



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، صص ۹۲-۱۲۲

نوع مقاله: پژوهشی

موازنه زمان-هزینه-کیفیت در شبکه‌های PERT با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم‌های تکاملی

احمد یوسفی هنومرور^۱، مقصود امیری^{۲*}، لعیا الفت^۳، علیرضا ناصر صدرآبادی^۴

۱. دانشجوی دکتری، مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

۲. استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

۳. استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

۴. استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده اقتصاد و مدیریت، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

چکیده

از اهداف مهم هر پروژه زمان، هزینه و کیفیت می‌باشند. امروزه، ذی‌نفعان هر پروژه به دنبال کاهش هزینه‌های کل پروژه همزمان با کاهش زمان و افزایش کیفیت پروژه می‌باشند. این مسئله پژوهشگران را به سوی توسعه مدل‌هایی که عامل کیفیت را به مدل‌های قبلی موازنه هزینه-زمان می‌افزاید، هدایت می‌کند. در این مقاله یک مدل موازنه زمان-هزینه-کیفیت با سه تابع هدف، کمینه کردن زمان ختم پروژه، کمینه کردن هزینه کل پروژه و بیشینه کردن کیفیت کل انجام فعالیت‌ها در یک شبکه PERT با فعالیت‌های چندحالتی مورد بررسی قرار گرفت. بعد از ارائه مدل ریاضی مناسب، بر اساس یک طرح آزمایش برای سطوح ممکن هر متغیر تصمیم تعیین گردید. سپس با استفاده از فرایند شبیه‌سازی، مقادیر تصادفی متغیرهای تصمیم و متغیرهای پاسخ در هر بار اجرا حاصل و با به‌کارگیری شبکه‌های عصبی، یک مدل شبکه عصبی برقرار گردید. برای حل این مدل، از آنجا که مسئله مورد نظر در مقوله NP-hard قرار می‌گیرد، از دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO استفاده گردید. برای ارزیابی کارایی مدل، مسائل مورد نظر در یک شبکه PERT با مقیاس‌های کوچک، متوسط و بزرگ آزمایش شد. پارامترهای این دو الگوریتم فراابتکاری به وسیله روش تاگوچی تنظیم و نتایج به دست آمده بر مبنای پارامترهای تنظیم شده نشان داد که الگوریتم NSGA-II نسبت به MOPSO عملکرد بهتری دارد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم MOPSO، الگوریتم NSGA-II، شبکه PERT، شبیه‌سازی، مدیریت پروژه.



۱- مقدمه

پروژه تلاشی است موقتی که به منظور ایجاد محصول، خدمت یا نتیجه‌ای یکتا تعهد می‌شود [۲۵]. مبحث مدیریت پروژه از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین مواردی است که دهه‌های توجهات زیاد را به خود جلب کرده است. در بین اجزای مدیریت پروژه، مبحث زمان‌بندی پروژه به جهت اهمیت و تأثیر به‌کارگیری آن در سطح مدیریت کلان، برنامه‌ریزی پروژه‌های واقعی صنعتی و اجرایی، جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است [۱۵]. زمان‌بندی پروژه یکی از وظایف و فعالیت‌های اصلی در مدیریت پروژه است [۱۴]. همچنین زمان‌بندی پروژه بخشی جدایی‌ناپذیر از مدیریت پروژه می‌باشد که تمایل به توازن بین اهداف رقابتی یک پروژه با حفظ محدوده پروژه را دارد. سه هدف اصلی مدیریت پروژه، زمان ختم پروژه، هزینه کل و کیفیت می‌باشند [۱۲]. اخیراً مدیران پروژه توجه بیشتری را به بهبود کیفیت پروژه از طریق کاهش زمان و هزینه مورد نیاز پروژه داده‌اند که این امر منجر به ایجاد مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت گسسته گردید [۲۶]. کشف چگونگی موازنه میان معیار زمان، هزینه، کیفیت در پروژه و اینکه صرف هزینه‌های بیشتر تا چه حد منجر به کاهش مدت زمان اجرای پروژه و همچنین عملکرد کیفی آن خواهد شد، موضوع اصلی این تحقیق می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن پیچیدگی ساختار پروژه‌ها، تعداد زیاد فعالیت‌ها، وجود چند حالت مختلف اجرا برای هر فعالیت، احتمالی بودن زمان اجرای فعالیت‌ها، رعایت روابط پیش‌نیازی‌های عمومی میان فعالیت‌های پروژه و همین‌طور چندهدفه بودن مسئله، تصمیم‌گیری برای مدیران جهت انتخاب از میان حالت‌های انجام فعالیت‌ها بسیار پیچیده بوده و نیاز به روشی که برای مسائلی در ابعاد بزرگ در زمان معقول جواب‌های قابل قبولی را ارائه کند، احساس می‌شود. مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت با یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، بهینه‌سازی می‌شود و از آن جهت که در این روش‌ها، امکان انتخاب ترکیبی از گزینه‌های مختلف، برای انجام فعالیت‌ها در هر زمان شدنی برای انجام پروژه وجود دارد، از نوع روش‌های بهینه‌سازی ترکیباتی^۵ و در زمره مسائل سخت‌تر بهینه‌سازی می‌باشند.

فرایند بعد از مدل‌سازی مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت استفاده از روش حل مناسب برای دستیابی به نتایج مطلوب می‌باشد. به طور کلی روش‌های حل مسائل موازنه در مدیریت پروژه به سه دسته الگوریتم‌های دقیق^۶، الگوریتم‌های ابتکاری^۷ و الگوریتم‌های فراابتکاری^۷ تقسیم می‌شوند [۱۸]. مقاله حاضر در بخش‌های اصلی زیر تنظیم شده است. در بخش دوم مرور اجمالی بر پیشینه تحقیقات انجام گرفته در زمینه موازنه زمان-هزینه-کیفیت بیان



می‌شود. سپس به بررسی مدل ریاضی مربوط به موازنه اهداف زمان، هزینه و کیفیت پرداخته خواهد شد. در بخش بعدی به بررسی و تعریف روش‌های حل مسئله مورد استفاده شامل شبیه‌سازی، شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری تکاملی الگوریتم ژنتیک چندهدفه مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب^۱ و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات^۲ خواهیم پرداخت. در نهایت با استفاده از یک مکانیسم ابتکاری مسائل نمونه در مقیاس‌های کوچک، متوسط و بزرگ تولید و نتایج به دست آمده مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- پیشینه تحقیق

بابو و سورش^۳ (۱۹۹۶) اولین مقاله را در ارتباط با تأثیر کیفیت پروژه بر زمان‌بندی پروژه را ارائه دادند. آن‌ها سه مدل برنامه‌ریزی خطی مرتبط را برای مطالعه موازنه بین زمان، هزینه و کیفیت در یک شبکه CPM قطعی توسعه دادند [۶]. خانگ و میت^۴ (۱۹۹۹) مدل پیشنهادی بابو و سورش (۱۹۹۶) را در یک پروژه واقعی ساخت کارخانه سیمان مورد استفاده قرار دادند. هدف از این کار ارزیابی قابلیت‌های این روش بر مبنای دیدگاه‌های مدیریتی حاصل شده و مسائل و مشکلاتی که با آن مواجهه شده‌اند [۱۹]. ژانگ و زینگ^۵ (۲۰۱۰) در نظر گرفتن پارامترهای مدل به صورت فازی و حل یک مثال با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه فازی و نتایج حاصله را با الگوریتم ژنتیک مقایسه کردند [۳۰]. طارقیان و طاهری (۲۰۰۶) سه مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح صفر و یک وابسته را برای مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت گسسته توسعه دادند. همچنین برای بهینه‌سازی مدل پیشنهادی خود از نرم‌افزار لینگو استفاده نمودند [۲۷]. منقسمی و همکاران (۲۰۱۵) از رویکرد استدلال اثبات شده برای زمان‌بندی پروژه برای شناسایی بهترین جواب پارتو برای مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت گسسته استفاده نمودند [۲۱]. شهسواری پور و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل ریاضی موازنه زمان-هزینه-کیفیت را با توجه به اینکه محدودیت کیفیت نباید کمتر از سطح مجاز تعریف شده باشد، ارائه دادند [۲۴]. وود^۶ (۲۰۱۷) مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت را در یک پروژه نفت و گاز مورد استفاده قرار داد. همچنین یک الگوریتم ممتیک متشکل از ۱۰ الگوریتم فراابتکاری برای توازن بین توجه به اکتشاف محلی و اکتشاف کلی از فضای جواب‌های ممکن در یک مسئله موازنه زمان-هزینه-کیفیت تصادفی را طراحی نمود [۲۹]. آذرون، پرکوز و ساکاو^۷ (۲۰۰۵) یک مدل چندهدفه برای موازنه زمان-هزینه در شبکه‌های پرت با در نظر گرفتن توزیع ارلانگ برای زمان انجام فعالیت‌ها را توسعه دادند [۴]. آذرون و توکلی مقدم (۲۰۰۷) مسئله تخصیص منابع را با ارائه



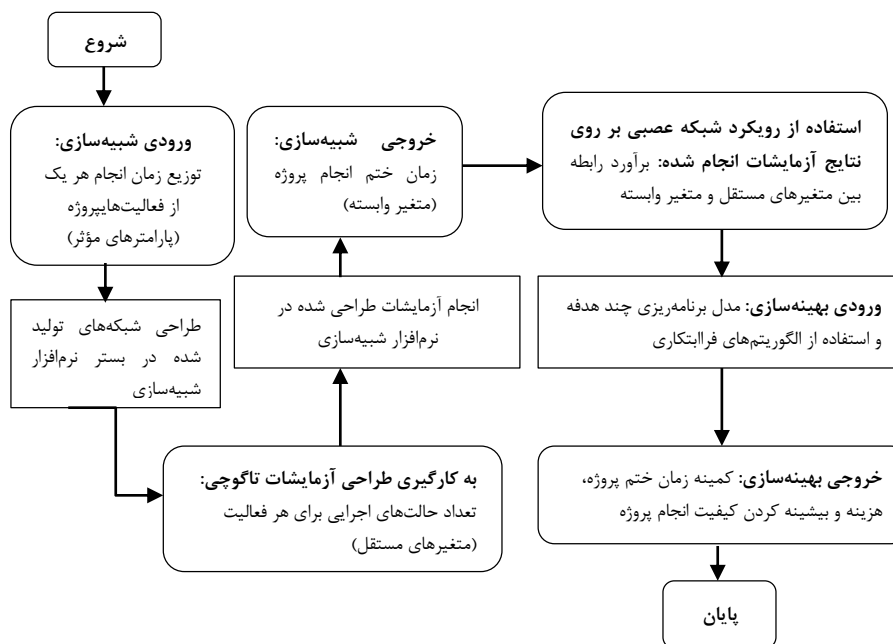
یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه احتمالی در شبکه‌های پرت پویا را مورد بررسی قرار دادند [۳]. با مرور ادبیات موضوع می‌توان برخی از خلأهای موجود در تحقیقات را مشاهده نمود. برخی از خلأها در زمینه نحوه تعریف مسئله موازنه اهداف چندگانه و برخی دیگر در زمینه رویکردهای حل استفاده شده می‌باشند. بنابراین کمبودهای موجود در این مسائل از دو جنبه "ایجاد و توسعه مدل‌های نزدیک‌تر به دنیای واقعی" و "توسعه و بهبود روش‌های حل مسائل موازنه" مطرح است. در این پژوهش مسئله اصلی، تعیین حالت هر یک از فعالیت‌های پروژه با مدنظر قرار دادن تعداد زیاد فعالیت‌ها، وجود چند حالت مختلف اجرا برای هر فعالیت، احتمالی بودن زمان اجرای فعالیت‌ها، رعایت روابط پیش‌نیازی‌های عمومی میان فعالیت‌های پروژه و همین‌طور چندهدفه بودن مسئله می‌باشد. با در نظر گرفتن تمام این موارد در زمان‌بندی پروژه، مدل طراحی شده به دنیای واقعی نزدیک‌تر شده و همچنین با ارائه راه‌حل مطرح شده در این تحقیق یک نوآوری هم در روش حل این‌گونه از مسائل ایجاد گردید.

۳- روش‌شناسی پژوهش

از منظر اعتبار نتیجه و خروجی پژوهش این پژوهش از نوع توسعه‌ای و کاربردی است. از نظر روش انجام پژوهش، با توجه به توسعه مدل ریاضی و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، روش انجام پژوهش شبه آزمایشی می‌باشد. بعد از تعیین چارچوب کلی مسئله تحقیق، اولین گام مطالعه ادبیات تحقیق برای شناسایی کلیدواژه‌های اصلی تحقیق به منظور کسب دانایی و مشخص شدن جایگاه تحقیق در میان مطالعات انجام شده قبلی می‌باشد. در گام دوم مدل‌سازی مسئله در قالب یک مدل ریاضی ارائه شد. در گام سوم، بر اساس یک طرح آزمایش (تعیین سطوح ممکن برای هر متغیر تصمیم) داده‌های ساختاریافته جمع‌آوری شده و در نهایت یک رابطه ریاضی بین دو دسته متغیر (متغیرهای تصمیم قابل‌کنترل و متغیرهای هدف (پاسخ)) برقرار می‌شود. در این مرحله از طراحی آزمایشات استفاده شد. سپس با استفاده از شبیه‌سازی مدل‌سازی نرم‌افزاری و مدل به تعداد کافی اجرا گردید. سپس بر اساس جدول نهایی از اجراهای مدل شبیه‌سازی که هر سطر این جدول متناظر با یک اجراست و در هر ستون آن نیز مقادیر تصادفی متغیرهای تصمیم و متغیرهای پاسخ در هر بار اجرا درج شده است، با به‌کارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی، یک مدل شبکه عصبی برقرار می‌کنیم. در نهایت تابع هدف به دست آمده در مرحله قبل به عنوان تابع تناسب در الگوریتم‌های فراابتکاری به کار برده شده و با اضافه کردن محدودیت‌های ریاضی به آن و از



حل آن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم را مشخص می‌نماییم. در گام چهارم، اعتبارسنجی مدل انجام گردید. در نهایت نتایج حاصل از مدل پیشنهادی، به علت نبود مسائل مشابه، با تولید مسائل مختلف در سه بعد کوچک، متوسط و بزرگ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت ایجاد مبنایی برای مقایسه کارایی و عملکرد روش‌های حل الگوریتم‌های فراابتکاری، از چندین شاخص کاربردی برای مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه استفاده می‌شود.



شکل ۱: چارچوب نظری تحقیق

۴- بیان مسئله و مدل‌سازی مسئله

در این بخش به بررسی و تعریف مدل برنامه‌ریزی مورد استفاده شده در این مقاله خواهیم پرداخت. این بخش شامل تعیین و تعریف پارامترها، اندیس‌ها، توابع هدف و محدودیت‌های مدل برنامه‌ریزی ریاضی می‌باشد.

۴-۱- تعیین و تعریف پارامترها و اندیس‌های مدل

پارامترها هر مدل ریاضی در واقع مقداری است که می‌توان مقدار آن را در هنگام اجرای تابع، به تابع ارسال کرد. سپس تابع مقدار این پارامترها را در دستورات خود استفاده می‌کند.



هر تابع می‌تواند چندین پارامتر داشته باشد. جدول (۱) اندیس‌ها (شمارنده‌ها)، پارامترهای مدل و توضیحات مربوط به آن را نشان می‌دهد.

جدول ۱: اندیس‌ها و پارامترهای مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت

اندیس‌ها		
$i = 1, 2, \dots, n$	اندیس فعالیت‌ها	i
$j = 1, 2, \dots, n$	اندیس فعالیت‌ها	j
$k = 1, 2, \dots, r(i)$	اندیس حالت‌ها یا مدهای اجرایی	k
$r = 1, 2, \dots, m$	اندیس تعداد توابع هدف	r
پارامترها		
	شبکه نمایش گره‌ای (AON) برای پروژه	$G = (N, A)$
	مجموعه فعالیت‌ها	$N = n_1, n_2, \dots, n_n$
	مجموعه روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها	$A = a_1, a_2, \dots, a_m$
	تعداد حالت‌های اجرایی فعالیت i	$r(i)$
	هزینه مستقیم فعالیت i در حالت اجرایی k	c_{ik}
	زمان احتمالی انجام فعالیت i در حالت اجرایی k	\tilde{t}_{ik}
	کیفیت انجام فعالیت i در حالت اجرایی k	q_{ik}
	تأخیر یا تعجیل زمانی بین فعالیت‌های پیش‌نیاز i و j	d_{ij}
	زمان تعیین شده برای اتمام پروژه در موعد مقرر	D
	وزن تخصیص داده شده به کیفیت هر فعالیت	w_i

۲-۴ - تعیین و تعریف متغیرهای تصمیم

در مسائل زمان‌بندی پروژه، متغیر تصمیم در برگیرنده تعیین زمان شروع فعالیت و مد (حالت) اجرایی برای هر فعالیت به نحوی که توابع هدف در وضعیت مطلوبی قرار گیرد، می‌باشد. جدول (۲) متغیرهای تصمیم و توضیحات مربوط به آن را نشان می‌دهد.

جدول ۲: متغیرهای تصمیم مسئله

متغیرها	
انجام فعالیت i در حالت اجرایی k	x_{ik}



زمان شروع فعالیت i در حالت اجرایی k	S_{ik}
زمان شروع فعالیت z در حالت اجرایی k	S_{jk}

۳-۴- طراحی مدل نهایی برنامه‌ریزی ریاضی

در نهایت با توجه به اندیس‌ها، پارامترها، توابع هدف، محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم که در بالا به آن پرداخته شد، مدل نهایی مسئله موازنه زمان، هزینه، کیفیت با فرضیات تعریف شده برای آن به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود.

$$\text{Minimize } T = C_{max} = \text{Max} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{ik} x_{ik} \right) = S_{n+1} \quad (1-1)$$

$$\text{Minimize } C = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} c_{ik} x_{ik} \quad (1-2)$$

$$\text{Maximize } Q = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} w_i q_{ik} x_{ik} \right) / \sum_{i=1}^n w_i \quad (1-3)$$

Subject to:

$$\sum_{k=1}^{r(i)} x_{ik} = 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-4)$$

$$s_{ik} + d_{ij} \leq s_{jk}, j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-5)$$

$$s_{ik} + d_{ij} \leq s_{jk} + \sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{jk} x_{jk}, j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-6)$$

$$\sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{ik} x_{ik} + s_{ik} + d_{ij} \leq s_{jk}, j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-7)$$

$$\sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{ik} x_{ik} + s_{ik} + d_{ij} \leq s_{jk} + \sum_{k=1}^{r(i)} \tilde{t}_{jk} x_{jk}, j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-8)$$

$$T \leq D \quad (1-9)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} c_{ik} x_{ik} \leq B \quad (1-10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{r(i)} q_{ik} x_{ik} \geq Q \quad (1-11)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-12)$$

در این مدل روابط تعریف شده به صورت زیر می‌باشند:



روابط (۱-۱)، (۲-۱) و (۳-۱) به ترتیب تابع هدف حداقل کردن زمان، تابع هدف حداقل کردن هزینه و تابع حداکثر کردن کیفیت پروژه را نشان می‌دهند. رابطه (۴-۱) بیانگر این است که هر فعالیت پروژه تنها باید یک حالت اجرا داشته باشد. رابطه (۵-۱)، این رابطه برای تمامی فعالیت‌های مجموعه A_{SS} نوشته می‌شود. در این رابطه، مجموع زمان شروع فعالیت i در مجموعه A_{SS} و تأخیر یا تعجیل زمانی مشخص، بایستی کوچکتر مساوی با زمان شروع فعالیت پس‌نیازی j باشد تا رابطه پیش‌نیازی شروع به شروع (SS) محقق شود. رابطه (۱-۶)، این رابطه برای تمامی فعالیت‌های مجموعه A_{SF} نوشته می‌شود. در این رابطه، مجموع زمان شروع فعالیت i در مجموعه A_{SF} و تأخیر یا تعجیل زمانی مشخص، بایستی کوچکتر مساوی با مجموع زمان شروع فعالیت پس‌نیازی j و مدت زمان نیاز برای انجام فعالیت j باشد تا رابطه پیش‌نیازی شروع به پایان (SF) محقق شود. این رابطه برای تمامی فعالیت‌های مجموعه A_{FS} نوشته می‌شود. در این رابطه، مجموع زمان شروع فعالیت i در مجموعه A_{FS} ، زمان مورد نیاز برای اتمام آن فعالیت و تأخیر یا تعجیل زمانی معین بایستی کوچکتر مساوی با زمان شروع فعالیت پس‌نیازی j باشد تا رابطه پیش‌نیازی پایان به شروع (FS) محقق شود.

رابطه (۱-۸)، این رابطه برای تمامی فعالیت‌های مجموعه A_{FF} نوشته می‌شود. در این رابطه، مجموع زمان شروع فعالیت i در مجموعه A_{FF} ، زمان مورد نیاز برای اتمام آن فعالیت و تأخیر یا تعجیل زمانی مشخص بایستی کوچکتر مساوی با مجموع زمان شروع فعالیت پس‌نیاز j و مدت زمان نیاز برای انجام فعالیت j باشد تا رابطه پیش‌نیازی پایان به پایان (FF) محقق گردد. رابطه (۱-۹)، این رابطه تضمین‌کننده اتمام پروژه در موعد مقرر می‌باشد. رابطه (۱-۱۰) این رابطه تضمین می‌نماید، کل هزینه (بودجه) تخصیص گرفته شده برای فعالیت‌ها برای اتمام پروژه از مقدار مشخص شده یعنی مقدار B تجاوز ننماید. رابطه (۱-۱۱) این رابطه نمایش دهنده پایین‌ترین مقدار مجاز برای کیفیت پروژه می‌باشد. رابطه (۱-۱۲) نشان دهنده این است که x_{ik} یک متغیر صفر و یک می‌باشد. به عبارتی اگر فعالیت i در حالت k انجام شود مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر را خواهد گرفت. در رابطه با مدل نهایی طراحی شده باید گفت، پس از بررسی منابع موجود در این زمینه



اعم از مقالات، پایان‌نامه‌ها و کتاب‌های مرتبط با موضوع، عمده محدودیت‌های این پژوهش از مقالات و ادبیات موجود در ارتباط با موضوع، جمع‌آوری شده و در قالب یک مدل کلی ارائه گردید. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به پژوهش مانگل و همکاران (۲۰۱۳)، طارقیان و طاهری (۲۰۰۶) و شهسواری‌پور و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد [۲۲، ۲۴، ۲۷].

۴-۴- مفروضات مدل برنامه‌ریزی ریاضی

- روش نمایش شبکه به صورت یک شبکه گره‌ای (AON) مربوط به یک پروژه به صورت یک گراف بدون دور (غیر حلقه‌ای)، همبند و جهت‌دار به صورت $G = (N, A)$ می‌باشد.

- هر فعالیت می‌توان دارای چند حالت اجرایی باشد.

- روابط پیش‌نیازی بین فعالیت‌ها به صورت روابط پیش‌نیازی عمومی تعریف می‌شود.

- مدت زمان اجرای یک فعالیت احتمالی و دارای یک تابع توزیع آماری می‌باشد.

- در طول انجام فعالیت حالت اجرایی انجام آن ثابت است.

- توقف فعالیت‌ها زمانی که شروع می‌شوند امکان‌پذیر نیست.

- سه هدف متعارض با هم شامل زمان، هزینه و کیفیت وجود دارند.

- حدود بالا و پایین مشخصی برای زمان، هزینه و کیفیت پروژه تعریف می‌گردد.

برای اعتبارسنجی مدل ریاضی پیشنهادی، نخست مدل‌های ریاضی معتبر که توسط افراد سرشناس در مدل‌سازی ریاضی زمان‌بندی پروژه ارائه شده‌اند، مبنای طراحی مدل قرار خواهد گرفت. سپس از نظر خبرگان و اهل فن مدل‌سازی در خصوص مدل مورد مطالعه استفاده گردید. در نهایت مدل در مقیاس کوچک و با در نظر گرفتن یک سری پارامتر پیش‌فرض در نرم‌افزار GAMS مدل‌سازی و اجرا شد. همچنین با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت مدل، برخی از پارامترهای پیش‌فرض را به منظور نشان دادن میزان بالقوه‌ای که در آن خطا برای یک سطح خطای مشخص افزایش می‌یابد، مورد بررسی قرار دادیم. برای مثال با تغییر هر کدام از روابط پیش‌نیازی پروژه تأثیر آن بر روی تابع هدف زمان مورد بررسی قرار گرفت.

۵- شبیه‌سازی

امروزه در بازار رقابتی، شرکت‌ها و سازمان‌ها به دنبال آن هستند تا با طراحی اثربخش و کارای عملیات سیستم، راه‌های جدیدی برای جلوگیری از اتلاف بیابند؛ به عبارت دیگر به دنبال



استفاده از روش‌ها و ابزارهایی برای بهینه‌سازی عوامل کلیدی سیستم هستند تا بدین وسیله اثربخشی را افزایش داده و درصحنه رقابت باقی بمانند. شبیه‌سازی رایانه‌ای اثربخش‌ترین ابزار برای طراحی و تحلیل سیستم‌ها است. شبیه‌سازی علم و هنر ایجاد مدلی از یک پروسه یا سیستم، به منظور ارزیابی و آزمایش راهبردها می‌باشد [۲].

یکی از نرم‌افزارهای مورد استفاده برای امر شبیه‌سازی برای سیستم‌ها و مدل‌های مختلف، نرم‌افزار سرمایه‌گذاری پویا (ED) می‌باشد. ED یک نرم‌افزار شیء‌گرا برای مدل سازی، شبیه‌سازی، تجسم و کنترل فرایندهای پویا است. بنابراین کاربر می‌تواند شیء‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی را از بین اشیاء استاندارد موجود که اتم نامیده می‌شود، انتخاب نماید. در حقیقت این اتم‌ها هستند که نقش عناصر، اشیاء و یا موجودیت‌های مختلف در یک سیستم شبیه‌سازی را ایفا می‌کنند [۵]. مهم‌ترین اتم‌های که در این مقاله برای شبیه‌سازی انواع مدل‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته شامل اتم Product این اتم قابلیت حرکت درون اتم‌های دیگر را دارا می‌باشد. اتم Source در این مقاله از این اتم برای ایجاد و تولید اتم Product برای شروع تولید نهادی که باید وارد سیستم شود، استفاده می‌گردد. اتم Server در این مقاله به جای هر یک از فعالیت‌های پروژه از این اتم استفاده می‌شود. اتم Queue در این پژوهش از اتم Queue در شبکه پروژه در هر قسمت که فعالیتی نیاز به تأخیر زمانی دارد و یا جایی که چندین فعالیت پیش‌نیاز یک فعالیت باشد، استفاده می‌شود.

قبل از طراحی مدل شبیه‌سازی با استفاده از طراحی آزمایشات، سطوح ممکن برای هر متغیر تصمیم تعیین گردید. سپس با استفاده از فرایند شبیه‌سازی، مقادیر تصادفی متغیرهای تصمیم و متغیرهای پاسخ در هر بار اجرا حاصل شد. در این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی سعی شده است تا از میان گزینه‌های موجود یعنی حالت‌ها یا مدهای مختلف اجرایی برای هر فعالیت چند گزینه را به منظور بررسی و شناسایی بهینه‌ترین حالت انتخاب نماییم. در این مرحله با توجه به تعداد مؤلفه‌ها، سطوح آزمایش مشخص می‌شود. به طور مثال اگر هر فعالیت مجاز به داشتن ۵ حالت اجرایی مختلف باشد، سطوح آزمایش به صورت اعداد ۱ تا ۵ مشخص خواهند گردید. در این مقاله از آنجا که زمان مربوط به انجام پروژه احتمالی می‌باشد و بایستی آن را تخمین زد، برای جلوگیری از تخمین‌های غیرواقعی از شبیه‌سازی استفاده می‌شود.



۶- شبکه‌های عصبی

هدف از این بخش از تحقیق ارائه شبکه عصبی مناسب است تا از طریق آن بتوان زمان پروژه را با دقت قابل قبولی برآورد نمود. به طور کلی برای انتخاب مشخصات و پارامترهای این شبکه به صورت زیر عمل شد:

انتخاب شبکه نوع الگوریتم: با توجه به هدف مورد نظر از شبکه عصبی، نوع شبکه و الگوریتم انتخاب می‌گردد. برای طبقه‌بندی و تقریب تابع مناسب‌ترین شبکه، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه با روش یادگیری پس انتشار (انتشار برگشتی) می‌باشد.

تعداد نورون‌های لایه‌های شبکه مورد نظر: در این پژوهش برای تعداد نورون‌های لایه میانی سه سطح در نظر گرفته خواهد شد و با استفاده از تنظیم پارامتر مشخص می‌گردند. تعداد نورون‌های لایه ورودی یا لایه اول شبکه به تعداد متغیرهای مسئله می‌باشد. تعداد نورون‌های لایه خروجی نیز دارای یک نورون می‌باشد.

تعداد لایه میانی یا لایه پنهان: برای یافتن بهترین تعداد لایه پنهان، شبکه‌های عصبی مختلف با تعداد ۱ تا ۳ لایه پنهان، ساخته و اجرا خواهد شد.

تعیین وزن‌ها و بایاس‌ها: بعد از این که داده‌های آموزش به شبکه عصبی وارد شد، فرایند آموزش شروع می‌گردد. وزن‌ها و بایاس‌ها پس از هر بار محاسبه خطا تغییر کرده تا معیار توقف برآورده شود. در نهایت وزن‌ها و بایاس‌ها تثبیت شده و شبکه آموزش یافته است.

توابع فعالیت: انتخاب توابع فعالیت بر اساس پاسخگویی خوب آن‌ها در زمینه‌های مختلف است. در این پژوهش برای لایه‌های پنهان از تابع تانژانت زیگموند (Tansig) و برای لایه خروجی از تابع خطی (Purelin) استفاده نموده‌ایم. همچنین برای آموزش از الگوریتم تابع پس انتشار لونبرگ مارکوات (Levenberg - Marquardt(LM)) استفاده خواهد شد.

تقسیم داده‌ها: به منظور آموزش شبکه‌های عصبی از بخشی از داده‌ها استفاده می‌شود که به آن‌ها داده‌های آموزش گفته می‌شود. سایر داده‌ها که در فرایند آموزش استفاده نمی‌شوند، برای آزمایش و بررسی عملکرد شبکه استفاده می‌شوند که اصطلاحاً به آن‌ها داده‌های آزمون (آزمایش) می‌گویند. انتخاب داده‌های آموزش و آزمایش باید طبق روال کلی و به صورت تصادفی باشد.

ارزیابی عملکرد مدل شبکه عصبی: برای ارزیابی عملکرد این شبکه از معیارهای میانگین مربع خطا (MSE) و ضریب تعیین یا مجذور ضریب همبستگی (R^2) استفاده خواهد شد.

برای تنظیم پارامترهای شبکه عصبی، معیار تنظیم پارامتر شاخص ترکیبی میانگین مربع



خطا (MSE) و ضریب تعیین یا مجذور ضریب همبستگی (R^2) بوده که به صورت $\frac{MSE}{R^2}$ محاسبه می‌شود. سپس با توجه به سه پارامتر و داشتن سه سطح برای هر کدام از طرح L_9 تاگوچی استفاده شد. جدول (۳) خلاصه مشخصات و پارامترهای شبکه‌های عصبی بکار گرفته شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۳: پارامترها و مشخصات شبکه عصبی

معیارهای ارزیابی و اندازه‌گیری	مسائل کوچک	مسائل متوسط	مسائل بزرگ
تعداد لایه‌ها	۲	۲	۱
تعداد نورون در لایه‌های پنهان	۱۰	۲۰	۳۰
تعداد نورون در لایه خروجی	۱	۱	۱
الگوریتم آموزشی	لونیبرگ-مارکواردت	لونیبرگ-مارکواردت	لونیبرگ-مارکواردت
تعداد دفعات آموزش (Epoch)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
نرخ یادگیری	۰/۳	۰/۲	۰/۲
تابع فعالیت لایه‌های پنهان	تانژانت زیگموند	تانژانت زیگموند	تانژانت زیگموند
تابع فعالیت لایه خروجی	خطی	خطی	خطی
تعداد داده‌های آموزش	۷۰ درصد داده‌ها	۷۰ درصد داده‌ها	۷۰ درصد داده‌ها
تعداد داده‌های آزمایش	۲۰ درصد داده‌ها	۲۰ درصد داده‌ها	۲۰ درصد داده‌ها
تعداد داده‌ها برای اعتبارسنجی آموزش	۱۰ درصد داده‌ها	۱۰ درصد داده‌ها	۱۰ درصد داده‌ها

۷- الگوریتم ژنتیک چندهدفه مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب

مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده در این پژوهش با توجه به زمان و دشواری‌های حل در زمره مسائل Hard-NP قرار می‌گیرد [۲۴، ۲۸]. از این رو برای حل این مسئله از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک چندهدفه مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب اولین بار توسط دب و همکارانش در سال ۲۰۰۰ ارائه گردید [۱۱]. جهت حل مدل ارائه شده در این پژوهش از طریق باز طراحی و متناسب‌سازی الگوریتم NSGA-II مراحل زیر انجام گردید:

طراحی ساختار کروموزوم: برای مسئله زمان‌بندی به هر فعالیت پروژه دو ژن تعلق می‌گیرد که در نهایت کروموزوم به یک ساختار دو بعدی تبدیل می‌گردد. در بعد اول مقدار ژن بیانگر این است که فعالیت مرتبط باید در کدام یک از حالت‌های مخصوص به خود انجام شود (m_i). در بعد دوم مقدار هر ژن بیانگر زمان شروع هر فعالیت یعنی s_i می‌باشد. چند سلول نیز به انتهای هر کروموزوم جهت نگهداری مقدار نرمال‌سازی شده توابع برازندگی



مربوط به کروموزوم اضافه می‌شود.

در این مسئله هر جواب، مجموعه‌ای از مقادیر صحیح که بیانگر مد (حالت اجرایی) انتخاب شده برای هر فعالیت که عددی بین ۱ تا تعداد مدهای تعریف شده برای آن فعالیت است، می‌باشد.

$$[m_1, m_2, \dots, m_n]: m_i \in [1, M_i]$$

برای مثال یک جواب برای پروژه‌ای با ۱۰ فعالیت و حداقل ۳ حالت اجرایی برای هر فعالیت می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$[1, 2, 3, 1, 1, 2, 1, 2, 3]$$

ارزیابی توابع برانندگی: بر اساس منطق حاکم بر این الگوریتم، هر کروموزوم از طریق نحوه پاسخ تولید شده توسط آن کروموزوم تعیین می‌گردد. بدین صورت که بعد از استفاده از الگوریتم، رتبه‌بندی سریع و محاسبه فاصله ازدحام برای هر پاسخ با اعمال الگوریتم فاصله ازدحام، با کمک اپراتور مقایسه ازدحام هر پاسخی که دارای فاصله ازدحام بیشتری بود به نسل بعدی انتقال می‌یابد.

رتبه‌بندی نامغلوب سریع از جمعیت والدین: جمعیت بر مبنای نامغلوب بودن ذخیره می‌شود. به هر جمعیت یک رتبه تخصیص داده می‌شود که برابر است با سطح نامغلوب بودن یا اعضای جبهه پارتو (عدد ۱ بهترین سطح، ۲ سطح بهترین بعدی و الی آخر). برای شناسایی جواب‌های اولین جبهه پارتو (F_1) در یک جمعیت با اندازه k هر جمعیت می‌تواند با سایر جواب‌ها در جمعیت مقایسه شده تا اگر آن را مغلوب کرد، پیدا شود. در این مرحله تمام جواب‌های منحصربه‌فرد در جبهه پارتو اول کشف می‌شود. بنابراین این جواب‌ها، اولین مرز را به عنوان مرز جواب‌های نامغلوب تشکیل می‌دهند. برای کشف جواب‌های یکتا در جبهه پارتو بعدی، جواب‌های اولین جبهه به طور موقت نادیده گرفته می‌شوند و این رویه دوباره تکرار می‌گردد. این فرایند تا زمانی که تمام جواب‌ها درون مرزهای نامغلوب قرار گیرند ادامه می‌یابد.

محاسبه فاصله ازدحامی: مرتب کردن جواب‌های نامغلوب راهی است در جهت رسیدن به جواب‌های بهتر و فاصله ازدحامی نیز برای تنوع گستردگی در این جواب‌ها می‌باشد. برای به دست آوردن تخمینی از چگالی (تراکم) جواب‌های اطراف یک جواب خاص در جمعیت، میانگین فاصله از دو نقطه از دو سمت این نقطه در طول هر یک از جواب‌ها محاسبه می‌شود. این مقدار به عنوان تخمینی از فضای مستطیلی شکل گرفته از طریق نزدیک‌ترین همسایه‌ها به عنوان رئوس مستطیل می‌باشد. این فاصله، فاصله ازدحامی نامیده می‌شود.



استراتژی انتخاب: انتخاب جمعیت والد برای تولید جمعیت جدید با استفاده از عملگر مقایسه ازدحامی انجام می‌شود. این عملگر، فرایند انتخاب در مراحل مختلف الگوریتم را به سمت جبهه بهینه پارتو یکنواخت شده هدایت می‌کند. به عبارتی این عملگر دو جواب را با هم مقایسه کرده و پیروز مسابقه را مشخص می‌کند.

طراحی عملگرها: عملگر تقاطع بر روی دو کروموزوم والد حاصل از عملگر انتخاب، با احتمال تقاطع (P_c) عمل می‌کند. در نتیجه ترکیب دو والد، فرزند جدیدی را به وجود می‌آورد. به عبارتی بر مبنای نرخ تعیین شده برای انجام تقاطع (P_c) دو والد با استفاده از استراتژی انتخاب شده و عمل تقاطع انجام می‌شود. در اینجا از یک اپراتور تقاطع دو نقطه‌ای استفاده می‌شود. دو عدد تصادفی r_1 و r_2 تولید شده که به ترتیب موقعیت و طول رشته‌ای هستند که بایستی فرزند را به وجود آورند. برای مثال دو والد زیر را در نظر بگیرید:

والد ۱: [۱, ۲, ۳, ۳, ۱, ۱, ۲, ۱, ۲, ۳]
والد ۲: [۱, ۲, ۱, ۳, ۱, ۲, ۱, ۳, ۲]

اگر $r_1 = ۲$ و $r_2 = ۶$ باشند فرزندان به صورت زیر می‌باشند:

فرزند ۱: [۱, ۲, ۱, ۳, ۱, ۲, ۱, ۲, ۳]
فرزند ۲: [۱, ۲, ۳, ۳, ۱, ۱, ۲, ۱, ۳, ۲]

برای ممانعت از گیر افتادن در دام بهینه محلی، از عملگر جهش استفاده می‌شود. در این مقاله برای عملگر جهش مقدار یکی از ژن‌های کروموزوم که به صورت اتفاقی و بر مبنای نرخ جهش (P_m) انتخاب شده است، با یک عدد تصادفی دیگر جایگزین می‌شود.

یعنی ابتدا یک عدد تصادفی بین ۱ و تعداد کل فعالیت‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شود (r_1)، سپس یک مجموعه از اعداد صحیح تصادفی با r_1 عضو که بیانگر فعالیت‌های است که باید عمل جهش روی آن‌ها انجام شود ایجاد می‌شود. سپس برای هر فعالیت انتخاب شده مد آن از طریق اعداد تصادفی در یک بازه امکان‌پذیر تولید می‌شود. برای مثال جواب زیر را در نظر بگیرید:

جواب اولیه: [۱, ۲, ۳, ۳, ۱, ۱, ۲, ۱, ۲, ۳]

ابتدا r_1 در بازه [۱, ۱۰] تولید می‌شود، فرض کنید این مقدار برابر با ۳ باشد. سپس یک مجموعه از فعالیت‌ها که مدایشان از نو تولید خواهند شد، ایجاد می‌شود که برای مثال فرض کنید $\{۱, ۴, ۱۰\}$ باشد. در نهایت جواب جهش‌یافته به صورت زیر می‌باشد (مدهای



جایگزین شده به ترتیب ۲، ۱ و ۲ هستند):

[۲، ۲، ۳، ۱، ۱، ۲، ۱، ۲، ۲]

جواب جهش‌یافته

با استفاده از عملگر نخبه‌گرایی، درصد مشخصی از بهترین جواب‌های هر نسل به نسل

بعدی منتقل می‌شود.

۸- الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ریشه در تقلید از حرکات دسته‌جمعی پرندگان در هنگام پرواز گروهی دارد. جمعیت آن‌ها ازدحام (Swarm) و جواب‌های بالقوه ذرات (Particles) نامیده می‌شوند [۱]. به طور کلی قوانین منطقی خاصی بر نحوه رفتار و عملکرد موجودات اجتماعی از جمله پرندگان حاکم است. پرندگان تنها با تنظیم حرکات فیزیکی خودشان با اجتناب از تصادف با یکدیگر به دنبال غذا می‌گردند. از نظر تئوری هر پرنده به عنوان یکی از اعضای گروه از تجربه‌های قبلی خود و یا تجربیات سایر پرندگان برای یافتن غذا بهره می‌برد. در نتیجه ایده اصلی این الگوریتم، تسهیم اطلاعات بین اعضای گروه است [۲۳]. به طور کلی بر مبنای مقاله کوئلو و لچوگا (۲۰۰۲) گام‌های الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات به صورت تعریف می‌گردد [۹]:

۱- ایجاد جمعیت تصادفی اولیه و ارزیابی آن‌ها

در این مرحله تعداد مشخص از ذرات که هر یک حکم یک جواب بالقوه برای مسئله را دارند با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. بر اساس ویژگی‌های مسئله موازنه زمان، هزینه و کیفیت پروژه ساختار ازدحام مناسبی جهت حل مسئله به وسیله الگوریتم MOPSO تعریف می‌گردد. در این نوع از مسائل هر ذره دارای دو بعد می‌باشد که به آن‌ها مقداردهی می‌شود. مقدار داده شده به بعد اول نشان دهنده این است که فعالیت مربوطه باید در کدام یک از مدها یا حالت اجرایی (m_i) خود انجام شود. مقدار داده شده به بعد دوم نشان دهنده زمان شروع فعالیت مربوطه (s_i) است.

۲- مقداردهی اولیه به سرعت هر ذره

۳- ارزیابی هر ذره از جمعیت: در این مرحله بهترین خاطره شخصی هر ذره تعیین

می‌گردد. در این الگوریتم برای ارزیابی جواب‌ها از مقدار توابع هدف استفاده می‌شود.

۴- ذخیره کردن موقعیت‌های ذرات در مخزن که بیانگر بردارهای نامغلوب است.

۵- بخش‌بندی فضای جواب‌های نامغلوب



در این مرحله فضای جواب‌های نامغلوب به مکعب‌های چندبعدی تقسیم می‌شود. در این مقاله از آنجایی که سه تابع هدف داریم در یک فضای سه‌بعدی توابع هدف را بخش‌بندی (جدول‌بندی) می‌نماییم.

۶- تعیین ذره رهبر توسط هر یک ذرات از آرشیو برای حرکت در فضای جستجو زمانی که ذرات قصد حرکت در داخل فضای جستجو را دارند، یک عضو از مخزن را به عنوان رهبر انتخاب می‌کنند. رهبر باید عضو مخزن و همچنین یک جواب نامغلوب باشد. برای این کار بایستی بین خانه‌های جدول‌بندی شده جستجو را انجام دهیم و خانه‌های را که دارای جواب نامغلوب هستند، تعیین نماییم و در نهایت یک بخش را انتخاب کنیم. انتخاب بخش مدنظر با استفاده از چرخ رولت صورت می‌پذیرد.

۷- به‌روزرسانی بهترین خاطره شخصی هر ذره: بعد از به‌روزرسانی جواب‌ها با استفاده از روابط، سه حالت ممکن است رخ دهد. حالت اول این که اگر بهترین مقدار جواب فعلی که توسط خود ذره تجربه شده است، توسط موقعیت فعلی ذره مغلوب شود؛ آنگاه بهترین تجربه شخصی (خاطره) با موقعیت فعلی جایگزین می‌گردد. به بیان ریاضی خواهیم داشت:

$$\overline{xp}_i(t+1) = \overline{x}_i(t+1) \quad (1-13)$$

حالت دوم اینکه موقعیت جدید توسط بهترین خاطره مغلوب شود که در این حالت کاری انجام نمی‌دهیم. به بیان ریاضی:

$$\overline{xp}_i(t) = \overline{xp}_i(t+1) \quad (1-14)$$

حالت سوم اینکه بهترین تجربه شخصی و موقعیت فعلی هیچ‌کدام از یکدیگر بهتر نبوده و یا همدیگر را مغلوب نکنند که در این حالت به تصادف یکی را به عنوان بردار بهترین موقعیت در نظر می‌گیریم.

۸- اضافه شدن جواب‌های نامغلوب جمعیت فعلی به آرشیو

۹- حذف جواب‌های مغلوب از آرشیو: در این مرحله جواب‌های مغلوب از آرشیو حذف می‌گردند. این جواب‌ها ممکن است جزء جواب‌های قدیمی و یا اینکه جواب‌های جدید باشند.

۱۰- در صورتی که تعداد آرشیو بیش از ظرفیت تعیین شده باشد، اعضای اضافی نیز حذف می‌شوند.

۱۱- اگر شرایط خاتمه محقق نشده باشد، به مرحله ۵ باز می‌گردیم در غیر این صورت الگوریتم خاتمه یافته است.



۹- آزمایشات و نتایج نهایی

در این بخش الگوریتم‌های پیشنهادی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در نهایت عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی با هم مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. همچنین لازم به ذکر است که الگوریتم‌های مورد مطالعه در این مقاله، در نرم‌افزار MATLAB 2013a کد نویسی و در یک سیستم کامپیوتری با مشخصات RAM- 4GB و CPU- 2/3 GHZ پیاده‌سازی شد.

۹-۱- تولید مسئله

در این پژوهش به علت عدم وجود مسائل مرجع برای زمان‌بندی پروژه چندحالتی، چندهدفه و موازنه اهداف زمان، هزینه و کیفیت سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ با استفاده از یک روش ابتکاری تولید شده‌اند. برای تولید شبکه اولیه از الگوریتم تولید شبکه تصادفی پروژه^۱ که توسط دملمیستر و همکاران (۲۰۰۳) ارائه شده است، استفاده گردید [۱۳]. همچنین این مسائل بر اساس تعداد فعالیت‌های پروژه (N) و تعداد حالت‌های اجرایی (m_i) طبقه‌بندی گردیده شدند. هر مسئله با توجه به تعداد فعالیت‌ها (به عنوان فاکتورها یا عوامل) و تعداد حالت‌های اجرایی (به عنوان سطوح عوامل) در نرم‌افزار Minitab 19 طرح تاگوجی متناسب با آن طراحی گردید. همچنین برای ساختار هر شبکه عوامل شاخص سختی شبکه (OS) و ضریب پیچیدگی پروژه (CNC) در نظر گرفته شد. اطلاعات مربوط به مسائل طراحی شده در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ۴: پارامترهای مسائل مختلف تولید شده

شماره پروژه	تعداد فعالیت	اندازه پروژه	تعداد حالت‌های اجرایی	طرح تاگوجی مناسب	ساختار شبکه (Network) (Topology)	
					ضریب پیچیدگی پروژه (CNC)	شاخص سختی شبکه (OS)
۱	۴	کوچک	۵	L25	۱	> ۰/۵
۲	۵	کوچک	۵	L25	۱	> ۰/۵
۳	۶	کوچک	۵	L25	۰/۸۳	> ۰/۵
۴	۷	کوچک	۴	L32	۱/۲۹	> ۰/۵
۵	۸	کوچک	۴	L32	۱/۲۵	> ۰/۵
۶	۹	کوچک	۴	L32	۱/۳۳	> ۰/۵



شماره پروژه	تعداد فعالیت	اندازه پروژه	تعداد حالت‌های اجرایی	طرح تاگوچی مناسب	ساختار شبکه (Network) (Topology)	
					شاخص سختی شبکه (OS)	ضریب پیچیدگی پروژه (CNC)
۷	۱۰	کوچک	۳	L27	۱	> ۰/۵
۸	۱۱	کوچک	۳	L27	۱/۲۷	> ۰/۵
۹	۱۲	کوچک	۳	L27	۱	> ۰/۵
۱۰	۱۳	کوچک	۳	L27	۱/۱۵	> ۰/۵
۱۱	۱۵	متوسط	۲	L16	۱/۲۰	> ۰/۵
۱۲	۱۶	متوسط	۲	L32	۱/۳۳	> ۰/۵
۱۳	۱۷	متوسط	۲	L32	۰/۸۸	> ۰/۵
۱۴	۱۸	متوسط	۲	L32	۱/۱۲	> ۰/۵
۱۵	۱۹	متوسط	۲	L32	۱/۱۶	> ۰/۵
۱۶	۲۰	متوسط	۲	L32	۱/۱۰	> ۰/۵
۱۷	۲۱	متوسط	۲	L32	۱	> ۰/۵
۱۸	۲۲	متوسط	۲	L32	۱/۴۰	> ۰/۵
۱۹	۲۳	متوسط	۲	L32	۱/۲۶	> ۰/۵
۲۰	۲۴	متوسط	۲	L32	۱/۳۶	> ۰/۵
۲۱	۲۵	متوسط	۲	L32	۱/۱۷	> ۰/۵
۲۲	۲۶	متوسط	۲	L32	۱/۱۹	> ۰/۵
۲۳	۲۷	متوسط	۲	L32	۱/۱۱	> ۰/۵
۲۴	۲۸	متوسط	۲	L32	۱	> ۰/۵
۲۵	۲۹	بزرگ	۲	L32	۱/۲۰	> ۰/۵
۲۶	۳۰	بزرگ	۲	L32	۱/۳۲	> ۰/۵
۲۷	۳۱	بزرگ	۲	L32	۱/۱۰	> ۰/۵
۲۸	۳۲	بزرگ	۲	L64	۱/۳۰	> ۰/۵

۹-۲- تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی

در این بخش به تنظیم پارامترهای مربوط به الگوریتم‌های پیشنهادی در این مقاله پرداخته می‌شود. در این مقاله، از درصد انحراف نسبی به عنوان متغیر پاسخ با «مقدار کمتر بهتر» استفاده می‌شود. این معیار طبق رابطه (۱-۱۵) قابل محاسبه است:



$$RDI = \frac{|Alg_{sol} - Best_{sol}|}{|Max_{sol} - Min_{sol}|} \quad (1-15)$$

که در آن Alg_{sol} مقدار به دست آمده برای هر شاخص مورد نظر در هر آزمایش، $Best_{sol}$ بهترین مقدار به دست آمده برای شاخص مورد نظر در کل آزمایشات، Max_{sol} و Min_{sol} به ترتیب بیشترین و کمترین بهترین مقدار به دست آمده برای شاخص مورد نظر در کل آزمایشات می‌باشد. پارامترهای مورد نظر و سطوح مختلف آن‌ها که بر اساس نرم‌های مشابه موجود در ادبیات و تست‌های اولیه که حاکی از نتایج بهتری در مقایسه با سایر سطوح می‌باشد، در جدول (۵) آورده شده و به عنوان گام اول مورد استفاده قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری مقدار (S / N) از رابطه استاندارد (۱-۱۶) استفاده خواهد شد.

$$SB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \rightarrow S/N = -10000(RDI)^2 \quad (1-)$$

(۱۶)

در روابط بالا n بیانگر تعداد تکرارها یا تعداد اجرای هر آزمایش، y_i بیانگر خروجی اندازه‌گیری شده یا مقدار پاسخ فرایند و مقدار k واریانس را نشان می‌دهد و مشخصه اندازه‌گیری شده کوچکتر باشد، بهتر است (کوچکتر - بهتر). در نهایت برای الگوریتم NSGA-II با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آن‌ها طرح L9 و برای الگوریتم MOPSO با توجه به تعداد پارامترها و سطوح آن‌ها طرح L27 طراحی و نتایج حاصل از این تحلیل در شکل‌های (۲ و ۳) نشان داده شده است.



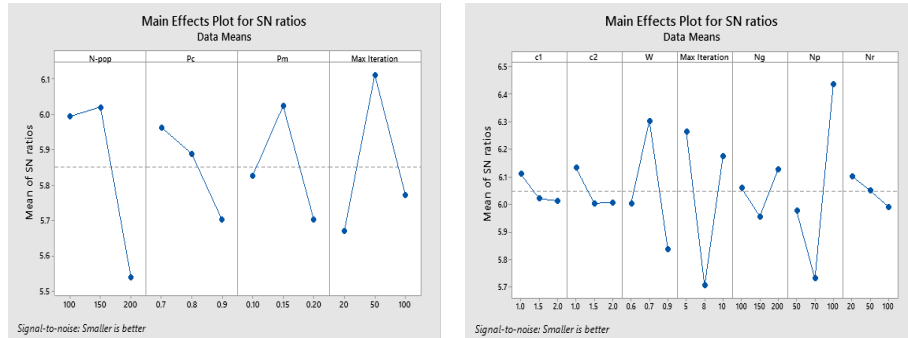
جدول ۵: پارامترهای مربوط به الگوریتم فراابتکاری NSGA-II و MOPSO

الگوریتم	نام پارامتر	نماد پارامتر	سطوح پارامتر		
			سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
NSGA - II	اندازه جمعیت	N_p	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
	احتمال تقاطع	P_c	۰/۷	۰/۸	۰/۹
	احتمال جهش	P_m	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۲۰
	حداکثر تعداد تکرار الگوریتم	Max Iteration	۲۰	۵۰	۱۰۰
	ضریب بهترین حافظه شخصی	c_1	۱	۱,۵	۲
	ضریب بهترین حافظه جمعی	c_2	۱	۱,۵	۲
MOPSO	وزن اینرسی	w	۰/۶۰	۰/۷۰	۰/۹۰
	تعداد بخش‌بندی	N_g	۵	۸	۱۰
	تعداد جمعیت	N_p	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
	حداکثر عضو مخزن جواب‌ها	N_r	۵۰	۷۰	۱۰۰
	حداکثر تعداد تکرار الگوریتم	Max Iteration	۲۰	۵۰	۱۰۰

در ادامه برای هر مقیاس از مسائل، ۶ مسئله به صورت تصادفی انتخاب و هر مسئله به تعداد ۵ مرتبه حل گردید و نتایج حاصله ثبت شد. در نهایت تعداد ۳۰ جواب برای هر آزمایش به دست آمد. بهترین جواب در بین ۵ بار اجرا به عنوان نتایج مسائل در نظر گرفته خواهد شد. برای اندازه‌گیری عملکرد هر آزمایش تاگوچی، شاخص‌های DM، MID و QM در نظر گرفته شد. برای هر آزمایش، نتایج این اندازه‌گیری عملکرد با استفاده از رابطه (۱-۱۵) تبدیل به درصد انحراف نسبی گردید. سپس، میانگین درصد انحراف نسبی برای هر مسئله محاسبه شد. در نهایت میانگین موزون برای هر آزمایش طبق رابطه (۱-۱۷) محاسبه و به عنوان تابع هدف در طراحی آزمایشات تاگوچی در نظر گرفته شد.

$$D_i = \frac{w_1 \times \overline{RDI}_{i1} + w_2 \times \overline{RDI}_{i2} + \dots + w_m \times \overline{RDI}_{im}}{w_1 + w_2 + \dots + w_m} \quad (1-17)$$

در این رابطه w_j وزن شاخص z بر اساس اهمیت آن و m تعداد شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی است. در نتیجه $1, 2, \dots, m$ و z در این پژوهش $m = 3$ خواهد بود. همچنین به خاطر اهمیت شاخص QM وزن آن ۳ و برای مابقی شاخص‌ها یعنی DM و MID وزن ۱ در نظر گرفته خواهد شد.



شکل ۳: نقاط نسبت (S/N) برای NSGA-II

شکل ۲: نقاط نسبت (S/N) برای MOPSO

۳-۹- مقایسه کارایی الگوریتم‌ها

برای مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه چندین شاخص استفاده می‌شود. در این مقاله از شاخص‌های زیر برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده خواهد شد.

شاخص تعداد جواب‌های پارتو: این شاخص نشان‌دهنده تعداد جواب‌های پارتو حاصل شده از الگوریتم می‌باشد. هر چه تعداد جواب‌ها بیشتر باشد، نشان‌دهنده کارایی بهتر الگوریتم مورد استفاده شده است.

شاخص میانگین فاصله از جواب ایده‌آل: این شاخص بیانگر میانگین فاصله نقاط پارتو از جواب ایده‌آل است. مقدار ایده‌آل برابر با بهترین مقدار ممکن برای هر یک از توابع هدف در تمام الگوریتم‌های استفاده شده است [۱۰]. این شاخص از رابطه (۱۸-۱) محاسبه می‌گردد.

$$MID = \frac{\sum_i^n \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{f_i^j - f_{best}^j}{f_{max}^j - f_{min}^j} \right)^2}}{n} \quad (1-18)$$

در این رابطه m نشان‌دهنده تعداد توابع هدف، n بیانگر تعداد نقاط پارتو، f_i^j مقدار j امین هدف از i امین جواب پارتو، f_{max}^j و f_{min}^j به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار مقدار j امین هدف از i امین جواب پارتو است. کمتر بودن این شاخص به معنای بهتر بودن کارایی الگوریتم مدنظر می‌باشد [۱۷].

شاخص فاصله‌گذاری: این شاخص بیانگر انحراف معیار فاصله جواب‌های نامغلوب است. به عبارتی این شاخص میزان فاصله نسبی جواب‌های متوالی پارتو را محاسبه می‌کند



[۷]. شاخص فاصله‌گذاری را می‌توان از رابطه (۱۹-۱) به دست آورد.

$$SM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2}{n-1}}, \quad \bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}, \quad d_i = \min_{k \in n, k \neq i} \sum_{m=1}^n |f_m^i - f_m^k|, \quad (1-19)$$

در این رابطه d_i نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین جواب‌های پشت سر هم در مجموعه جواب‌های نامغلوب حاصل شده است و \bar{d} بیانگر میانگین این فاصله‌ها می‌باشد. هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، جواب‌ها به طور یکنواخت‌تری توزیع شده و الگوریتم مربوطه از کارایی بالاتری برخوردار است.

شاخص تنوع (گسترش): این شاخص فاصله اقلیدسی بین جواب ابتدایی و انتهایی مجموعه جواب‌های پارتو را نشان می‌دهد. هر چه این شاخص بزرگ‌تر باشد الگوریتم مربوطه کارایی بیشتری دارد [۱۶]. این شاخص از رابطه (۲۰-۱) محاسبه می‌شود.

$$DM = \sqrt{\sum_{j=1}^m (f_{max}^j - f_{min}^j)^2} \quad (1-20)$$

شاخص زمان اجرای الگوریتم: این شاخص بیانگر زمان اجرای هر الگوریتم است. در صورتی که سایر شاخص‌های مورد استفاده جهت مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری با یکدیگر برابر باشند، هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، الگوریتم مربوطه از کارایی بالاتری برخوردار است.

شاخص کیفیت: این شاخص بیانگر سهم الگوریتم مربوطه در مجموعه جواب‌های پارتو حاصل از ترکیب پاسخ‌های پارتو ارائه شده به وسیله کلیه الگوریتم‌های مورد مقایسه می‌باشد. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، الگوریتم مربوطه از کارایی بالاتری برخوردار است [۸].

۹-۴- نتایج مقایسه الگوریتم‌ها

به منظور مقایسه الگوریتم‌های طراحی شده و شناسایی الگوریتم کاراتر، هر یک از این الگوریتم‌ها ۳۰ بار اجرا شده و مقدار هر یک از معیارهای مورد نظر برای ارزیابی در هر اجرا شده و در نهایت از آن‌ها میانگین گرفته شد، نتایج حاصل از این تعداد اجرا در جدول (۶) نشان داده شده است.



جدول ۶: نتایج محاسباتی و مقادیر شاخص‌ها

مسئله	DM		SM		MID		NPS		QM		CPU Time	
	NSGA - II	MOP SO	NSGA - II	MOP SO	NSGA - II	MOP SO	NSGA - II	MOP SO	NSGA - II	MOP SO	NSGA - II	MOP SO
۱	۲۵۴/۹	۱۱۲/۵	۱۴/۱	۲۶/۲	۱۵/۲	۱۱۴/۹	۲۴	۴۹	۰/۶۲	۰/۳۸	۶/۵	۱/۲
۲	۱۱۴/۸	۱۹۷	۲۵/۷	۳۴/۲	۶۱/۷	۹۰	۱۵	۴۰	۰/۴۴	۰/۵۶	۱/۹	۹/۹
۳	۱۹۸/۳	۱۰۸/۳	۷۴/۸	۵۲/۶	۶۲/۴	۱۰۷/۳	۷۸	۳۳	۰/۷۱	۰/۲۹	۴/۸	۶/۸
۴	۱۱۵/۳	۲۱۰/۷	۷۷/۸	۷۱/۳	۴۵/۸	۲۷/۶	۴۸	۷۱	۰/۴۱	۰/۵۹	۱۴/۲	۷/۶
۵	۲۳۲/۳	۲۳۴/۶	۳۰/۳	۴۶/۲	۱۲/۷	۱۲۵/۸	۷۴	۶۱	۰/۴۲	۰/۵۸	۱۱/۲	۵
۶	۷۴/۷	۲۱۸/۷	۳۳/۴	۷۱/۴	۳۴/۵	۵۰/۴	۱۴	۴۷	۰/۴۱	۰/۵۹	۱۷/۶	۵
۷	۱۴۸/۵	۱۱۳/۱	۲۱/۵	۲۰/۱	۲۸/۸	۶۴/۱	۶۵	۱۲	۰/۵۵	۰/۴۵	۷	۵/۷
۸	۲۲۰/۸	۱۸۷/۲	۸۸/۳	۴۶/۵	۵۲/۶	۷۸/۳	۲۶	۷۴	۰/۷۳	۰/۲۷	۱۵/۱	۴/۳
۹	۱۳۳/۷	۷۲/۱	۸۷	۱۱/۵	۱۶/۸	۹۴/۲	۷	۱۷	۰/۶۳	۰/۳۷	۳	۲
۱۰	۱۴۸/۵	۲۴۹/۷	۵۰/۷	۶۶/۲	۶۰/۹	۱۱۴	۶۸	۷۴	۰/۵	۰/۵	۱	۸/۴
۱۱	۱۵۴	۱۵۱/۴	۱۰	۲۳/۵	۵۹	۶۲/۱	۶۴	۵۶	۰/۵۳	۰/۴۷	۲۹/۱	۹/۹
۱۲	۱۹۳/۸	۲۱۳/۹	۴۵/۱	۴۲/۱	۲۸/۸	۲۱/۳	۷۷	۳۱	۰/۷۸	۰/۲۲	۲/۱	۶/۷
۱۳	۱۴۲/۵	۴۴/۵	۳۱/۲	۴۵/۰/۱	۵/۹	۳۳/۵	۵۹	۴۷	۰/۴۲	۰/۵۸	۲/۷	۹/۹
۱۴	۷۳/۲	۹۶/۹	۱۴/۹	۳۲/۰/۶	۴/۹	۱۲۰/۹	۷۸	۵۳	۰/۸۸	۰/۱۲	۲۰/۵	۵/۵
۱۵	۲۲۶/۳	۷۰/۷	۵/۱	۳۹/۳	۴۳/۷	۹۴/۲	۲۷	۳۴	۰/۷۵	۰/۲۵	۷	۳/۴
۱۶	۱۹۶/۶	۲۱۹/۵	۶۷/۲	۲۴/۵	۲۹/۸	۸۹/۱	۲۸	۱۰	۰/۹	۰/۱	۶	۴/۱
۱۷	۷۷	۴۱/۵	۳۱/۹	۴۰/۶	۲۰/۸	۸۳/۴	۱۹	۶۵	۰/۷۳	۰/۲۷	۱۹/۳	۴/۴
۱۸	۲۳۵/۳	۲۲۵/۵	۱۹	۱۴/۵	۳۱/۳	۲۴/۲	۵۴	۳۲	۰/۷۹	۰/۲۱	۴۹/۵	۷
۱۹	۸۹/۳	۶۳/۶	۲۵/۳	۴/۸	۷	۶۷/۳	۲۸	۶۷	۰/۸۱	۰/۱۹	۲۸/۱	۳
۲۰	۱۶۳/۳	۱۷۴	۵۶/۶	۶۲/۴	۵۰	۲۱	۶۷	۴۱	۰/۸۱	۰/۱۹	۱۰/۵	۶
۲۱	۲۱۵/۸	۴۵/۲	۲۸/۴	۲۹/۳	۵۹	۴۷/۹	۵۵	۵۶	۰/۹	۰/۱	۳۶/۵	۱۱/۲
۲۲	۱۲۰/۸	۱۹۸/۳	۸۳/۴	۹۱/۲	۱۰/۸	۲۷/۵	۶۹	۱۱	۰/۷۵	۰/۲۵	۹	۲۴/۹
۲۳	۲۲۷/۶	۱۹۱/۱	۳۸/۱	۳۶/۴	۱۶	۴۸/۱	۵۸	۵۷	۰/۸۸	۰/۱۲	۴۰/۶	۱۵/۹
۲۴	۲۵۳/۷	۶۶/۱	۱۶	۲۸/۰/۷	۳۶/۵	۱۱۴/۸	۷۸	۱۳	۰/۸۲	۰/۱۸	۱۵/۷	۱۳/۳
۲۵	۸۴/۴	۲۰/۱/۴	۶/۱	۱۳/۹	۶۳/۷	۵۴/۹	۴۱	۴۶	۰/۸۶	۰/۱۴	۳۷/۱	۲۵/۷
۲۶	۲۶۹/۱	۶۰/۷	۳۷/۷	۱۱/۸	۳۵/۴	۴۳/۷	۴۲	۱۸	۰/۸۷	۰/۱۳	۲۸/۹	۱۸/۵
۲۷	۱۶۳/۵	۱۴۶/۴	۸۴/۳	۶۰/۴	۱۷/۷	۱۱۳/۸	۴۰	۷۵	۰/۸۳	۰/۱۷	۲۳/۸	۲۴/۵
۲۸	۷۳	۴۸	۳۶/۲	۵۱/۹	۱۴/۱	۳۶/۴	۵۰	۱۲	۰/۸۹	۰/۱۱	۲۰/۶	۳۷/۴



۹-۵- آزمون نرمال بودن مقادیر شاخص‌ها

برای بررسی نرمال بودن داده‌های به دست آمده از اجرای الگوریتم‌ها از تست کولموگروف - اسمیرنوف استفاده گردید. تمامی داده‌ها نرمال بوده و مقدار $P - Value$ به دست آمده از $0/05$ بزرگ‌تر می‌باشند، بنابراین در سطح اطمینان $0/95$ دلیلی بر رد فرض صفر یعنی فرض نرمال بودن داده‌ها وجود ندارد. بنابراین در این حالت می‌توان از آزمون‌های پارامتریک جهت مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده نمود. جدول (۷) نتایج به دست آمده از این آزمون را نشان می‌دهد.

همانطور که مشخص شده Sig به دست آمده در تمام داده‌ها بیشتر از $0,05$ شد. بنابراین در این حالت می‌توان از آزمون‌های پارامتریک جهت مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده نمود. در این بخش از آزمون t زوجی استفاده خواهد گردید. در این آزمون، فرضیه صفر به معنای برابری دو الگوریتم در هر معیار و فرضیه مخالف، عدم برابری در دو الگوریتم را در هر معیار بیان می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمون t زوجی و مقادیر Sig برای شاخص‌های که این مقدار بزرگ‌تر از $0,05$ می‌باشد، در سطح معناداری $0,95$ فرضیه صفر یعنی عدم تفاوت دو الگوریتم فراابتکاری، رد نخواهد شد ولی برای سایر شاخص‌ها با توجه به کمتر بودن مقدار عدد Sig از $0,05$ ، فرضیه صفر رد خواهد شد. در نتیجه با مشاهده مقدار آماره، در شاخص‌های MID و NPS الگوریتم NSGA-II و در شاخص CPU Time الگوریتم MOPSO مناسب‌تر می‌باشند.

جدول ۷: نتایج حاصل شده از آزمون نرمال بودن داده‌ها

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

	DM		SM		MID		NPS		QM		CPU Time	
	NSG A-II	MOPS O	NSG A-II	MOPS O	NSG A-II	MOPS O	NSG A-II	MOPS O	NSG A-II	MOPS O	NSG A-II	MOPS O
N	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
Kolmogorov-Smirnov Z	۰/۶۰۹	۰/۸۹۵	۰/۹۶۴	۰/۵۳۶	۰/۷۳۷	۰/۵۸۵	۰/۷۴۰	۰/۶۶۹	۰/۹۲۳	۰/۹۲۳	۰/۶۷۳	۱/۲۲۱
Asymp. Sig. (2-tailed)	۰/۸۵۳	۰/۴۰۰	۰/۳۶۰	۰/۹۳۷	۰/۶۴۹	۰/۸۸۳	۰/۶۴۴	۰/۷۶۱	۰/۳۶۲	۰/۳۶۲	۰/۷۵۶	۰/۱۰۱

a. Test distribution is Normal.



جدول ۸: نتایج حاصل از مقایسات زوجی

توضیحات	نتایج آزمون	Sig(2-tailed)	df	آماره	شاخص مورد ارزیابی
مقدار بزرگتر، بهتر	عدم رد فرض H0	۰/۲۰۶	۲۷	۱/۲۹۶	DM
مقدار کوچکتر، بهتر	عدم رد فرض H0	۰/۶۸۳	۲۷	۰/۴۱۲	SM
مقدار کوچکتر، بهتر	رد فرض H0	۰/۰۰۰	۲۷	۴/۸۸۶	MID
مقدار بزرگتر، بهتر	رد فرض H0	۰/۰۰۰	۲۷	۶/۱۴۱	NPS
مقدار بزرگتر، بهتر	عدم رد فرض H0	۰/۳۸۷	۲۷	۰/۸۷۹	QM
مقدار کوچکتر، بهتر	رد فرض H0	۰/۰۱۵	۲۷	۲/۶۰۳	CPU Time

۹-۶- مقایسه نتایج الگوریتمها بر اساس شاخص RDI

با توجه به نتایج به دست آمد از آزمونهای انجام شده و با توجه به این که در برخی از شاخصهای الگوریتم NSGA-II و در برخی دیگر الگوریتم MOPSO کارایی بهتری دارد، برای انتخاب الگوریتم برتر از روش تصمیمگیری چند معیاره ترکیبی به نام AHP-TOPSIS استفاده خواهد شد [۲۰]. در این پژوهش الگوریتمها و شاخصهای ارزیابی آنها به ترتیب به عنوان گزینهها و معیارها در نظر گرفته می شوند. در این روش، تکنیک AHP برای شناسایی وزنهای معیاره استفاده می شود. وزنها هر کدام از معیارها بر مبنای گامهای زیر انجام می شود.

گام ۱: ایجاد ماتریس مقایسات زوجی: این ماتریس بر مبنای جمع نظرات خبرگان مختلف در این زمینه ایجاد می شود. عناصر این ماتریس بر مبنای اهمیتی هر معیار نسبت به سایر معیارها تشکیل می شود. جدول (۹) نتایج این مقایسات را نشان می دهد.

جدول ۹: ماتریس مقایسات زوجی

شاخصهای ارزیابی	DM	SM	MID	NPS	QM	CPU Time
DM	۱	۲	۱	۱	۲	۴
SM	۰/۵	۱	۱	۱	۲	۵
MID	۱	۱	۱	۱	۲	۵
QM	۱	۱	۱	۱	۱	۴
NPS	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۱	۱	۴
CPU Time	۰/۲۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۱

گام ۲: هر عنصر در ماتریس مقایسه زوجی را به جمع ستون خودش تقسیم می کنیم تا



ماتریس مقایسه زوجی نرمالایزه شود.

گام ۳: متوسط عناصر در هر سطر از ماتریس نرمالایزه را حساب می‌کنیم تا وزن هر کدام از شاخص‌ها به دست آید.

جدول ۱۰: وزن‌های به دست آمده از روش AHP

شاخص	w_i
DM	۰/۲۳۴
SM	۰/۱۹۳
MID	۰/۲۱۲
NPS	۰/۱۸۵
QM	۰/۱۳۳
CPU Time	۰/۰۴۳
Inconsistency = 0/02166	

بعد از به دست آوردن اوزان نرمالایز شده برای اولویت‌بندی الگوریتم‌های پیشنهادی در این مقاله از روش TOPSIS استفاده می‌کنیم. برای این کار گام‌های زیر را انجام می‌دهیم:
گام ۱: تشکیل ماتریس تصمیم: این ماتریس در جدول (۱۱) نشان داده شده است. این ماتریس تصمیم از میانگین گرفتن از مقادیر مرتبط با جدول (۶) حاصل شده است.

جدول ۱۱: ماتریس مقایسات زوجی

مسائل کوچک						
شاخص‌های ارزیابی	DM	SM	MID	NPS	QM	CPU Time
NSGA-II	۱۶۴/۱۸	۵۰/۳۶	۳۹/۱۴	۴۱/۹	۰/۵۴۲	۸/۲۳
MOPSO	۱۷۰/۳۹	۴۴/۶۲	۸۶/۶۶	۴۷/۸	۰/۴۵۸	۵/۵۹
مسائل متوسط						
شاخص‌های ارزیابی	DM	SM	MID	NPS	QM	CPU Time
NSGA-II	۱۵۵/۱۳	۳۰/۶۲	۲۸/۱۲	۵۰/۱	۰/۷۴	۱۷/۴۸
MOPSO	۱۳۰/۱۵	۳۱/۸۷۷	۶۱/۷	۳۳/۶	۰/۲۶	۵/۹۹
مسائل بزرگ						
شاخص‌های ارزیابی	DM	SM	MID	NPS	QM	CPU Time
NSGA-II	۱۷۵/۹۸۷۵	۴۱/۲۷۵	۳۱/۶۵	۵۴/۱۲۵	۰/۸۵	۲۶/۵۲۵
MOPSO	۱۱۹/۶۵	۴۰/۳۷۱۲۵	۶۰/۸۸۷۵	۳۶	۰/۱۵	۲۱/۴۲۵



گام ۲: محاسبه ماتریس تصمیم نرمالایز شده با استفاده از فرمول زیر:

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n f_{ij}^2}} \quad (1-21)$$

در این رابطه f_{ij} یک عنصر از ماتریس تصمیمو r_{ij} یک عنصر از ماتریس تصمیم نرمالایز شده می باشد.

گام ۳: محاسبه ماتریس تصمیم نرمالایز شده موزون با استفاده از فرمول زیر:

$$v_{ij} = r_{ij} \times w_{nn} \quad (1-22)$$

در این رابطه v_{ij} عنصر ماتریس تصمیم نرمالایز شده موزونو w_{nn} وزن نهایی به دست آمده از روش AHP است.

گام ۴: تعیین راهحل ایده آل مثبت و منفی.

$$A^+ = \{(\max_i v_{ij} | j \in J), (\min_i v_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$$

$$A^- = \{(\min_i v_{ij} | j \in J), (\max_i v_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

در این روابط A^+ به شاخص سود وابسته و A^- به شاخص هزینه است.

گام ۵: محاسبه فاصله هر گزینه از راهحل ایده آل مثبت و منفی. فاصله هر گزینه از راهحل

ایده آل مثبت به صورت زیر به دست می آید:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (1-23)$$

همین طور، فاصله از راهحل ایده آل منفی به صورت زیر بدست می آید:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (1-24)$$

گام ۶: محاسبه نزدیکی نسبی گزینه i ام به راهحل ایده آل مثبت با توجه به رابطه زیر:

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (1-25)$$

C_i^+ مقداری بین ۰ تا ۱ می باشد.

گام ۷: تعیین رتبه هر گزینه بر مبنای C_i^+



جدول ۱۲: وزن نهایی الگوریتم‌های فراابتکاری

مسائل کوچک				
رتبه نهایی	C_i^+	S_i^-	S_i^+	الگوریتم
۱	۰/۷۹۸	۰/۱۰۷	۰/۰۲۷	الگوریتم NSGA-II
۲	۰/۲۰۲	۰/۰۲۷	۰/۱۰۷	الگوریتم MOPSO
مسائل بزرگ				
رتبه نهایی	C_i^+	S_i^-	S_i^+	الگوریتم
۱	۰/۸۳۷	۰/۱۳۷	۰/۰۲۷	الگوریتم NSGA-II
۲	۰/۱۶۳	۰/۰۲۷	۰/۱۳۷	الگوریتم MOPSO
مسائل بزرگ				
رتبه نهایی	C_i^+	S_i^-	S_i^+	الگوریتم
۱	۰/۹۵۸	۰/۱۶۲	۰/۰۰۷	الگوریتم NSGA-II
۲	۰/۰۴۲	۰/۰۰۷	۰/۱۶۲	الگوریتم MOPSO

همان‌گونه که از نتایج مشخص است الگوریتم NSGA-II در تمام سایزهای مختلف برای حل مسائل پیشنهادی بر الگوریتم MOPSO برتری دارد.

۱۰- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله مدلی ارائه گردید که با حذف مفروضات غیرواقعی و لحاظ نمودن واقعیت‌های پروژه نسبت به مدل‌های ارائه شده در این زمینه به واقعیت نزدیک‌تر بوده و در عمل کاربرد بیشتری نیز داشته باشد. مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای شبکه‌های PERT با در نظر گرفتن چندین حالت اجرایی برای هر فعالیت و بررسی تمام روابط پیش‌نیازی عمومی می‌باشد. برای حل این مدل، از آنجا که مسئله مورد نظر در مقوله NP-hard قرار می‌گیرد، از دو الگوریتم فراابتکاری چندهدفه NSGA-II و MOPSO استفاده گردید. برای مشخص کردن کارایی مدل ارائه شده، از یک شبکه PERT در مقیاس متوسط آزمایش شد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شده که الگوریتم فراابتکاری NSGA-II کارایی بهتری نسبت به الگوریتم فراابتکاری MOPSO دارد.

در دنیای واقعی به دست آوردن اعداد قطعی برای کیفیت و هزینه فعالیت‌های پروژه مشکل می‌نماید. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در یک پروژه پژوهشی موازنه اهداف در زمان‌بندی



پروژه با در نظر گرفتن ویژگی‌های هر فعالیت به صورت فازی مورد مطالعه قرار بگیرد.

۱۱- پی‌نوشت‌ها

- | | |
|---|--|
| ۱. Multi-mode | ۱۳. Wood |
| ۲. General Precedence Relationships (GPRs) | ۱۴. Azaron, Perkgoz and Sakawa |
| ۳. Combinatorial optimization | ۱۵. Object Oriented |
| ۴. Nondeterministic polynomial (NP-Hard Problems) | ۱۶. crowding distance |
| ۵. Exact algorithms | ۱۷. crowded-comparison operator |
| ۶. Heuristic algorithms | ۱۸. Random Network Generation (RanGen) |
| ۷. Meta-heuristic algorithms | ۱۹. Relative percentage deviation |
| ۸. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) | ۲۰. smaller-the-better (SB) |
| ۹. Multi-Objective Particle Swarm Optimization (PSO) | ۲۱. Number of Pareto Solution (NPS) |
| ۱۰. Babu and Suresh | ۲۲. Mean Ideal Distance (MID) |
| ۱۱. Khang and Myint | ۲۳. Spacing Metric (SM) |
| ۱۲. Zhang and Xing | ۲۴. Diversification Metric (DM) |
| | ۲۵. Quality Metric (QM) |

۱۲- منابع

- [1] Aminbakhsh, S., & Sonmez, R. (2016). Discrete particle swarm optimization method for the large-scale discrete time-cost trade-off problem. *Expert Systems with Applications*, 51, 177-185.
- [2] Amiri, Maghsoud, Azimi, Parham, Zandieh, Mustafa, Hadi Nejad, Farhad. (2017). Optimizing the reliability of military equipment and weapons with a hybrid approach of simulation and meta-algorithms. *Military Management Quarterly*, 16 (64), 125-164. (In Persian)
- [3] Azaron, A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2007). Multi-objective time-cost trade-off in dynamic PERT networks using an interactive approach. *European Journal of Operational Research*, 180(3), 1186-1200.
- [4] Azaron, A., Perkgoz, C., & Sakawa, M. (2005). A genetic algorithm approach for the time-cost trade-off in PERT networks. *Applied mathematics and computation*, 168(2), 1317-1339.
- [5] Azimi, Parham. Ismati, Alireza. Farajpour, Mehdi. Farzin, Ehsan. (2013). *Optimization via Simulation with ED Software Comprehensive Training*. Azad University Publications. (In Persian)



- [6] Babu, A. J. G., & Suresh, N. (1996). Project management with time, cost, and quality considerations. *European Journal of Operational Research*, 88(2), 320-327.
- [7] Chambari, Amirhossain, Seyed Habib A. Rahmati, and Amir Abbas Najafi. "A bi-objective model to optimize reliability and cost of system with a choice of redundancy strategies." *Computers & Industrial Engineering* 63, no. 1 (2012): 109-119.
- [8] Coello, C. A. C., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A. (2007). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems* (Vol. 5, pp. 79-104). New York: Springer.
- [9] Coello, C. C., & Lechuga, M. S. (2002, May). MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization. In *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC'02* (Cat. No. 02TH8600) (Vol. 2, pp. 1051-1056). IEEE.
- [10] Czyżżak, P., & Jaskiewicz, A. (1998). Pareto simulated annealing—a metaheuristic technique for multiple-objective combinatorial optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 7(1), 34-47.
- [11] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000, September). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In *International conference on parallel problem solving from nature* (pp. 849-858). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [12] Demeulemeester, E. L., & Herroelen, W. S. (2006). *Project scheduling: a research handbook* (Vol. 49). Springer Science & Business Med.
- [13] Demeulemeester, E., Vanhoucke, M., & Herroelen, W. (2003). RanGen: A random network generator for activity-on-the-node networks. *Journal of scheduling*, 6(1), 17-38.
- [14] ghafoori, S., taghizadeh yazdi, M. (2017). Proposing a Multi-Objective Mathematical Model for RCPSP and Solving It with Firefly and Simulated Annealing algorithms. *Modern Research in Decision Making*, 1(4), 117-142. (In Persian)
- [15] Hamta, N., Ehsanifar, M., Moghaddasi, A. (2018). An Investigation of Iranian Entrepreneurs' Decision Making Logic Based On Effectuation Theory. *Modern Research in Decision Making*, 2(4), 255-273. (In Persian)
- [16] Jolai, F., Asefi, H., Rabiee, M., & Ramezani, P. (2013). Bi-objective simulated annealing approaches for no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem. *Scientia*
- [17] Karimi, N., Zandieh, M., & Karamooz, H. R. (2010). Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flowshop: a multi-phase approach. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4024-4032.
- [18] Kazaz, A., Ulubeyli, S., Er, B., & Acikara, T. (2016). Construction Materials-based Methodology for Time-Cost-quality Trade-off Problems. *Procedia engineering*, 164, 35-41.



- [19] Khang, D. B., & Myint, Y. M. (1999). Time, cost and quality trade-off in project management: a case study. *International journal of project management*, 17(4), 249-256.
- [20] Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B., & Niaki, S. T. A. (2016). A multi-objective invasive weeds optimization algorithm for solving multi-skill multi-mode resource constrained project scheduling problem. *Computers & Chemical Engineering*, 88, 157-169.
- [21] Monghasemi, S., Nikoo, M. R., Fasaee, M. A. K., & Adamowski, J. (2015). A novel multi criteria decision making model for optimizing time-cost-quality trade-off problems in construction projects. *Expert systems with applications*, 42(6), 3089-3104.
- [22] Mungle, S., Benyoucef, L., Son, Y. J., & Tiwari, M. K. (2013). A fuzzy clustering-based genetic algorithm approach for time-cost-quality trade-off problems: A case study of highway construction project. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(8), 1953-1966.
- [23] Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization. *Swarm intelligence*, 1(1), 33-57.
- [24] Pour, N. S., Modarres, M., Aryanejad, M., & Moghadam, R. T. (2010). The discrete time-cost-quality trade-off problem using a novel hybrid genetic algorithm. *Applied Mathematical Sciences*, 4(42), 2081-2094.
- [25] Project Management Institute. (2018). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)-(JAPANESE)*. Project Management Institute.
- [26] Saif, A., Abbas, S., & Fayed, Z. (2015). The PDBO algorithm for discrete time, cost and quality trade-off in software projects with expressing quality by defects. *Procedia Computer Science*, 65, 930-939.
- [27] Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2006). On the discrete time, cost and quality trade-off problem. *Applied mathematics and computation*, 181(2), 1305-1312.
- [28] Tran, D. H., Cheng, M. Y., & Cao, M. T. (2015). Hybrid multiple objective artificial bee colony with differential evolution for the time-cost-quality tradeoff problem. *Knowledge-Based Systems*, 74, 176-186.
- [29] Wood, D. A. (2017). Gas and oil project time-cost-quality tradeoff: Integrated stochastic and fuzzy multi-objective optimization applying a memetic, nondominated, sorting algorithm. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45, 143-164.
- [30] Zhang, H., & Xing, F. (2010). Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time-cost-quality tradeoff in construction. *Automation in Construction*, 19(8), 1067-1075.