت‌ها با روابط پیش‌نیازی کلی در نظر بگیرد.

۳- روش‌شناسی زمان‌بندی پروژه با منابع محدود

مدل‌های متعددی برای مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع ارائه شده است. در این پژوهش تلاش شده است تا مدل ارائه شده بتواند همزمان دو هدف زمان و هزینه را که از مهم‌ترین اهداف انجام پروژه‌ها می‌باشد [۱۷] را در کنار کامل‌ترین حالت روابط پیش‌نیازی برای چندین حالت اجرایی فعالیت‌ها در نظر بگیرد. از این رو مدلی چند هدفه با روابط پیش‌نیازی کلی تحت فرضیاتی طراحی و فرموله شد که در ادامه به بررسی آن خواهیم پرداخت.

۳-۱- مدل ریاضی برنامه‌ریزی چندهدفه

مدل مبنا در این مطالعه، مدل تالبوت[۹] در نظر گرفته شده است که یک مدل تک هدفه با یک حالت اجرا برای فعالیت‌ها است [۱، ص ۵۳۹] و این مدل در این مطالعه توسعه داده شده است. مدل ارائه شده در این پژوهش دو هدف کمینه کردن زمان انجام پروژه (رابطه (۱)) و کمینه کردن هزینه انجام پروژه (رابطه (۲)) را به صورت همزمان در نظر می‌گیرد. متغیر تصمیم مدل (x_{ijt}) از نوع صفر و یک است که در صورت شروع فعالیت i ام در حالت j ام در زمان t ام پروژه مقدار یک را به خود اختصاص می‌دهد و در غیر این صورت صفر خواهد بود. مانند اغلب مدل‌های ریاضی که دارای مفروضاتی هستند [۱۸]، مدل ارائه شده در این پژوهش نیز دارای مفروضاتی به شرح ذیل است:

۱. مسئله قطعی و انجام فعالیت‌ها چند حالته می‌باشد؛
۲. پس از شروع هر فعالیت توقف آن مجاز نیست؛
۳. ظرفیت منابع محدود و مشخص است؛

۴. به زمان آماده‌سازی برای انجام فعالیت‌ها نیازی نیست؛

۵. روابط پیش‌نیازی فعالیت‌ها از نوع روابط پیش‌نیازی کلی است.

محدودیت‌های مدل ارائه شده به دو دسته کلی محدودیت‌های روابط پیش نیازی (روابط (7–4)) و محدودیت‌های منابع (روابط (8 و 9))تقسیم می‌شوند که این محدویت‌ها شدنی بودن[۱۰] جواب‌ها را تضمین می‌نمایند و همچنین رابطه (۳) نیز تضمین می‌کند که یک فعالیت در دو حالت اجرایی انجام نشود. محدودیت‌های روابط پیش‌نیازی، تمام انواع روابط پیش‌نیازی را که در مقدمه معرفی شدند، در نظر می‌گیرد. پارامترهای مدل ریاضی ارائه شده در این پژوهش به صورت زیر تعریف شده‌اند:

عنوان	توضیح پارامتر
i	فعالیت i
M_i	مجموعه حالت‌های اجرا برای فعالیت i
A	مجموعه فعالیت‌ها
Ls_i	دیرترین زمان شروع فعالیت iام
Es_i	زودترین زمان شروع فعالیت iام
C_{im}	هزینه انجام فعالیت i در حالت اجرایی m
E_{SS}	مجموعه فعالیت‌هایی که رابطه پیش‌نیازی آنها به صورت شروع – شروع است.
E_{SF}	مجموعه فعالیت‌هایی که رابطه پیش‌نیازی آنها به صورت شروع – پایان است.
E_{Fs}	مجموعه فعالیت‌هایی که رابطه پیش‌نیازی آنها به صورت پایان – شروع است.
E_{FF}	مجموعه فعالیت‌هایی 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 اجراییm
r^{rr}_{imk}	مقدار مصرف فعالیت i در حالت اجراییm 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
α^{nr}_k	سطح دسترسی منبع جدید تجدید ناپذیر نوع kام در کل پروژه

مدل مورد استفاده در این پژوهش به شرح زیر است:

$\text{Min } f_1 = \sum_{t=es_{n+1}}^{ls_{n+1}} t.x_{(n+1)1t}$	(۱)
$\text{Min } f_2 = \sum_{i\in A}\sum_{m\in M_1}\sum_{t=es_i}^{ls_i} c_{im_i} \times X_{im_it}$	(۲)
S.T. $\sum_{m_i=1}^{M_i}\sum_{t=es_i}^{ls_i} X_{im_it} = 1 \qquad i = 1,\ldots, n+1$	(۳)
$\sum_{m_i=1}^{M_i}\sum_{t=es_i}^{ls_i}(t+ss_{ij})X_{im_it} \le \sum_{m_j=1}^{M_j}\sum_{t=es_j}^{ls_j} t.x_{jm_jt} \quad \forall(i,j)\in E_{ss}$	(۴)
$\sum_{m_i=1}^{M_i}\sum_{t=es_i}^{ls_i}(t+SF_{ij})X_{im_it} \le \sum_{m_j=1}^{M_j}\sum_{t=es_j}^{ls_j}\left(t+d_{jm_j}\right)X_{jm_jt} \quad \forall(i,j)\in E_{sf}$	(۵)
$\sum_{m_i=1}^{M_i}\sum_{t=es_i}^{ls_i}(t+d_{im_i}+FS_{ij})X_{im_it} \le \sum_{m_j=1}^{M_j}\sum_{t=es_j}^{ls_j} t.x_{jm_jt} \quad \forall(i,j)\in E_{fs}$	(۶)
$\sum_{m_i=1}^{M_i}\sum_{t=es_i}^{ls_i}(t+d_{im_i}+FF_{ij})X_{im_it} \le \sum_{m_j=1}^{M_j}\sum_{t=es_j}^{ls_j}\left(t+d_{jm_j}\right)X_{jmt}\forall(i,j)\in E_{ff}$	(۷)
$\sum_{i=1}^{n}\sum_{m_i=1}^{M_i} r^{rr}{}_{im_ik}\sum_{s=Max\{t-d_{im},es_i\}}^{Min\{t-1,ls_i\}} x_{im_is} \le a^{rr}{}_k \;\; k=1,\ldots,K, \quad t=1,\ldots,T$	(۸)
$\sum_{i=1}^{n}\sum_{m_i=1}^{M_i} r_{imk}^{nr}\sum_{s=es_i}^{ls_i} X_{ims} \le \alpha_k^{nr} \;\; k=1,2,\ldots,K$	(۹)
$m_i = 1,2,\ldots,M \qquad i = 0,1,2,\ldots,n+1 \qquad t = 1,2,\ldots,T \qquad X_{imt}\in\{0,1\}$	(۱۰)

۳-۲- حل و اعتبارسنجی مدل

مدل ریاضی ارائه شده در این مسئله با توجه به زمان و دشواری‌های حل در زمره مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد [۱۹؛۲۰] و از این رو برای حل آن از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است. در سال ۱۹۹۷ والپرت و مکریدی قضیه‌ای را مطرح کردند که بیان می کرد اگر الگوریتم (الف) برای برخی از مسائل جواب‌های بهتری را نسبت به الگوریتم (ب) ایجاد می‌کند، در این صورت الگوریتم (ب) نیز در برخی مسائل بر الگوریتم الف برتری دارد. در نتیجه هیچ الگوریتمی که همیشه برتر از دیگر الگوریتم‌ها باشد، وجود ندارد [۲۱]. بنابراین جستجوی محققان بر یافتن بهترین و کاراترین الگوریتم برای یک مسئله مشخص، به جای تلاش برای یافتن بهترین الگوریتم در همه حالات، متمرکز شد. از این رو در حل این مسئله به منظور سنجش کارایی یک الگوریتم جدید در حل، از الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب استفاده شده است که در مطالعات پیشین به کار گرفته نشده است و همچنین برای مقایسه جواب‌های حاصل شده، علاوه بر بهترین جواب‌های موجود در پایگاه مسائل استاندارد پروژه (PSPLIB)، الگوریتم فراابتکاری تبرید شبیه‌سازی شده نیز به کارگرفته شده است تا ارزیابی بهتری از عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب به دست آید.

به منظور آزمودن مدل ریاضی طراحی شده و همچنین الگوریتم‌های حل به کار گرفته شده نیاز به داده‌های عددی است که در این مطالعه از داده‌های استاندارد موجود در این زمینه استفاده شده است.

کولیش اولین تولیدکننده مسائل برنامه‌ریزی و تخصیص منابع به نام ProGen را ایجاد نمود که این مسائل از روش نمایش فعالیت روی گره[۱۱] استفاده کرده‌اند. او همچنین نشان داد که مسائل استاندارد ایجاد شده توسط پاترسون برای تست الگوریتم‌ها مناسب نیستند، زیرا با توجه به پارامترهایی که به‌وسیله او برای ایجاد مسائل تعریف شد، این مسائل جزو مسائل ساده محسوب می‌شوند. پروجن با برخورداری از پارامترهایی که برای آن درنظر گرفته شده است، قابلیت کنترل پیچیدگی مسائل را دارد. مزیت این مسائل در آن است که اول از طریق اینترنت قابل دسترس هستند و دوم به طور مداوم در حال کامل شدن هستند و مدل‌های جدید به آنها اضافه می‌شود [۲۲]. همچنین جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه که تاکنون

برای این مسائل به دست آمده است، در وبسایت[۱۲] ثبت شده و برای محققان قابل دسترس است.

در ادامه دو الگوریتم به کار گرفته شده در این مطالعه معرفی شده‌اند:

الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب[۱۳]: الگوریتم کرم شب‌تاب یک الگوریتم الهام گرفته از طبیعت است که در سال ۲۰۰۷ توسط یانگ معرفی شد [۲۳].

در الگوریتم کرم شب‌تاب برای سادگی سه قانون زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱. تمام کرم‌های شب‌تاب دو جنسیتی هستند و بدون توجه به جنسیت یکدیگر را جذب می‌کنند.

۲. شدت جذب متناسب با درخشندگی شب‌تاب‌ها می‌باشد. بنابراین برای دو شب‌تاب آنکه شدت نور کمتری دارد، به سمت آنکه درخشندگی بیشتری دارد، حرکت می‌کند. اگر هیچ کدام از دیگری درخشان تر نباشند، به صورت تصادفی به سمت هم حرکت می‌کنند.

۳. تابع هدف به‌وسیله شدت روشنایی شب‌تاب در مقصد تعیین می‌شود.

در الگوریتم کرم شب‌تاب دو مسئله مهم وجود دارد، تغییر شدت نور و فرموله کردن میزان جذابیت. برای سادگی، ما همیشه می توانیم فرض کنیم که جذابیت یک کرم شب‌تاب با میزان نوری که می‌تاباند، تعیین می‌شود.

در ساده‌ترین حالت شدت نور I_r متناسب با قانون معکوس توان دوم می‌باشد.

$$I_r = I_{s/\,r^2}$$

که در این معادله I_s شدت نور در منبع می‌باشد. همچنین اگر شدت جذب نور به‌وسیله محیط را γ فرض کنیم، می‌توان شدت نور را با رابطه مقابل محاسبه کرد:

$$I = I_0 e^{-\gamma r}$$

که در این معادله I_o شدت نور منبع می‌باشد. برای اجتناب از مشکل یکتایی[۱۴] در r=0 در عبارت $I_{s/\,r^2}$ ترکیب توأمان تأثیر قانون معکوس توان دوم و جذب محیطی می‌تواند به‌وسیله فرمول گاوسی مقابل تخمین زده شود:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2}$$

از آنجا که جذابیت یک کرم شب‌تاب متناسب با شدت نور درک شده به‌وسیله کرم شب‌تاب مجاور می‌باشد، جذابیت یک کرم شب‌تاب را با معادله زیر تعریف می‌کنیم:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2}$$

که در این معادله β_o شدت نور در r=0 می‌باشد. همچنین فاصله بین دو کرم شب‌تاب به وسیله فرمول مقابل تعیین می‌شود:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 - (y_i - y_j)^2}$$

درنهایت حرکت شب‌تاب J به سمت شب‌تاب جذاب‌تر به‌وسیله فرمول زیر تعیین می‌گردد:

$$x_j = x_j + b.e^{-\gamma r i j 2}.\left(x_i - x_j\right) + \alpha.€$$

که در این معادله دومین عبارت رابطه جذابیت است و سومین عبارت یک حرکت تصادفی است که پارامتر α در آن یک عدد تصادفی در بازه ۰ تا ۱ می‌باشد و پارامتر € توزیع یکنواخت می‌باشد. همچنین پارامتر b معمولاً برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. مکانیزم الگوریتم کرم شب‌تاب ترکیبی استفاده شده در این مطالعه به صورت زیر است:

۳-۳- ساز و کار الگوریتم کرم شب‌تاب چند هدفه:

در این مطالعه از ترکیب الگوریتم کرم شب‌تاب چند هدفه براساس جواب‌های بهینه پاره تو با یک الگوریتم ابتکاری برای تبدیل جواب‌های تصادفی به جواب‌های شدنی از نظر روابط پیش‌نیازی استفاده شده است. ساز و کار این الگوریتم که برای اولین بار توسط ژین شی یانگ[۱۵] ارائه شده است [۲۵]، به صورت زیر می‌باشد:

گام ۱: تعریف توابع هدف و محدودیت‌ها و همچنین تعیین تعداد تکرار (یا شرط توقف الگوریتم).

گام ۲: بارگذاری جمعیت n کرم شب‌تاب به صورت یکنواخت در فضای مسئله (از تکرار دوم براساس درخشندگی کرم‌ها جمعیت به سمت بهترین جواب (جواب غالب مرحله قبل g_*^t) حرکت می‌کند).

گام ۳: تبدیل موقعیت‌های تصادفی هر کرم به موقعیت شدنی با اعمال محدویت‌های پیش‌نیازی حاکم بین فعالیت‌ها (این عمل با به‌کارگیری الگوریتم ابتکاری معرفی شده انجام می‌شود)، جواب‌های تصادفی ایجاد شده به کمک این الگوریتم به یک جواب شدنی براساس روابط پیش‌نیازی تبدیل می‌شوند.

گام ۴: بررسی مجدد شدنی بودن موقعیت‌های خروجی گام ۳ با اعمال محدودیت‌های منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، جواب‌های غیرموجه (نشدنی) در این گام از مجموعه جواب‌ها حذف می‌شوند.

گام ۵: محاسبه مقدار توابع هدف یا درخشندگی برای هر کرم، مقایسه آنها با یکدیگر و تعیین g_*^t،

در صورتی که یک جواب غالب در بین جواب‌های این تکرار وجود نداشته باشد:

گام ۶: تولید بردار وزن تصادفی با مجموع یک برای هر کرم شب‌تاب،

گام ۷: تعیین g_*^t بر اساس وزن‌ها و مقادیر توابع هدف هر کرم شب‌تاب،

گام ۸: تعیین جواب‌های غیر مغلوب و انتقال آنها به تکرار بعدی

گام ۹: تکرار گام‌های ۲ تا ۸ تا رسیدن به شرط توقف.

۳-۴- الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده[۱۶]

منشأ الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده (SA)، کارهای کریک پاتریک و کرنی و همکارانش در سال های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۵ است [۲۶؛ ۲۷]. کریک پاتریک و همکارانش، متخصصانی درزمینه فیزیک آماری بودند. آنها برای حل مسائل سخت بهینه‌سازی، روشی مبتنی بر تکنیک تبرید تدریجی پیشنهاد کردند. تکنیک تبرید تدریجی، به‌وسیله متالوژیست‌ها برای رسیدن به حالتی که در آن ماده جامد، به‌خوبی مرتب و انرژی آن کمینه شده باشد، استفاده می شود. این تکنیک شامل قراردادن ماده در دمای بالا و سپس کمک کردن تدریجی این دماست [۲۸].

الگوریتمSA، یک جستجوی فرا ابتکاری ساده و اثر بخش در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی است. البته SA برای حل مسائل پیوسته نیز گسترش یافته است

[۲۹]. روش تبرید شبیه‌سازی‌شده فرایند تبرید تدریجی را برای حل یک مسئله بهینه‌سازی، شبیه‌سازی می‌کند. تابع هدف مسئله، مشابه انرژی یک ماده است که باید با کمک تعریف یک دمای مجازی، کمینه شود. دما در این حالت، یک پارامتر قابل کنترل در الگوریتم است [۳۰].

الگوریتم SA یک الگوریتم احتمالی است که در آن، راهکاری برای خروج از بهینه‌های محلی ارائه شده است. SA یک الگوریتم بدون حافظه است به این معنا که در این الگوریتم، مکانیزمی برای ذخیره اطلاعات در طول جستجو وجود ندارد. پیاده‌سازی این الگوریتم ساده و آسان است [۳۱]. در ادامه مکانیزم عملکرد الگوریتم SAترکیبی ارائه شده است:

گام ۱: تنظیم دمای اولیه، دمای نهایی و تابع سرد شدن؛

گام ۲: ایجاد یک جواب تصادفی؛

گام ۳: تبدیل جواب تصادفی به جواب شدنی با اعمال محدویت‌های پیش‌نیازی حاکم بین فعالیت‌ها (این عمل با به‌کارگیری الگوریتم ابتکاری معرفی شده انجام می‌شود)، جواب‌های تصادفی ایجاد شده به کمک این الگوریتم به یک جواب شدنی براساس روابط پیش‌نیازی تبدیل می شوند؛

گام ۴: بررسی مجدد شدنی بودن موقعیت‌های خروجی گام ۳ با اعمال محدودیت‌های منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، جواب‌های غیرموجه (نشدنی) در این گام از مجموعه جواب‌ها حذف می‌شوند.

گام ۵: محاسبه مقادیر توابع هدف به ازای جواب‌های گام ۴؛

گام ۶: در صورتی که جواب شدنی فعلی در مقایسه با مجموعه جواب‌های پاره تو آرشیو شده (مجموعه آرشیو) غیر مغلوب باشد، جواب فعلی به مجموعه آرشیو اضافه شود. اگر مقدار توابع هدف جواب شدنی فعلی در یک یا چند هدف از مجموعه آرشیو بدتر باشد، در صورتی که شرط زیر را ارضا کند، وارد مجموعه آرشیو می‌شود و در غیر این صورت جواب شدنی پذیرفته نمی‌شود؛

شرط پذیرش جواب‌های مغلوب: در صورتی که مقایر یک یا چند تابع هدف برای جواب شدنی در مقایسه با جواب‌های آرشیو به اندازه Δ تفاوت داشته باشد ولی رابطه $e^{\Delta/T} = r$ را که در آن T دمای فعلی الگوریتم و r یک عدد تصادفی یکنواخت بین ۰ و ۱ است، ارضا کند، جواب شدنی علی‌رغم بدتر بودن وارد مجموعه آرشیو می‌شود.

گام ۷: در صورتی که عضوی از مجموعه آرشیو در مقابل جواب جدید وارد شده به آرشیو مغلوب باشد، آن عضو از مجموعه آرشیو حذف شود؛

گام ۸: کاهش دمای الگوریتم مطابق با تابع متروپلیس[۱۷]؛

گام ۹: ایجاد جواب تصادفی جدید؛

گام ۱۰: تکرار گام ۲ تا گام ۹ تا رسیدن به دمای نهایی.

۳-۵- ساز و کار الگوریتم ابتکاری

هر دو الگوریتم مورد استفاده با یک الگوریتم ابتکاری ترکیب شده‌اند که به‌کارگیری این الگوریتم منجر به افزایش کارایی الگوریتم‌های اصلی خواهد شد، زیرا جواب‌های غیر موجه (نشدنی) ایجاد شده به‌وسیله الگوریتم اصلی را به یک جواب شدنی نگاشت می‌کند و به‌عبارتی منجر به ارضای محدودیت‌های ۴-۷ مدل ریاضی ارائه شده می‌شود. مکانیزم عملکرد این الگوریتم ابتکاری به صورت زیر است:

گام ۱: دریافت فهرست جواب تصادفی از الگوریتم اصلی حل (در این مطالعه دو الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و کرم شب‌تاب مورد استفاده قرار گرفتند)؛

گام ۲: ایجاد فهرست جواب شدنی (در ابتدا لیست خالی است)؛

از اولین فعالیت تا آخرین فعالیت در لیست جواب تصادفی:

گام ۳: فعالیت iام بررسی شود، در صورتیکه فعالیت(های) پیش‌نیاز آن در لیست جواب شدنی قرار دارد (دارند)، آن را به لیست جواب شدنی اضافه و فعالیت iام از لیست جواب تصادفی حذف شود،

گام ۴: تا خالی شدن لیست جواب تصادفی، گام ۳ تکرار شود.

۴- معیارهای ارزیابی جواب‌ها

با توجه به تفاوت ماهوی مسائل چندهدفه و تک هدفه، معیارهای ارزیابی جواب برای این مسائل نیز متفاوت است. دو الگوریتم مورد استفاده در این مطالعه از مفهوم جواب‌های پاره تو کمک گرفته و مجموعه‌ای از جواب‌های غیر مغلوب را گزارش می‌دهند، از این رو در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد دو الگوریتم کرم شب‌تاب و تبرید شبیه‌سازی شده، علاوه بر زمان و هزینه به عنوان توابع هدف، سه معیار تعداد[۱۸]، تنوع[۱۹] و فاصله[۲۰] استفاده شده است که در ادامه تشریح می‌شوند. لازم به ذکر است در

تعدادی از مطالعات مشابه، از زمان محاسباتی[۲۱] به عنوان معیار ارزیابی جواب استفاده شده است که با توجه به اینکه این معیار به میزان زیادی وابسته به مشخصات سخت افزاری رایانه مورد استفاده و همچنین زبان یا نرم‌افزار برنامه‌نویسی مورد استفاده است [۳۲]، در این مطالعه از این معیار استفاده نشده است.

معیار تعداد: در این معیار ملاک تعداد اعضای غیرتکراری دو مجموعه پارتو تولید شده به‌وسیله الگوریتم‌هاست که درواقع هرچه این تعداد بیشتر باشد، عملکرد الگوریتم از دیدگاه این معیار بهتر است، به عبارتی بیشتر بودن تعداد اعضای مجموعه پارتو متناظر با تعداد حالت‌های تصمیم بیشتر می‌باشد که موجب تسهیل در روند تصمیم‌گیری مدیران می‌شود [۳۳، ص ۱۵۱].

معیار تنوع: زیتزلر معیار اندازه‌گیری خاصی را تعریف کرد که در آن طول قطر فضایی که به‌وسیله مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های پارتو به کار می‌رود، اندازه‌گیری می‌شود. براساس این معیار هرچه میزان تنوع بیشتر باشد، عملکرد الگوریتم بهتر ارزیابی می‌شود [۳۳، ص ۱۵۱].

$$a = (f_1^a, f_2^a)\ b = (f_1^b, f_2^b)$$

$$\Delta f_1 = \left|f_1^a - f_1^b\right| = f_1^{max} - f_1^{min}$$

$$\Delta f_2 = \left|f_2^a - f_2^b\right| = f_2^{max} - f_2^{min}$$

$$D = \sqrt[3]{(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2}$$

معیار فاصله: این روش که توسط اسکات[۲۲] ارائه شده است از دیگر معیارهای بررسی نمودار پارتو است که میزان فاصله جواب‌ها از یکدیگر را مورد بررسی قرار می‌دهد تا اندازه فاصله بین جواب‌های یک نقطه با نزدیک‌ترین همسایه‌اش را به دست آورد که می‌توان این معیار را هم به صورت معمولی و هم به صورت نرمالیز شده در نظر گرفت. برخلاف دو معیار قبلی، در این معیار فاصله کمتر به معنای عملکرد بهتر الگوریتم می‌باشد [۳۳، ص ۱۵۲].

$$d_1 = \sqrt{(f_1^i - f_1^j)^2 + (f_2^i - f_2^j)^2}$$

$$d'_1 = \sqrt{(\frac{f_1^i - f_1^j}{f_1^{max} - f_1^{min}})^2 + (\frac{f_2^i - f_2^j}{f_2^{max} - f_2^{min}})^2}$$

$$S = \frac{std\{d_i^{(1)}\}}{mean\{d_i^{(1)}\}} = std\left\{\frac{d_i^{(1)}}{\bar{d}^{(1)}}\right\} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\frac{d_i^{(1)}}{\bar{d}^{(1)}} - \bar{d})}$$

۵- نتایج محاسباتی

در این پژوهش برای کدنویسی الگوریتم کرم شب‌تاب و تبرید شبیه‌سازی شده مورد اشاره از برنامه متلب[۲۳] نسخه R2014a تحت سیستم عامل Windows 8 استفاده شده است.

برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی، تعداد ۳۰ مسئله از مسائل استاندارد PSPLIB در ابعاد مختلف به صورت تصادفی انتخاب شدند که نتایج به دست آمده از حل این مسائل با به‌کارگیری الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب و تبرید شبیه‌سازی شده درجداول ۲ الی ۷ ارائه می‌شود. در هریک از این جداول نتایج حل پنج مسئله با اندازه مشخص که شامل ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰ و ۳۰ فعالیت می‌باشند، ارائه شده است. مقدار شاخص‌های تعداد، تنوع و فاصله ارائه شده است و همچنین کمترین زمان به دست آمده به‌وسیله الگویتم پیشنهادی با بهترین نتیجه به دست آمده به وسیله دیگر محققان که در پایگاه اینترنتی مسائل استاندارد ارائه شده است، مقایسه گردیده است.

جدول ۲ نتایج حل مسائل استاندارد با ۱۲ فعالیت [یافته‌های پژوهش]

کد مسئله	معیار تعداد		معیار تنوع		معیار فاصله		بهترین زمان تکمیل		بهترین زمان PSPLIB
	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	
J129-1	۱۳	۱۱	۷۹۸,۲	۶۲۴,۷	۱,۳۴	۲,۰۳	۱۸	۲۰	۲۲
J129-2	۲۱	۱۷	۷۸۵,۵	۷۰۱,۴	۱,۴۲	۱,۷۲	۲۸	۲۸	۲۸
J129-3	۱۱	۱۰	۸۱۲,۶	۶۹۱,۸	۱,۱۷	۱,۳۱	۲۴	۲۵	۲۴
J129-4	۱۶	۱۶	۸۰۲,۴	۷۹۷,۵	۱,۴۵	۱,۲۹	۲۳	۲۳	۲۳
J129-5	۱۹	۱۵	۷۹۱,۶	۶۵۹,۱	۱,۲۶	۱,۸۶	۲۹	۲۹	۳۰

جدول ۳ نتایج حل مسائل استاندارد با ۱۴ فعالیت [یافته‌های پژوهش]

کد مسئله	معیار تعداد		معیار تنوع		معیار فاصله		بهترین زمان تکمیل		بهترین زمان
	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	PSPLIB
J1422-8	۱۰	۱۰	۴۳۸,۴	۴۲۹,۲	۱,۴۲	۱,۶۷	۲۶	۲۶	۲۶
J1426-1	۲۱	۱۸	۵۱۲,۶	۴۹۲,۴	۱,۷۵	۱۸۳	۱۸	۱۷	۱۸
J1426-2	۱۱	۱۱	۳۹۶,۹	۳۴۸,۸	۱,۲۲	۱,۳۹	۲۴	۲۴	۲۴
J1426-3	۱۶	۱۴	۴۶۲,۳	۴۲۲,۷	۱,۵۸	۱,۴۳	۳۱	۳۱	۳۱
J1458-3	۱۹	۱۸	۵۱۴,۸	۵۰۱,۶	۱,۱۹	۱,۳۲	۲۷	۲۸	۲۷

جدول ۴ نتایج حل مسائل استاندارد با ۱۶ فعالیت [یافته‌های پژوهش]

کد مسئله	معیار تعداد		معیار تنوع		معیار فاصله		بهترین زمان تکمیل		بهترین زمان
	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	PSPLIB
J169-1	۱۹	۱۶	۶۵۲,۸	۶۵۰,۲	۱,۵۷	۱,۶۹	۲۳	۲۵	۲۳
J169-3	۱۷	۱۴	۵۹۷,۴	۵۷۶,۹	۱,۳۶	۱,۵۵	۲۸	۲۸	۳۱
J169-5	۱۸	۱۳	۶۲۳,۸	۵۹۸,۴	۱,۸۷	۱,۶۸	۲۸	۲۸	۲۸
J169-6	۱۳	۱۳	۷۱۲,۸	۷۰۴,۷	۱,۶۸	۱,۸۳	۱۸	۱۹	۱۹
J169-7	۱۹	۱۸	۶۷۶,۲	۷۱۹,۳	۱,۵۵	۱,۸۱	۲۵	۲۶	۲۵

جدول ۵ نتایج حل مسائل استاندارد با ۱۸ فعالیت [یافته‌های پژوهش]

کد مسئله	معیار تعداد		معیار تنوع		معیار فاصله		بهترین زمان تکمیل		بهترین زمان
	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	PSPLIB
J189-1	۱۹	۱۷	۶۱۲,۷	۵۹۲,۹	۱,۰۸	۱,۲۱	۲۵	۲۸	۲۵
J189-7	۱۴	۱۳	۵۷۲,۹	۵۳۱,۰	۱,۱۶	۱,۳۶	۳۲	۳۳	۳۲
J1811-3	۱۶	۱۴	۶۷۲,۴	۶۴۹,۷	۱,۴۹	۱,۶۳	۲۲	۲۲	۲۲
J1811-5	۱۶	۱۵	۵۹۷	۵۷۹,۳	۱,۳۵	۱,۵۷	۱۸	۲۹	۱۸
J1813-6	۱۳	۱۳	۶۶۲,۸	۶۱۷,۴	۱,۲۶	۱,۴۲	۲۶	۲۶	۲۶

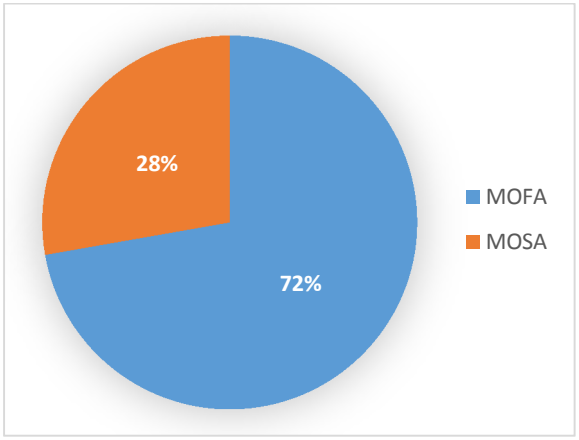
جدول ۶ نتایج حل مسائل استاندارد با ۲۰ فعالیت [یافته‌های پژوهش]

کد مسئله	معیار تعداد		معیار تنوع		معیار فاصله		بهترین زمان تکمیل		بهترین زمان PSPLIB
	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	
J2010-1	۱۵	۱۴	۳۹۹,۴	۳۶۹,۴	۱,۳۱	۱,۶۵	۱۸	۱۹	۱۸
J2010-6	۲۱	۱۸	۳۸۴	۳۷۴,۲	۱,۱۹	۱,۳۸	۲۵	۲۵	۲۵
J2012-3	۱۳	۱۳	۴۶۳,۸	۴۵۰,۵	۱,۴۳	۱,۵۹	۳۴	۳۶	۳۴
J2014-7	۱۷	۱۵	۴۸۷,۲	۳۶۸,۱	۱,۵۲	۱,۷۳	۲۹	۳۰	۲۹
J2016-4	۹	۹	۳۷۲,۵	۳۷۱	۱,۲۷	۱,۳۰	۳۶	۳۶	۳۶

جدول ۷ نتایج حل مسائل استاندارد با ۳۰ فعالیت [یافته‌های پژوهش]

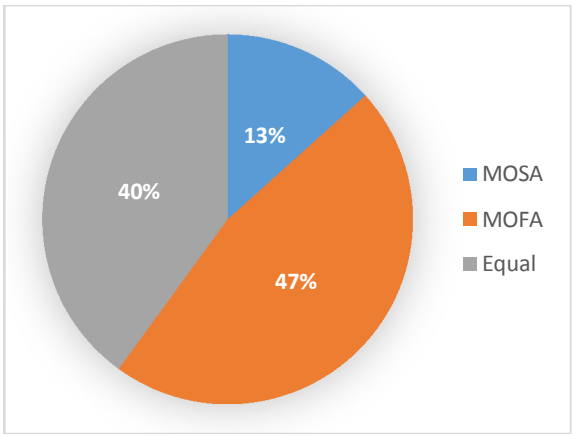
کد مسئله	معیار تعداد		معیار تنوع		معیار فاصله		بهترین زمان تکمیل		بهترین زمان PSPLIB
	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	MOFA	MOSA	
J309-1	۲۲	۲۰	۶۴۸,۳	۶۴۱,۷	۱,۰۲	۱,۲۴	۳۲	۳۶	۳۱
J309-2	۱۸	۱۸	۵۳۷,۹	۵۳۶,۳	۱,۳۸	۱,۴۱	۲۸	۳۰	۲۸
J3037-1	۱۹	۱۶	۶۵۲,۹	۶۴۴,۵	۱,۱۹	۱,۲۷	۳۳	۳۴	۳۳
J3041-1	۱۲	۱۲	۵۹۴,۲	۵۹۲,۹	۱,۸۴	۱,۷۹	۲۳	۲۳	۲۲
J3041-3	۱۴	۱۳	۴۸۸,۵	۴۲۹,۱	۱,۴۷	۱,۵۲	۳۱	۳۲	۳۱

در هر مسئله ۳ معیار ارزیابی برای دو الگوریتم به کار گرفته شده ارائه شده است که با احتساب ۳۰ مسئله مورد بررسی درمجموع ۹۰ معیار به دست آمده که فراوانی برتری معیارهای مربوط به هر الگوریتم در نمودار ۱ خلاصه شده است:



نمودار ۱ مقایسه معیارهای ارزیابی دو الگوریتم MOSA و MOFA

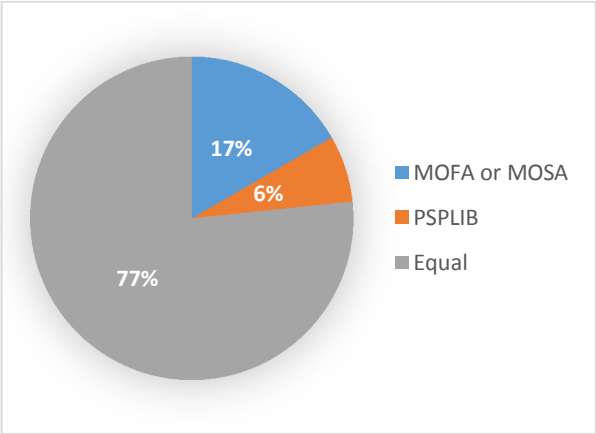
همچنین برای ۳۰ مسئله مورد بررسی فراوانی بهترین زمان تکمیل پروژه‌های استاندارد برای دو الگوریتم حل مورد استفاده در نمودار ۲ خلاصه شده است.



نمودار ۲ مقایسه جواب‌های برتر هر الگوریتم (زمان تکمیل)

جواب‌های به دست آمده در دو الگوریتم مورد استفاده نشان می‌دهد که عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب در مقایسه با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده برتری داشته و در این مسئله به کمک این الگوریتم می‌توان به جواب‌های بهتری دست پیدا کرد.

بعلاوه مقایسه نتایج دو الگوریتم به کار گرفته شده با بهترین جواب‌های موجود در سایت مسائل استاندارد PSPLIB نیز انجام شد که فراوانی برتری عملکرد این دو الگوریتم در مقایسه با جواب‌های موجود به صورت نمودار زیر بوده است.



نمودار ۳ برتری نتایج دو الگوریتم MOSA یا MOFA در مقایسه با نتایج PSPLIB

با دقت در جداول بالا و مقایسه کمترین زمان الگوریتم کرم شب‌تاب با نتایج حاصل از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده و پژوهش‌های دیگر محققان مشخص می‌شود که عملکرد هر دو الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله زمان‌بندی پروژه در شرایط محدودیت منابع بسیار مناسب بوده است. تنها در ۶ درصد مسائل، یعنی ۲ مسئله این دو الگوریتم نتوانسته‌اند به جواب موجود در سایت PSPLIB برسند در صورتی که در ۱۷ درصد مسائل به جوابی بهتر از جواب موجود در سایت رسیده‌اند و این در حالی است که مسائل موجود در سایت به صورت تک‌هدفه حل شده‌اند و تنها به کمینه‌سازی زمان تکمیل پروژه‌ها پرداخته‌اند. از این رو با توجه به اینکه حل مسائل چند هدفه خود دشواری‌های بیشتری نسبت به بهینه‌یابی در مسائل تک هدفه دارد و همچنین نتایج به دست آمده در زمان تکمیل پروژه‌ها، می‌توان چنین ارزیابی کرد که عملکرد هر دو الگوریتم به کار گرفته شده در حل مدل ریاضی ارائه شده در این مطالعه قابل قبول است و می‌توان دلیلی این کارایی را در استفاده از الگوریتم ابتکاری دانست، زیرا این الگوریتم تا حد بسیار زیادی از دورریخته شدن جواب‌های

تصادفی - با نگاشت جواب‌های غیرموجه به جواب‌های موجه - جلوگیری می‌نماید و این موجب افزایش قابل توجه کارایی الگوریتم‌های مورد استفاده شده است. در مراحل کدنویسی دو الگوریتم نیز این موضوع مشهود بود به نحوی که تعداد جواب‌های مجموعه پاره تو پس از به‌کارگیری این الگوریتم ابتکاری در دل دو الگوریتم دیگر، تقریباً ۳ برابر شد که این خود گواه بر افزایش کارایی الگوریتم اصلی دارد. همچنین در مقایسه عملکرد دو الگوریتم کرم شب‌تاب و تبرید شبیه‌سازی شده نیز همان طور که در نمودار ۳ نشان داده شد، الگوریتم کرم شب‌تاب در ۴۷ درصد مسائل جواب بهتری ارائه داده است در صورتی که الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده تنها در ۱۳ درصد مسائل به جواب بهتری رسیده است. همچنین در مجموع ۹۰ شاخص ارزیابی محاسبه شده برای مقایسه عملکرد این دو الگوریتم، در ۷۲ درصد شاخص‌ها کرم الگوریتم شب‌تاب وضعیت بهتری داشته است که این به معنای کیفیت بهتر جواب‌های به دست آمده از الگوریتم کرم شب‌تاب نیز می‌باشد. با در نظر گرفتن زمان‌های تکمیل و معیارهای ارزیابی محاسبه شده برای دو الگوریتم به کار گرفته شده در این مطالعه، در مجموع می‌توان عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب را در حل مدل ریاضی ارائه شده برای این مسئله بسیار بهتر از عملکرد الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده دانست و دلیل این عملکرد بهتر نیز تا حد زیادی به چند جستجوگره بودن الگوریتم باز می‌گردد. با توجه به اینکه الگوریتم کرم شب‌تاب در هر تکرار از چند جستجوگر (کرم شب‌تاب) برای بررسی فضای مسئله استفاده می‌کند، در این مسئله توانسته است کارایی بهتری داشته باشد. البته همان طور که پیش از این در این مطالعه ذکر شد، برتری عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب در مقایسه با الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده در این مسئله نمی‌تواند به معنای عملکرد بهتر این الگوریتم در هر مسئله دیگری باشد و عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری می‌توانند در مسائل مختلف تفاوت داشته باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نخست مدل ریاضی جدیدی برای مسئله زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP) ارائه شد که علاوه بر در نظر گرفتن دو هدف زمان و هزینه تکمیل پروژه، مسئله را در حالت روابط پیش‌نیازی کلی (GPR) و همچنین به

صورت چند حالته (Multi-Mode) در نظر گرفته است. علاوه بر ارائه یک مدل جدید، برای اولین بار از الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب در کنار الگوریتم فراابتکاری تبرید شبیه‌سازی شده برای حل مسئله زمان‌بندی پروژه دو هدفه استفاده شد. هر دو این الگوریتم‌ها با یک الگوریتم ابتکاری ترکیب شده‌اند که نتایج نشان داد استفاده از این الگوریتم ترکیبی به میزان زیادی کارایی دو الگوریتم اصلی را افزایش داده است. در مجموع تنها در ۷ درصد مسائل این دو الگوریتم نتوانستند به جوابی برابر یا بهتر بهترین جواب‌های ارائه شده در سایت مسائل استاندارد دست پیدا کنند که این نشان از عملکرد قابل قبول هر دو الگوریتم دارد. در مقایسه عملکرد دو الگوریتم نیز از سه شاخص ارزیابی استفاده شد که در مجموع ۹۰ شاخص، الگوریتم کرم شب‌تاب در ۷۲ درصد مسائل از وضعیت بهتری برخوردار بود و همچنین در ۴۷ درصد مسائل نیز مقادیر توابع هدف در این الگوریتم بهتر از الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده بود که این نشان از برتری MOFA در مقایسه با MOSA در حل این مسئله دارد.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Job Shop
2. Flow Shop
3. Preemptive
4. Precedence Relations
5. Activity On Node
6. Lag
7. Chaos-Based Improved Immune Algorithm (CBIIA)
8. Hybrid Estimation of Distribution Algorithm(HEDA)
9. Talbot
10. Feasibility
11. AON
12. http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/main.html
13. Firefly Algorithm
14. Singularity
15. Xin-She Yang
16. Simulated Annealing Algorithm
17. Metropolice
18. Quantity Criterion
19. Diversity Criterion
20. Spacing Metric
21. CPU-Time
22. Schott
23. MATLAB

۸- منابع

[1] Sabzeparvar M. (2014) "Project management and control", 11th Edition, Termeh Press, Tehran.

[2] Shirmohammadi A. (2010) *Management and control of project*, 2nd Edition, Esfahan, Jahad Daneshgahi Press.

[3] Demeulemeester E. L. (2002) *Project scheduling: A research handbook*, Vol. 102, Springer.

[4] Deckro R. F. Winkofsky E. P, Hebert J. E., Gagnon R. (1991) "A decomposition approach to multi-project scheduling", *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 51, No. 1: 110–118.

[5] Chiu H. N., Tsai D. M. (2002) "An efficient search procedure for the resource-constrained multi-project scheduling problem with discounted cash flows", *Constr. Manag. Econ.*, Vol. 20, No. 1: 55–66.

[6] Kim K. W., Gen M., Yamazaki G. (2003) "Hybrid genetic algorithm with fuzzy logic for resource-constrained project scheduling", *Appl. Soft Comput.*, Vol. 2, No. 3: 174–188.

[7] Kumanan S., Jose G. J., Raja K. (2006) "Multi-project scheduling using an heuristic and a genetic algorithm", *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol. 31, No. 3–4, pp. 360–366.

[8] Tseng L.-Y., Chen S.-C. (2006) "A hybrid metaheuristic for the resource-constrained project scheduling problem", *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 175, No. 2: 707–721.

[9] Gonçalves J. F., Mendes J. J. M., Resende M. G. C. (2008) "A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem", *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 189, No. 3: 1171–1190.

[10] Ziarati K., Akbari R., Zeighami V. (2011) "On the performance of bee algorithms for resource-constrained project scheduling problem", *Appl. Soft Comput.*, Vol. 11, No. 4: 3720–3733.

[11] Wu S., Wan H.-D., Shukla S. K., Li B. (2011) "Chaos-based improved immune algorithm (CBIIA) for resource-constrained project scheduling problems", *Expert Syst. Appl.*, Vol. 38, No. 4: 3387–3395.

[12] Wang L., Fang C. (2012) "A hybrid estimation of distribution algorithm for solving the resource-constrained project scheduling problem", *Expert Syst. Appl.*, Vol. 39, No. 3: 2451–2460.

[13] Nasiri M. M. (2013) "A pseudo particle swarm optimization for the RCPSP," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 65, No. 5–8: 909–918.

[14] Koulinas G., Kotsikas L., Anagnostopoulos K. (2014) "A particle swarm optimization based hyper-heuristic algorithm for the classic resource constrained project scheduling problem", *Inf. Sci. (Ny).*, Vol. 277, pp. 680–693.

[15] Fahmy A., Hassan T. M., Bassioni H. (2014) "Improving RCPSP solutions quality with Stacking Justification – Application with particle swarm optimization", *Expert Syst. Appl.*, Vol. 41, No. 13, pp. 5870–5881.

[16] Zhang L., Luo Y., Zhang Y. (2015) "Hybrid particle swarm and differential evolution algorithm for solving multimode resource-Constrained project scheduling problem", *Joural Control Sci. nad Eng.*, Vol. 2015.

[17] Jafarnejad Chaghoshi A. (2012) Modern production and operation management' University of Tehran press, Tehran, Iran.

[18] Mehregan M. (2012) 'Mathematical modeling' 4th edition, SAMT press, Tehran, Iran.

[19] Cheng M., Tran D., Cao M. (2014) "Hybrid multiple objective artificial bee colony with differential evolution for the time-cost-quality tradeoff problem", *KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS*. Elsevier B.V.

[20] Shahsavari por N., Modarres M., Aryanejad M. B., Tavakoli Moghadam R. (2010) "The discrete time-cost-quality trade-off problem using a novel hybrid genetic algorithm", *Appl. Math. Sci.*, Vol. 4, No. 42, pp. 2081–2094.

[21] Wolpert D. H., Macready W. G. (1997) "No free lunch theorems for optimization", *Evol. Comput. IEEE Trans.*, Vol. 1, No. 1, pp. 67–82.

[22] Kolisch R., Sprecher A. (1997) "PSPLIB - A project scheduling problem library", *Eur. J. Oper. Res.*, Vol. 96, No. 1, pp. 205–216.

[23] Yang X.-S. (2010) "Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation", *Int. J. Bio-Inspired Comput.*, Vol. 2, No. 2, pp. 78–84.

[24] Yousefi A. A., Ebrahim khani H. (2011) "Evaluation and development of firefly algorithm to solve the scheduling of workshop production problem' 9th international conference of industrial engineering", Tehran, Iran.

[25] Yang X. (2012) "Multiobjective firefly algorithm for continuous optimization", pp. 13–15.

[26] Cerny V. (1985) "Thermodynamical approach to the traveling salesman problem : An efficient simulation algorithm", *J. Optim. THEORY Appl.*, Vol. 45, No. l, pp. 41–51.

[27] Kirkpatrick S., Gelatt C. D.,. Vecchi M. P.(1983) "Optimization by Simulated Annealing", *Sceince*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–682.

[28] J. Doreo, Petrowski A., Siarry P., Taillard E. (2006) *Metaheuristics for Hard Optimization: Methods and Case Studies*, Springer-Verlang.

[29] Sajjadi S. Kh. A., Azimi P. (2015) "Optimizing the equipment of the bank brach with simulation and annealing algorithm", *Journal of Management Researches in Iran* (MRIJ), Vol. 58, pp. 65-86, (in Persian).

[30] Moraga R. J., DePuy G. W., Whitehouse G. E. (2006) *A Solution Methodology for Optimization Problems*, Taylor and Francis Group LLC.

[31] Talbi E.-G. (2009) *Metaheuristics: from design to implementation*, John Wiley & Sons.

[32] Tavana M., Abtahi A., Khalili-Damghani K. (2014) "A new multi-objective multi-mode model for solving preemptive time–cost–quality trade-off project scheduling problems", *Expert Syst. Appl.*, Vol. 41, pp. 1830–1846.

[33] Sadeghi A. (2010) "Solving the resource coonstrained project scheduling problem with firefly algorithm", Master thesis, University of Payam-e-Noor, Tehran, Iran.