

## ارائه یک مدل ریاضی برای مسئله موازنه هزینه- زمان- اثرات زیست‌محیطی و حل آن با الگوریتم‌های فراابتکاری ازدحام ذرات و کرم شب‌تاب

محمد رضا تقی‌زاده یزدی\*، سعید غفوری\*\*

### چکیده

افزایش تعداد و گردش مالی پروژه‌های سازمان‌ها و سازمان‌های پروژه‌محور از یک سو و شدت گرفتن دغدغه‌های زیست‌محیطی تحت مفهوم «توسعه پایدار» از سوی دیگر به ورود دغدغه‌های زیست‌محیطی در مدیریت پروژه منجر شده است. از اینرو در این مطالعه، اثرات زیست‌محیطی پروژه به‌عنوان شاخص جدیدی در مسئله موازنه هزینه- زمان پروژه در نظر گرفته شده و مدل ریاضی جدیدی با سه شاخص هزینه، زمان و اثرات زیست‌محیطی ارائه شده است. با توجه به دشواری حل مدل ریاضی ارائه‌شده از دو الگوریتم فراابتکاری ازدحام ذرات چندهدفه و کرم شب‌تاب چندهدفه به‌صورت ترکیبی با یک الگوریتم ابتکاری که جواب‌های موجه از نظر روابط پیش‌نیازی ایجاد می‌کند، در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شد. نتایج به‌کارگیری این مدل ریاضی و الگوریتم‌های حل بر روی داده‌های مسائل استاندارد موجود در کتابخانه PSPLIB نشان داد که مدیران پروژه با به‌کارگیری این مدل ریاضی در زمان‌بندی پروژه خود، حق انتخاب بین مقادیر مختلف زمان، هزینه و اثرات زیست‌محیطی پروژه را خواهند داشت و از طرفی می‌توانند اثرات زیست‌محیطی پروژه را کنترل کنند؛ همچنین مقادیر شاخص‌های ارزیابی جواب‌های پارتو نشان داد که الگوریتم ازدحام ذرات کارایی بهتری نسبت به الگوریتم کرم شب‌تاب در این مسئله داشته است.

**کلیدواژه‌ها:** مسئله موازنه هزینه- زمان- اثرات زیست‌محیطی؛ الگوریتم فراابتکاری؛ الگوریتم ازدحام ذرات؛ الگوریتم کرم شب‌تاب.

---

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۲/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۴.

\* استادیار، دانشگاه تهران.

\*\* کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول).

## ۱. مقدمه

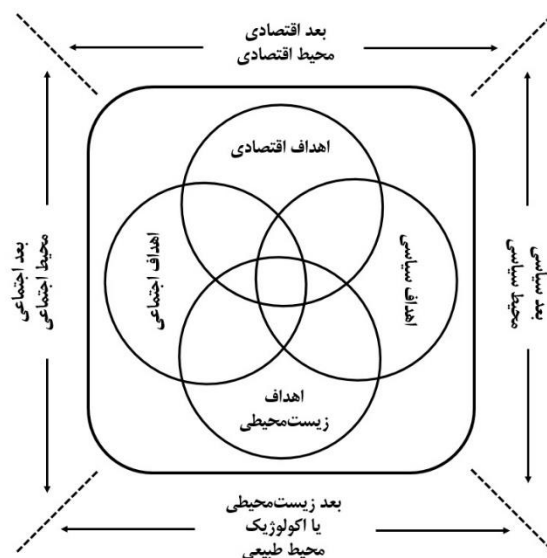
مدیریت پروژه شامل کاربرد دانش، مهارت‌ها، ابزار و فنونی است که برای برآوردن نیازمندی‌ها و نیل به اهداف تعیین‌شده پروژه استفاده می‌شود [۱۴]. یکی از مهم‌ترین گام‌های مدیریت پروژه‌های صنعتی و عمرانی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی فعالیت‌ها است. این مسئله با روش‌های کلاسیکی همچون مسیر بحرانی، PERT<sup>۱</sup> و غیره حل می‌شود و جدول زمان‌های اجرا و خاتمه فعالیت‌ها را به مدیران اجرایی پروژه ارائه می‌دهد. این روش‌ها بر این فرض بنا نهاده شده‌اند که تمام فعالیت‌ها در زمان استاندارد خود قابل‌اجرا هستند [۲۵]. محاسبات تاریخ تکمیل پروژه با روش‌های CPM<sup>۲</sup>، PERT و غیره بر این فرض متکی هستند که فعالیت‌های لازم برای اجرای پروژه، به‌خصوص فعالیت‌های واقع بر مسیر بحرانی، همگی در زمان‌های معمول خود که تخمین زده شده‌اند، قابل‌انجام باشند. در موارد بسیاری، لازم است پروژه را زودتر از تاریخ محاسبه‌شده بر روی شبکه تکمیل کرد. در چنین شرایطی یکی از راه‌حل‌های ممکن برای کوتاه‌کردن زمان اجرای پروژه، تسریع انجام فعالیت‌ها است. کاهش زمان اجرای فعالیت از زمان معمولی به زمان کوتاه‌تر، همواره با صرف هزینه همراه است. این عمل به‌عنوان مسئله موازنه هزینه- زمان یکی از مسائل شناخته‌شده در مدیریت پروژه است [۱۲]. علاوه بر هزینه بیشتر، تسریع در انجام فعالیت‌های پروژه می‌تواند بر کیفیت انجام، ضریب ایمنی و اثرات زیست‌محیطی پروژه نیز تأثیر بگذارد که در مدل‌های توسعه‌یافته مسئله موازنه هزینه- زمان به تعدادی از آن‌ها پرداخته شده است.

یکی از جنبه‌های تأثیرپذیر از تسریع در انجام فعالیت‌ها، اثرات زیست‌محیطی به‌جامانده از انجام پروژه است که در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. با توسعه صنایع و پیشرفت‌های روزافزون جوامع و افزایش رشد اقتصادی، توجه به محیط‌زیست به‌عنوان یکی از ارکان توسعه، موردغفلت قرار گرفت و تخریب نگران‌کننده محیط‌زیست و منابع طبیعی در نتیجه کاربرد فناوری‌ها از جمله دلایل رواج «تفکر توسعه پایدار» شد [۳۸]. در اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی تعدادی از متفکران که نگران نابودی محیط‌زیست در برابر رشد اقتصادی بودند، نخستین کوشش‌ها در راستای حمایت و بهبود محیط‌زیست در قالب توصیه به اجلاس فونکس ۳ را انجام دادند. پس از آن این مسئله در اجلاس محیط‌زیست استکهلم ۱۹۷۲، کمیسیون جهانی محیط‌زیست ۴ در سال ۱۹۸۷ و اجلاس ریو ۱۹۹۲ مطرح شد و درنهایت به ایجاد چارچوبی تحت عنوان «توسعه پایدار» منجر شد [۳۸].

دستور کار قرن بیست‌ویکم، در سند ۶۰۰ صفحه‌ای اجلاس ریودوژانیرو، به رویکرد توسعه

1. Program Evaluation and Review Technique
2. Critical Path Method
3. Founex
4. World Commission on Environment and Development

پایدار حالتی عمومی داده است [۳۹]. توسعه پایدار دارای چهار بُعد اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیست و سیاست‌های دولت‌ها است (شکل ۱) که در آن یکی از مهم‌ترین ابعاد، توجه به محیط‌زیست است [۳۸].



شکل ۱. ابعاد توسعه پایدار و محیط‌های درگیر با آن (زاهدی، ش. و نجفی، ق. [۳۸] / ۲۰۰۶).

توجه به تأثیرات زیست‌محیطی در مسئله موازنه هزینه- زمان نیازمند ارائه مدل ریاضی جدیدی است که در آن علاوه بر در نظر گرفتن این شاخص‌ها، اهداف و محدودیت‌های جدیدی نیز تعریف شوند که اثرات زیست‌محیطی را مدنظر قرار دهند.

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

راه‌حل‌های تسریع در تکمیل پروژه به‌طور عمده از هزینه بیشتری برخوردار خواهند بود؛ ولی با توجه به تسریع زمانی در تکمیل فعالیت‌ها و در نظر گرفتن هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم فعالیت‌ها در مواردی می‌توانند علاوه بر کاهش زمان تکمیل پروژه، هزینه‌های کل پروژه را نیز کاهش دهند [۱۳]. مسئله مبادله بین هزینه و زمان برای فعالیت‌ها در این راستا تعریف و مدل‌سازی شده است و روش‌های برنامه‌ریزی خطی [۱۴]، الگوریتم ابتکاری زیمنس [۱۳] و غیره برای حل این مسئله ارائه شده‌اند.

در این مبادله امکان انتخاب روش انجام یک فعالیت با کیفیت پایین‌تر وجود دارد که این موضوع با عنوان «مبادله هزینه- زمان- کیفیت» که به‌صورت مدل‌های ریاضی یک یا چندهدفه

فرموله شده‌اند، در پژوهش‌های بعدی مطرح شد تا معیار کیفیت کلی پروژه و حداقل سطح کیفی فعالیت‌ها را نظر داشته باشد [۴]. مسئله جدید با توجه به دشواری ایجادشده در مدل ارائه‌شده، به یک مسئله NP-Hard تبدیل شده است که حل آن با روش‌های معمول بسیار دشوار است؛ از این رو پژوهشگران زیادی این مسئله را با الگوریتم‌های فراابتکاری حل کرده‌اند [۱۷، ۲۱، ۶، ۲]. هرچند این روش‌ها جواب بهینه قطعی ارائه نمی‌کنند، به کارگیری آن‌ها موجب به دست آمدن جواب بهینه نسبی بسیار نزدیک به جواب نهایی خواهد شد که در عمل مشکل حل مسئله جدید را مرتفع می‌سازد [۱۷].

پس از مدل مبادله هزینه-زمان-کیفیت، مدلی جدید با جایگزینی شاخص کیفیت با شاخص ایمنی، با توجه به حساسیت ایمنی در برخی پروژه‌های صنعتی (صنایع پتروشیمی و غیره)، ارائه شد که دشواری‌های مدل قبلی برای حل را به همراه داشت [۱].

در گذر زمان، مسئله مبادله هزینه-زمان در قالب‌های کلی زیر تغییر کرده است:

- مبادله هزینه-زمان؛

- مبادله هزینه-زمان-کیفیت؛

- مبادله هزینه-زمان-ایمنی.

در ادامه تعدادی از پژوهش‌های مرتبط با موضوع در جدول ۱، آورده شده است.

جدول ۱. مرور تعدادی از مقالات حوزه موازنه هزینه-زمان در پروژه

منبع	موضوع	معیار مبادله	مورد مطالعه	الگوریتم حل
[۳]	موازنه هزینه - زمان	هزینه- زمان	مسئله استاندارد مقاله‌های قبلی	الگوریتم ژنتیک
[۱۹]	موازنه هزینه- زمان	هزینه- زمان	مثال عددی	الگوریتم ابتکاری پیشنهادی
[۵]	موازنه هزینه- زمان فازی	هزینه- زمان	مثال عددی	الگوریتم ژنتیک فازی
[۱۰]	موازنه هزینه- زمان با زمان‌های غیرقطعی	هزینه- زمان	مثال عددی	برنامه‌ریزی تصادفی مقید <sup>۱</sup>
[۱۷]	موازنه هزینه - زمان - کیفیت	هزینه- زمان- کیفیت	یک شرکت پیمانکاری استقرار مخازن گاز مایع	برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه
[۳۱]	موازنه هزینه - زمان - کیفیت	هزینه - زمان، کیفیت	مسئله بزرگ و پیچیده تصادفی با ۱۹۹۰۰ فعالیت	جست‌وجوی پراکنده الکترومغناطیس <sup>۲</sup>
[۶]	موازنه هزینه- زمان - کیفیت	هزینه - زمان - کیفیت	پروژه عمرانی	الگوریتم ترکیبی چندهدفه کلونی زنبور عسل مصنوعی
[۲]	موازنه هزینه - زمان - کیفیت	هزینه- زمان - کیفیت	مسئله استاندارد مقاله‌های قبلی	الگوریتم کلونی مورچگان چندهدفه
[۲۱]	موازنه هزینه - زمان - کیفیت	هزینه- زمان - کیفیت	استفاده از مسائل استاندارد PSPLib	الگوریتم رقابت استعماری <sup>۳</sup> چندهدفه
[۲۳]	موازنه هزینه - زمان - کیفیت گسسته	هزینه- زمان - کیفیت	مثال عددی	الگوریتم ازدحام ذرات <sup>۴</sup> چندهدفه
[۲۸]	موازنه هزینه - زمان - کیفیت	هزینه - زمان - کیفیت	مثال عددی	الگوریتم NHGA
[۳۰]	موازنه هزینه - زمان - کیفیت گسسته	هزینه - زمان - کیفیت	استفاده از الگوریتم DAGEN برای ساخت مسئله	ترکیب الگوریتم‌های جست‌وجوی پراکنده و الکترومغناطیس
[۳۲]	موازنه هزینه - زمان - کیفیت	هزینه - زمان - کیفیت	تولید مسئله به صورت تصادفی با الگوریتم ارائه شده	الگوریتم رقابت استعماری
[۳۴]	موازنه هزینه - زمان - کیفیت تصادفی گسسته	هزینه - زمان - کیفیت	مثال عددی	ترکیب الگوریتم‌های هوشمند <sup>۵</sup> با شبیه‌سازی تصادفی و الگوریتم ژنتیک
[۸]	موازنه هزینه - زمان - ایمنی	هزینه - زمان - ایمنی	مسئله استاندارد مقاله‌های قبلی	الگوریتم ژنتیک چندهدفه

1. Chance-Constrained Programming
1. Electromagnetic scatter search
2. Imperialist Competitive Algorithm
3. Particle Swarm Optimization
4. Intelligent Algorithm

در این مطالعه یک معیار اصلی به معیارهای اولیه مسئله موازنه هزینه - زمان اضافه شده و مدل ریاضی جدیدی ارائه شده است؛ سپس به کمک این مدل ریاضی جدید، به موازنه بین سه هدف هزینه - زمان و اثرات زیست‌محیطی در پروژه‌های استاندارد با اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ پرداخته شده است.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

**روش‌شناسی حل.** مدل‌های ریاضی موجود در حوزه موازنه هزینه - زمان، با اضافه شدن تعداد فعالیت‌ها، تعداد حالت‌های اجرایی فعالیت‌ها و توابع هدف جدید به مسائلی از جنس NP-Hard تبدیل می‌شوند و این موضوع در بسیاری از مطالعات گذشته از قبیل دانه و همکاران (۱۹۹۵) و شهسواری پور و همکاران (۲۰۱۰)، نبی‌پور افروزی و همکاران (۲۰۱۴)، توضیح داده شده است [۲۱، ۸، ۲۷]؛ از این رو برای حل این مدل، در این پژوهش از الگوریتم‌های فراابتکاری کمک گرفته شده است. کاربرد الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی مسائل، با توجه به قابلیت بالای جست‌وجوی این الگوریتم‌ها رواج پیدا کرده است؛ ولی نمی‌توان از میان الگوریتم‌های متعدد ارائه شده تاکنون، الگوریتم خاصی را برتر از سایر الگوریتم‌ها دانست؛ زیرا کارایی این الگوریتم‌ها می‌تواند در مسائل گوناگون متفاوت باشد [۳۵].

در پژوهش‌های متعددی به منظور حل مدل‌های موازنه هزینه - زمان - کیفیت و موازنه هزینه - زمان - ایمنی از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده که عملکرد مناسبی نیز داشته است. در این مطالعه نیز با توجه به شباهت زمینه‌ای مدل توسعه داده شده با مدل‌های پیشین از این الگوریتم برای مسائل چندهدفه (الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO))<sup>۱</sup> استفاده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم به کار گرفته شده، در کنار الگوریتم اصلی از الگوریتم چندهدفه کرم شبتاب نیز استفاده شده است تا بتوان مقایسه‌ای بین عملکرد این دو الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر جمعیت نیز به عمل آورد. در ادامه به معرفی مختصر پیشینه دو الگوریتم استفاده شده و شبهه کد هر یک که نمایان‌گر نحوه عملکرد آن‌ها در حل مسئله است، پرداخته می‌شود.

**الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.** الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت است که توسط کندی و ابرهارت (۱۹۹۵)، ارائه شد [۹]. این الگوریتم از هوش جمعی<sup>۲</sup> الهام گرفته شده است [۱۶]. این روش در واقع الهام گرفته از رفتار جمعی ارگانیزم‌های طبیعی، نظیر دسته پرندگان و ماهی‌ها در یافتن منطقه‌ای با غذای کافی

1. Multi-Objective Particle Swarm Optimization  
2. Swarm Intelligence

است. در این گونه اجتماع‌ها، بدون وجود کنترل مرکزی، یک رفتار هماهنگ شده به وجود می‌آید. روش PSO، به طور موفق برای مسائل بهینه‌سازی پیوسته استفاده شده است [۲۹]. نخستین بار این روش در مسائل بهینه‌سازی، توسط کندی و ابرهات (۱۹۹۵) به کار رفت. نخستین تلاش‌ها برای توسعه الگوریتم تک‌هدفه ازدحام ذرات جهت مواجهه با مسائل چندهدفه به پژوهش‌های مور و چاپمن (۱۹۹۹) و ری و همکاران (۲۰۰۲) برمی‌گردد که در پژوهش دیگری تکمیل و موردآزمون قرار گرفته‌اند.

کوئلو کوئلو و سالازار لچوگا (۲۰۰۲)، الگوریتم PSO را برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه طراحی کردند. در الگوریتم جدید ارائه شده به کمک جواب‌های غیرمغلوب و مفهوم پارتو، تلاش شده است تا بتوان از این الگوریتم برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده کرد.

در این مطالعه از ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه بر اساس جواب‌های بهینه پارتو با یک الگوریتم ابتکاری برای تبدیل جواب‌های تصادفی به جواب‌های شدنی از نظر روابط پیش‌نیازی استفاده شده است. در ادامه مکانیسم عملکرد الگوریتم ترکیبی و الگوریتم ابتکاری ارائه شده است:

گام ۱: تعریف توابع هدف و محدودیت‌ها و همچنین تعیین تعداد تکرار (یا شرط توقف الگوریتم)؛  
 گام ۲: بارگذاری جمعیت  $n$  ذره جستجوگر به صورت یکنواخت در فضای مسئله (از تکرار دوم بر اساس جواب‌های بهینه محلی و سراسری، جمعیت به سمت بهترین جواب (جواب غالب مرحله قبل  $g_*^t$ ) حرکت می‌کند)؛

گام ۳: تبدیل موقعیت‌های تصادفی هر ذره به موقعیت شدنی با اعمال محدودیت‌های 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 بر اساس روابط پیش‌نیازی تبدیل می‌شوند؛

گام ۴: محاسبه مقدار توابع هدف برای هر ذره، مقایسه آن‌ها با یکدیگر و تعیین  $g_*^t$ ؛  
 در صورتی که یک جواب غالب در بین جواب‌های این تکرار وجود نداشته باشد:

گام ۵: تولید بردار وزن تصادفی با مجموع یک، برای هر ذره؛

گام ۶: تعیین  $g_*^t$  بر اساس وزن‌ها و مقادیر توابع هدف هر ذره؛

گام ۷: تعیین جواب‌های غیرمغلوب و انتقال آن‌ها به تکرار بعدی؛

گام ۸: تکرار گام‌های ۲ تا ۷ تا رسیدن به شرط توقف.

در این مطالعه پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به صورت جدول ۲، تنظیم شده‌اند.

جدول ۲. پارامترهای تنظیم‌شده برای الگوریتم MOPSO

پارامتر	مقدار تنظیم‌شده
تعداد ذره	۳۰
تعداد تکرار	۱۰۰۰
$C_0$ (ضریب همگرایی سراسری)	۰/۳
$C_1$ (ضریب بازگشت به بهترین محل قبلی)	۰/۷

**الگوریتم فراابتکاری کرم شب‌تاب<sup>۱</sup>:** الگوریتم کرم شب‌تاب یک الگوریتم الهام‌گرفته از طبیعت است که تو س‌ط یانگ (۲۰۰۷)، معرفی شد [۳۷].

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

- تمام کرم‌های شب‌تاب دوجنسیتی هستند و بدون توجه به جنسیت یکدیگر را جذب می‌کنند.
  - شدت جذب متناسب با درخشندگی شب‌تاب‌ها است؛ بنابراین برای دو شب‌تاب آنکه شدت نور کمتری دارد به سمت آنکه درخشندگی بیشتری دارد حرکت می‌کند. اگر هیچ یک از دیگری درخشان‌تر نباشند، به صورت تصادفی به سمت هم حرکت می‌کنند؛
  - تابع هدف به وسیله 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 می‌توان فرض کرد 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 است.

$$I_r = I_s / r^2$$

در این معادله،  $I_s$  شدت نور در منبع است؛ همچنین اگر شدت جذب نور توسط محیط  $\gamma$  فرض شود، می‌توان شدت نور را با رابطه مقابل محاسبه کرد:

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

در این معادله  $I_0$  شدت نور منبع است. برای اجتناب از مشکل یکتایی<sup>۲</sup> در  $r=0$  در عبارت  $I_s / r^2$  ترکیب توأمان تأثیر قانون معکوس توان دوم و جذب محیطی می‌تواند به وسیله فرمول گاوسی مقابل تخمین زده شود:

---

1. Firefly Algorithm  
1. Singularity



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

از آنجاکه جذاییت یک کرم شب‌تاب متناسب با شدت نور درک‌شده توسط کرم شب‌تاب مجاور است، جذاییت یک کرم شب‌تاب با معادله زیر تعریف می‌شود:

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

در این معادله  $\beta_0$  شدت نور در  $r=0$  است؛ همچنین فاصله بین دو کرم شب‌تاب به وسیله فرمول زیر تعیین می‌شود:

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

در نهایت حرکت شب‌تاب  $J$  به سمت شب‌تاب  $I$  جذاب‌تر به وسیله فرمول زیر تعیین می‌شود:

$$x_j = x_j + b \cdot e^{-\gamma r_{ij}^2} \cdot (x_i - x_j) + \alpha \cdot \epsilon$$

در این معادله دومین عبارت رابطه جذاییت است و سومین عبارت یک حرکت تصادفی است که پارامتر  $\alpha$  در آن یک عدد تصادفی در بازه صفر تا ۱ و پارامتر  $\epsilon$  توزیع یکنواخت است؛ همچنین پارامتر  $b$  معمولاً برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. مکانیسم الگوریتم کرم شب‌تاب ترکیبی استفاده‌شده در این مطالعه به صورت زیر است:

در این مطالعه از ترکیب الگوریتم کرم شب‌تاب چندهدفه بر اساس جواب‌های بهینه پارتو [۳۶]. با یک الگوریتم ابتکاری برای تبدیل جواب‌های تصادفی به جواب‌های شدنی از نظر روابط پیش‌نیازی استفاده شده است. مکانیسم این الگوریتم که برای نخستین بار توسط یانگ (۲۰۱۲)، ارائه شده به صورت زیر است [۳۶]:

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 بر اساس 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 محدودیت‌های پیش‌نیازی حاکم بین فعالیت‌ها (این عمل با به‌کارگیری الگوریتم ابتکاری معرفی‌شده انجام می‌شود)، جواب‌های تصادفی ایجادشده به کمک این الگوریتم به یک جواب شدنی بر اساس روابط پیش‌نیازی تبدیل می‌شوند؛

گام ۴: بررسی مجدد شدنی‌بودن 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 غیرمغلوب و انتقال آن‌ها به تکرار بعدی؛

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

در این مطالعه پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به صورت جدول ۳، تنظیم شده‌اند.

جدول ۳. پارامترهای تنظیم‌شده برای الگوریتم MOFA

پارامتر	مقدار تنظیم‌شده
تعداد کرم شب‌تاب	۳۰
تعداد تکرار	۱۰۰۰
$\alpha$	در هر تکرار عددی تصادفی بین ۱-۰ (این ضریب از همگرایی سریع کرم‌های شب‌تاب جلوگیری می‌کند و موجب جست‌وجوی بهتر فضای مسئله می‌شود)
$\beta_0$	۳
$\gamma$	-۰/۲

**الگوریتم ابتکاری.** الگوریتم‌های مورد استفاده برای حل این مسئله با یک الگوریتم ابتکاری ترکیب شده است که به‌کارگیری این الگوریتم به افزایش کارایی الگوریتم‌های اصلی منجر خواهد شد؛ زیرا جواب‌های غیرموجه (نشدنی) ایجاد شده توسط الگوریتم اصلی را به یک جواب شدنی نگاشت می‌کند و به عبارتی به ارضای (رابطه ۵-۸) مدل ریاضی ارائه شده منجر می‌شود. مکانیسم عملکرد این الگوریتم ابتکاری به صورت زیر است:

گام ۱: دریافت فهرست جواب تصادفی از الگوریتم اصلی حل؛

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

از نخستین فعالیت تا آخرین فعالیت در فهرست جواب تصادفی:

گام ۳: فعالیت  $\lambda$ ام بررسی شود، در صورتی که فعالیت (های) پیش‌نیاز آن در فهرست جواب شدنی قرار دارد (دارند) آن را به فهرست جواب شدنی اضافه و فعالیت  $\lambda$ ام از فهرست جواب تصادفی حذف شود؛

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

**معیار ارزیابی و مقایسه جواب‌های دو الگوریتم.** با توجه به تفاوت در ماهیت مسائل چندهدفه و تک‌هدفه، معیارهای ارزیابی جواب برای این مسائل نیز متفاوت است. دو الگوریتم مورد استفاده در این مطالعه از مفهوم جواب‌های پارتو کمک می‌گیرند و مجموعه‌ای از جواب‌های غیرمغلوب را گزارش می‌دهند؛ از این رو در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کرم شبتاب، علاوه بر زمان، هزینه و اثرات زیست‌محیطی به‌عنوان توابع هدف، چهار معیار تعداد<sup>۱</sup>، تنوع<sup>۲</sup>، فاصله<sup>۳</sup> و کیفی<sup>۴</sup> استفاده شده است که در ادامه تشریح می‌شوند. هریک از این معیارها رویکرد خاص خود را به مسائل چندهدفه دارند و قادر به سنجش ویژگی‌های متفاوتی هستند؛ به همین دلیل استفاده از چندین معیار به‌جای یک معیار می‌تواند ارزیابی جامع‌تری ارائه کند. در تعدادی از مطالعات مشابه، از زمان محاسباتی<sup>۵</sup> به‌عنوان معیار ارزیابی جواب استفاده شده است که با توجه به اینکه این معیار، وابستگی زیادی به مشخصات سخت‌افزاری رایانه و زبان یا نرم‌افزار برنامه‌نویسی مورد استفاده دارد در این مطالعه از این معیار استفاده نشده است [۳۲].

**معیار تعداد:** در این معیار ملاک تعداد اعضای غیرتکراری دو مجموعه پارتو تولیدشده توسط الگوریتم‌هاست که در واقع هرچه این تعداد بیشتر باشد عملکرد الگوریتم از دیدگاه این معیار بهتر است. به عبارتی بیشتر بودن تعداد اعضای مجموعه پارتو متناظر با تعداد حالات تصمیم بیشتر است که موجب تسهیل در روند تصمیم‌گیری مدیران می‌شود [۲۲].

**معیار تنوع:** زیتزلر و همکاران (۲۰۰۰)، معیار اندازه‌گیری خاصی را تعریف کردند که در آن طول قطر فضایی که توسط مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه جواب‌های پارتو به‌کار می‌رود، اندازه‌گیری می‌شود. بر طبق این معیار هرچه میزان تنوع بیشتر باشد، عملکرد الگوریتم بهتر ارزیابی می‌شود [۴۰].

**معیار فاصله:** این روش که توسط اسکات (۱۹۹۵) ارائه شده است از دیگر معیارهای بررسی نمودار پارتو است که میزان فاصله جواب‌ها از یکدیگر را بررسی می‌کند تا اندازه فاصله بین جواب‌های یک نقطه با نزدیک‌ترین همسایه‌اش را به‌دست آورد. این معیار را می‌توان هم به‌صورت معمولی و هم به‌صورت نرمالیزه در نظر گرفت. برخلاف دو معیار قبلی، در این معیار

- 
1. Quantity Criterion
  2. Diversity Criterion
  3. Spacing Metric
  4. Covering (Quality) metric
  1. CPU-Time

فاصله کمتر به معنای عملکرد بهتر الگوریتم است [۲۶].

**معیار کیفی:** این معیار به‌طور مستقیم به مقایسه جواب‌های پارتو دو الگوریتم می‌پردازد؛ به‌نحوی که دو مجموعه پارتو به‌دست‌آمده را مقایسه می‌کند و نسبت تعداد جواب‌های غالب را برای هر الگوریتم به‌دست می‌آورد. معمولاً مجموع این نسبت برای دو الگوریتم برابر یک می‌شود؛ به‌جز در مواردی که دو مجموعه پارتو به‌دست‌آمده دارای نقاط مشترک باشد که در این صورت مجموع می‌تواند بیش از یک شود [۷].

برای آزمون مدل ریاضی ارائه‌شده و عملکرد الگوریتم‌های حل معرفی‌شده باید از داده‌های عددی واقعی، خودساخته و یا استاندارد استفاده کرد. در بسیاری از پژوهش‌ها از مثال‌های خودساخته استفاده شده است که عمدتاً با روش‌های تولید تصادفی داده‌ها ایجاد شده‌اند. این داده‌ها صرفاً به منظور بررسی عملکرد مدل ریاضی و الگوریتم حل به‌کارگرفته شده است. دسته‌ای دیگر از مطالعات، از داده‌های یک پروژه واقعی استفاده کرده‌اند. دسته سوم مطالعات که سهم بیشتری در مطالعات مرور شده به خود اختصاص داده‌اند از داده‌های استاندارد موجود در کتابخانه<sup>۱</sup> PSPLIB استفاده کرده‌اند. مزیت استفاده از این داده‌ها در قابلیت مقایسه و همچنین ارزیابی جواب‌های به‌دست‌آمده با جواب‌های ثبت‌شده توسط دیگر پژوهشگران در این پایگاه است. با توجه به مزیت به‌کارگیری داده‌های استاندارد موجود در کتابخانه PSPLIB و همچنین به‌دلیل اینکه در ایران تاکنون شاخص‌های زیست‌محیطی به‌عنوان ملاک زمان‌بندی پروژه به‌کار نرفته است و به‌تبع چنین داده‌ای در پروژه‌های واقعی ایران وجود ندارد، در این مطالعه از داده‌های پروژه‌های استاندارد با اندازه‌های کوچک (۱۰ فعالیت)، متوسط (۱۸ فعالیت) و بزرگ (۳۰ فعالیت) استفاده شده است. ایجاد داده‌های استاندارد برای زمان‌بندی پروژه برای نخستین بار توسط دیویس (۱۹۹۷) انجام گرفت. وی تعداد ۸۳ مثال استاندارد از مسئله زمان‌بندی پروژه تحت شرایط محدودیت منابع ایجاد کرد. پاترسون (۱۹۹۹) تعداد ۱۱ مثال استاندارد و تالبوت و پاترسون (۱۹۹۹) ۱۰ مثال دیگر ایجاد کردند. مزیت این مسائل در آن است که نخست از طریق اینترنت قابل‌دسترس هستند و دوم، به‌طور مداوم در حال کامل‌شدن هستند و مدل‌های جدید به آن‌ها اضافه می‌شود؛ همچنین جواب‌های بهینه یا نزدیک به بهینه که تاکنون برای آن‌ها به‌دست آمده است در وبسایت ثبت شده و برای پژوهشگران قابل‌دسترس است.

در مسائل استاندارد ارائه‌شده در کتابخانه PSPLIB تنها زمان برای فعالیت‌ها مشخص شده است و برای دو تابع هدف دیگر در این مسئله داده‌ها به‌صورت زیر به این مسائل اضافه شده

۱. این کتابخانه حاوی مجموعه مسائل متفاوت برای انواع مسائل زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع به همراه جواب‌های بهینه و ابتکاری است. این مجموعه داده می‌تواند به منظور ارزیابی رویه‌های حل برای این دسته از مسائل به‌کار گرفته شود.  
<http://www.om-db.wi.tum.de/psplib/library.html>

است:

به منظور افزودن هزینه اجرای فعالیت‌ها در مسائل استاندارد از فعالیت‌های پروژه انتخاب شده و زمان اجرای فعالیت در هر حالت اجرایی، هزینه فعالیت در هر حالت اجرایی با استفاده از یک تابع وابسته به زمان انجام فعالیت محاسبه شد. برای لحاظ کردن عدم قطعیت و عدم امکان پیش‌بینی دقیق هزینه، درجه‌ای از تصادفی بودن در فرمول محاسبه هزینه لحاظ شده است. محاسبه هزینه هر فعالیت در هر حالت اجرایی از طریق رابطه زیر امکان پذیر است:

$$C_i = C_{i-1} - S_i (t_i - t_{i-1})$$

در این رابطه  $C_i$  و  $t_i$  نشان دهنده هزینه زمان اجرای فعالیت هستند و  $S_i$  ضریب تصادفی است؛ همچنین داده‌های مربوط به اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌ها در هر یک از حالت‌های اجرا به صورت تصادفی تعریف شده است. در جدول ۴، کد و مشخصات عمومی مسائل انتخاب شده از پایگاه PSPLIB ذکر شده است.

جدول ۴. مسائل منتخب از پایگاه PSPLIB

کد پروژه	تعداد فعالیت	بهترین زمان اجرا (با توجه به داده موجود در این پایگاه تاکنون)
J1014_5	۱۰	۱۹
J1053_6	۱۰	۲۹
J1814_5	۱۸	۱۶
J1853_6	۱۸	۱۸
J3014_5	۳۰	۱۹
J3053_6	۳۰	۲۶

**بیان مسئله و مدل‌سازی.** در سال‌های اخیر، مجامع علمی و نشست‌های متعددی پیرو تأکید بر اهمیت چارچوب توسعه پایدار برگزار شده است و همه آن‌ها راهکار توسعه در ابعاد گوناگون و تداوم این توسعه را منوط به رعایت و حرکت در قالب این چارچوب دانسته‌اند [۳۹]؛ از این رو سعی شد مدل جدیدی برای مسئله موازنه هزینه- زمان در پروژه با در نظر گرفتن اثرات زیست‌محیطی پروژه ارائه شود. اغلب مدل‌های ارائه شده در این حوزه، هزینه را یکی از اهداف مدل ریاضی ارائه شده برای برنامه زمان‌بندی فشرده در نظر گرفته‌اند و شاید هزینه با در نظر داشتن اصل هزینه- منفعت، در تمامی تصمیم‌های مدیریتی حضور داشته باشد؛ همچنین مطابق با تعریف پروژه که به ارائه محصول یا خدمتی منحصر به فرد در حوزه زمانی مشخص اشاره دارد، زمان تکمیل پروژه یکی دیگر از اهداف این مدل‌های ریاضی بوده است که در تمامی تصمیم‌های

مدیران پروژه رکن اساسی را ایفا می‌کند. باوجود این در مطالعات قبلی اثرات مخرب و منفی اجرای فعالیت‌ها و پروژه‌ها بر محیط‌زیست که ممکن است در صورت تسریع در تکمیل پروژه افزایش یابند، در نظر گرفته نشده‌اند. در این مطالعه با توجه به اهمیت محیط‌زیست و تعدد پروژه‌های صنعتی و عمرانی که غالباً دارای تأثیر قابل‌توجهی بر محیط اطراف خود هستند، تلاش شده است تا مدل ریاضی جدیدی با در نظر داشتن و افزودن متغیر آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌جامانده از پروژه، توسعه داده شود که در ادامه به بخش‌های مرتبط با آن پرداخته می‌شود.

**مفروضات مدل ریاضی.** هر مدل ریاضی، با توجه به میزان ساده‌سازی جهان واقعی، دارای مفروضات خاصی است که شناخت آن‌ها برای به‌کارگیری مدل ضروری است [۱۸]. مفروضات مدل ریاضی این مطالعه به شرح زیر است:

۱. فعالیت‌های پروژه ماهیتی چندحالتی دارند؛
۲. تعداد فعالیت‌ها و زمان، هزینه و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها همگی قطعی و مشخص هستند؛
۳. فعالیت‌های پروژه در حین انجام غیرقابل‌انقطاع هستند و پس از شروع فعالیت تا قبل از زمان پایان آن مجاز به توقف نیستند؛
۴. روابط پیش‌نیازی به‌صورت کلی ( $GPR^1$ ) تعریف می‌شوند.

#### شمارنده‌ها و نمادهای مدل ریاضی

$i = 1, 2, \dots, N$	شماره فعالیت
$j = 1, 2, \dots, M_i$	شماره مد فعالیت
$t = 1, 2, \dots, T$	t: معرف واحد زمانی پروژه است.
$EI = EI^1, EI^2, \dots, EI^{(N)}$	شمارنده شاخص‌های زیست‌محیطی درگیر با مسئله
H	مجموعه از جفت‌فعالیت‌هایی است که دارای روابط پیش‌نیازی هستند.

#### پارامترهای مدل ریاضی

$p_{ij}^{EI}$	اثر زیست‌محیطی فعالیت $i$ ام در مد $j$ ام برای شاخص زیست‌محیطی $EI$ ام
$p^{EI}$	آستانه اثر زیست‌محیطی برای شاخص زیست‌محیطی $EI$ ام
$C_{ij}$	هزینه اجرای فعالیت $i$ ام در مد $j$ ام
$d_{ij}$	زمان اجرای فعالیت $i$ ام در مد $j$ ام
$t_i$	بازه زمانی بین $es_i$ تا $ls_i$

1. General Precedence Relationship

- $es_i$  زودترین زمان شروع ممکن برای فعالیت  $i$  ام.
- $ls_i$  دیرترین زمان شروع ممکن برای فعالیت  $i$  ام تا تأخیری در زمان اتمام نهایی پروژه صورت ندهد.
- C سقف بودجه پروژه
- T سقف زمان تکمیل پروژه

**متغیر تصمیم مدل ریاضی.** متغیر تصمیم این مسئله از نوع صفر و یک است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} x_{ijt} = 1 & \text{هرگاه فعالیت } i \text{ ام در مد } t \text{ ام در زمان } t \text{ شروع شود.} \\ x_{ijt} = 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

**مدل ریاضی پژوهش.** مدل ریاضی ارائه شده برای این مسئله، بر اساس مدل موازنه هزینه - زمان گسسته طراحی و شاخص‌های زیست‌محیطی به آن اضافه شده است و مدل نهایی یک مدل خطی صفر و یک است.

**الف: توابع هدف مدل.** نخستین هدفی که هم در مسائل زمان‌بندی پروژه و هم در چارچوب توسعه پایدار به آن توجه شده، هزینه‌های اتمام پروژه است. اجرای هر فعالیت و هر حالت اجرای آن نیازمند صرف هزینه‌ای است که با توجه به حالت انتخاب شده برای اجرای هر فعالیت، مجموع هزینه‌های فعالیت‌های انتخاب شده برابر با هزینه اتمام پروژه خواهد شد. در این تابع هدف مطابق رابطه ۱، از سایر هزینه‌های پروژه مانند منابع چشم‌پوشی شده است.

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} C_{ij} \cdot x_{ijt} \quad \text{رابطه (۱)}$$

از مهم‌ترین اهدافی که در کلیه مسائل زمان‌بندی پروژه از قبیل RCPSP، TCTP و غیره مورد توجه قرار می‌گیرد، زمان اتمام پروژه است. از آنجاکه مدل ریاضی با توجه به شبکه فعالیت‌های پروژه نوشته می‌شود، در صورتی که زمان اتمام و یا شروع آخرین فعالیت پروژه (معمولاً فعالیت مجازی است) کمینه شود، زمان کلی پروژه نیز کمینه خواهد شد؛ بنابراین تابع هدف دوم مطابق با رابطه ۲، مدل ریاضی پژوهش به کمینه‌سازی زمان اتمام پروژه می‌پردازد.

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} t \cdot x_{Ijt} \quad \text{رابطه (۲)}$$

تابع هدف سوم این مطالعه، وجه تمایز مدل ارائه‌شده با سایر مدل‌های موجود در این زمینه است. در این تابع کمینه‌سازی اثرات زیست‌محیطی درگیر با پروژه مدنظر است. از آنجاکه هر پروژه با توجه به ماهیت و محیط اجرای آن، می‌تواند تبعات زیست‌محیطی متعددی را بر جای بگذارد، در حالت کلی می‌توان این تبعات را به سه دسته زیر تقسیم کرد:

- اثرات زیست‌محیطی پروژه بر هوا؛

- اثرات زیست‌محیطی پروژه بر خاک؛

- اثرات زیست‌محیطی پروژه بر آب.

به‌منظور حفظ کلیت مدل ارائه‌شده، هر سه دسته این اثرات در نظر گرفته می‌شود و تابع هدف نهایی از مجموع میزان اثرات هر دسته به دست می‌آید؛ همچنین برای ایجاد خاصیت جمع‌پذیری بین مجموع اثرات هر دسته، مجموع هر دسته بر میزانی به نام آستانه آن اثر تقسیم شده است و با بی‌وزن کردن آن، اثرات هر دسته با هم جمع شده‌اند. این آستانه می‌تواند از استانداردهای بین‌المللی پروژه و محیط‌زیستی به دست آید و یا توسط مدیران پروژه برای پروژه‌های خاص تعریف شود. در مدل ریاضی پیش رو، برای هر فعالیت در هر حالت اجرا، سه اثر زیست‌محیطی در نظر گرفته شده است که با EI نشان داده می‌شوند و آلودگی نهایی پروژه از مجموع آلودگی‌های سه دسته بالا برای حالت اجرای انتخاب‌شده برای فعالیت‌ها به دست خواهد آمد؛ بنابراین تابع هدف سوم این مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Min } Z_3 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{ij}^{EI(1)} \cdot x_{ijt}}{p^{EI(1)}} + \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{ij}^{EI(2)} \cdot x_{ijt}}{p^{EI(2)}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$+ \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{ij}^{EI(3)} \cdot x_{ijt}}{p^{EI(3)}}$$

**محدودیت‌های مدل ریاضی:** نخستین محدودیت مدل ریاضی ارائه‌شده، انتخاب تنها یک حالت اجرا برای هر فعالیت را در برنامه زمان‌بندی نهایی، تضمین می‌کند. از آنجاکه در این پژوهش، فرض بر آن است که هر فعالیت پروژه می‌تواند در چندین حالت، اجرا شود، این محدودیت (رابطه ۴) الزام انتخاب تنها یکی از حالت‌های اجرای فعالیت را تضمین می‌کند تا مدل در مرحله حل دچار اخلال نگردد.

محدودیت دوم تا پنجم این مدل ریاضی با توجه به ماهیت روابط پیش‌نیازی چهارگانه (شروع - شروع، شروع - پایان، پایان - شروع و پایان - پایان) موجود بین فعالیت‌های پروژه است. ماز آنجاکه فعالیت  $i$  ام تا قبل از اتمام کلیه فعالیت‌های پیش‌نیاز آن که با توجه به مجموعه



H مشخص می‌شود، قابل اجرا نیست؛ از این رو این محدودیت‌ها (رابطه ۵ تا ۸) اجازه شروع فعالیت را قبل از اتمام کلیه فعالیت‌های پیش‌نیاز آن نمی‌دهد.

سه محدودیت بعدی مدل به این منظور فرموله شده است تا بتواند در صورت خواست مدیر پروژه، حداکثر هزینه و زمان اجرا و اثرات زیست‌محیطی پروژه را محدود کند؛ البته با توجه به اینکه مسئله به صورت چندهدفه طراحی شده است، مجموعه پارتو<sup>۱</sup>، خود سعی بر پوشش حالت‌های مختلف اجرایی ممکن را خواهد داشت؛ اما این سه محدودیت (روابط ۹، ۱۰ و ۱۱) می‌تواند این نیاز مدیران پروژه را برآورده کند.

در ادامه مدل ارائه‌شده برای این پژوهش به صورت کلی ارائه شده است:

$$\text{Min } Z_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} c_{ij} \cdot x_{ijt} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} t \cdot x_{ijt} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{Min } Z_3 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{ij}^{EI(1)} \cdot x_{ijt}}{pEI(1)} + \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{ij}^{EI(2)} \cdot x_{ijt}}{pEI(2)} + \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{ij}^{EI(3)} \cdot x_{ijt}}{pEI(3)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

Subject To:

$$\sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} x_{ijt} = 1 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} (t + d_{ij} + FS_{ij}) x_{ijt} \leq \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} t \cdot x_{jtt}, \forall (i, j) \in H \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} (t + d_{ij} + SS_{ij}) x_{ijt} \leq \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} t \cdot x_{jtt}, \forall (i, j) \in H \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} (t + d_{ij} + SF_{ij}) x_{ijt} \leq \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} t \cdot x_{jtt}, \forall (i, j) \in H \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} (t + d_{ij} + FF_{ij}) x_{ijt} \leq \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} t \cdot x_{jtt}, \forall (i, j) \in H \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} c_{ij} \cdot x_{ijt} \leq C \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} t \cdot x_{ijt} \leq T \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

1. Pareto

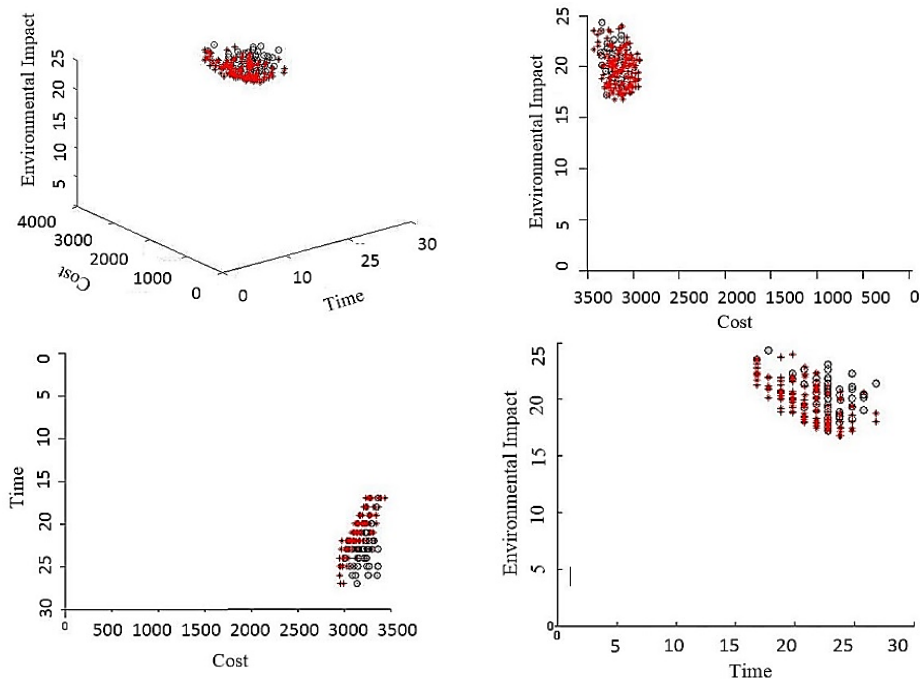
$$\frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{ij}^{EI(1)} \cdot x_{ijt}}{p_{ij}^{EI(T)(1)}} + \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{ij}^{EI(2)} \cdot x_{ijt}}{p_{ij}^{EI(T)(2)}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$+ \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{t=es_i}^{ls_i} p_{ij}^{EI(3)} \cdot x_{ijt}}{p_{ij}^{EI(T)(3)}} \leq 20$$

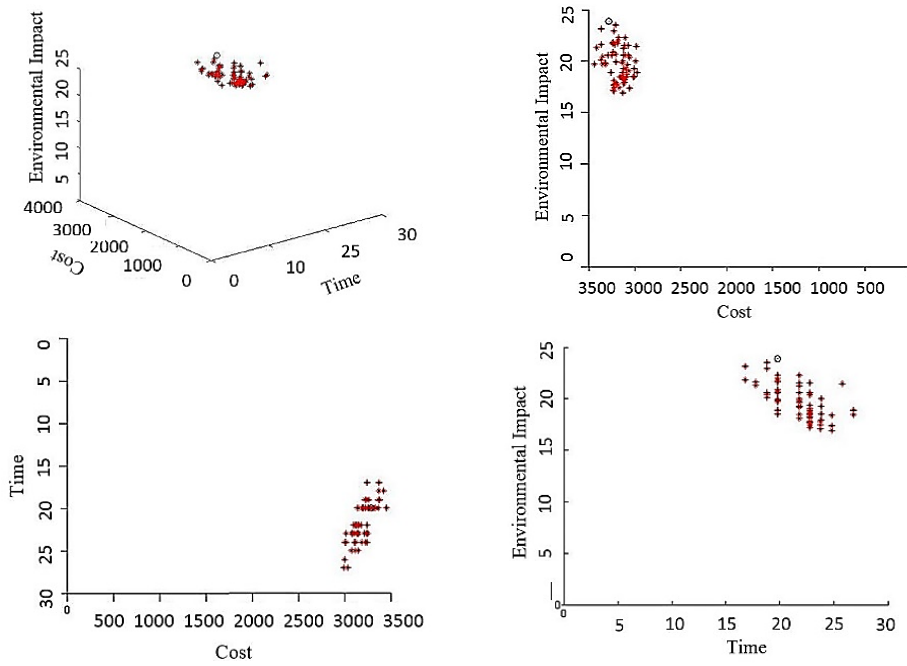
$$x_{ijt} \in \{0,1\} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

### ۵. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

به منظور حل مدل ریاضی ارائه شده با الگوریتم ازدحام ذرات شبیه‌سازی شده و کرم شبتاب، مدل ریاضی و روش‌های حل در محیط نرم‌افزار متلب نسخه R2014b کدنویسی شد و مجموعه جواب و جبهه پارتو<sup>۱</sup> به دست آمده در شکل‌های ۲ و ۳ مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲. مجموعه جواب‌های پارتو برای پروژه 5\_J3014/استخراجی از MOPSO



شکل ۳. مجموعه جواب‌های یارتو برای پروژه J3014\_5 استخراجی از MOFA

در جدول ۵، مقادیر توابع هدف به دست آمده برای پروژه‌های منتخب که حاصل اجرای الگوریتم MOFA و MOPSO برای داده‌های بالا است به همراه بهترین زمان انجام پروژه (که در سایت PSPLIB ثبت شده است) ارائه شده است.

جدول ۵. بهترین مقادیر توابع هدف برای مسائل منتخب با MOPSO و MOFA

الگوریتم حل	کد مسئله	بهترین زمان اجرای ارائه شده در PSPLIB	زمان تکمیل	هزینه تمام	اثرات زیست محیطی
MOPSO	J1014_5	۱۹	۱۹	۲۲۱۳	۱۹/۷۴
MOPSO	J1053_6	۲۹	۲۸	۱۹۲۲	۱۷/۳۲
MOPSO	J1814_5	۱۶	۱۶	۲۹۵۲	۱۷/۷۴
MOPSO	J1853_6	۱۸	۱۸	۲۶۹۲	۱۹/۴۱
MOPSO	J3014_5	۱۹	۱۸	۲۹۵۶	۱۶/۷۶
MOPSO	J3053_6	۲۶	۲۶	۲۵۸۲	۱۷/۱۹
MOFA	J1014_5	۱۹	۱۹	۲۲۵۶	۱۸/۵۱
MOFA	J1053_6	۲۹	۲۹	۱۹۵۲	۱۷/۱۵
MOFA	J1814_5	۱۶	۱۶	۲۹۵۲	۱۸/۲۴
MOFA	J1853_6	۱۸	۱۸	۲۶۹۹	۱۹/۸۶
MOFA	J3014_5	۱۹	۲۰	۲۹۹۸	۱۶/۹۲
MOFA	J3053_6	۲۶	۲۶	۲۶۵۳	۱۷/۹۱

با توجه به نتایج عددی به دست آمده از حل این مسئله می‌توان نتیجه گرفت که نخست، مدل ریاضی ارائه شده در این مطالعه، توانایی ارائه برنامه زمانی اجرای فعالیت‌های پروژه را دارد و از صحت لازم برخوردار است و دوم، این امکان را به مدیران پروژه‌های صنعتی و عمرانی می‌دهد تا بتوانند همزمان با اهداف اقتصادی و زمان اجرای خود، اثرات زیست محیطی پروژه‌های را نیز با مدل ریاضی و روش حل ارائه شده کنترل کنند. اعداد ارائه شده در جدول ۵، بهترین مقادیر به دست آمده برای هر یک از توابع هدف سه گانه در سناریوهای متعدد به دست آمده در جواب‌های الگوریتم‌های به کار رفته است. در مجموع ۶ مسئله حل شد و ۱۸ مقدار به دست آمده برای توابع هدف، الگوریتم MOPSO در ۱۳ مورد عملکرد برتر، ۴ مورد عملکرد یکسان و تنها در ۱ مورد عملکرد ضعیف‌تر از الگوریتم MOFA داشته است؛ از این رو در مقایسه عملکرد دو الگوریتم، MOPSO با مقادیر بهتر برای اغلب توابع هدف، عملکرد بهتری داشته است. در مقایسه عملکرد دو الگوریتم فراابتکاری به کار رفته در این مطالعه با نتایج موجود در پایگاه PSBLIB با توجه به نزدیک بودن اغلب مقادیر به دست آمده با مقادیر موجود و برتری یکی از جواب‌ها از جواب‌های موجود، می‌توان عملکرد هر دو الگوریتم در این زمینه را قابل قبول دانست. الگوریتم MOPSO با توجه به یک جواب بهتر نسبت به آنچه در این پایگاه ثبت شده است، عملکرد مناسبی داشته است. به منظور مقایسه عملکرد دو الگوریتم به کار رفته در این مطالعه علاوه بر مقادیر توابع هدف که در جدول ۵، ارائه شد از شاخص‌های ارزیابی معرفی شده در بخش قبل استفاده شده است که

نتایج آن برای این مطالعه در جدول ۶ مشاهده می‌شود. اعداد ارائه شده در این جدول میانگین پنج اجرای هر یک از الگوریتم‌های به کاررفته است. (برای ارائه بهتر نتایج و همچنین مقایسه راحت‌تر، اطلاعات معیارهای ارزیابی مربوط به یک پروژه ارائه شده است).

جدول ۶. معیارهای ارزیابی و مقایسه دو الگوریتم MOFA و MOPSO

مسئله J3014_5		مسئله J1814_5		مسئله J1014_5		معیار ارزیابی
MOFA	MOPSO	MOFA	MOPSO	MOFA	MOPSO	
۱۳۷	۱۶۱	۱۸۹	۲۲۱	۲۰۵	۲۴۱	تعداد
۴۵۹/۸۵	۴۲۷/۳۰	۳۷۶/۸۱	۴۱۱/۹۱	۴۷۹/۶۲	۴۴۴/۲۶	تنوع
۲/۵۱۶	-/۶۱۱	۲/۵-۳۱	-/۷۸۳۲	۴/۳۹۳	۱/۳۷۶	فاصله
۰/۵۲۹	۰/۶۵۲	۰/۵۱	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۶۴	کیفی

در مقایسه دو الگوریتم به کاررفته در این مطالعه از حیث شاخص‌های ارزیابی جواب (جدول ۶) الگوریتم MOPSO از عملکرد بهتری برخوردار بوده است. این الگوریتم در ۸۳ درصد شاخص‌های استفاده شده، مقادیر بهتری به دست آورده است و این امر نشان از برتری عملکرد این الگوریتم نسبت به الگوریتم MOFA دارد.

## ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش علاوه بر ارائه یک مدل ریاضی جدید، با در نظر داشتن چارچوب توسعه پایدار و تأکید بر بُعد زیست‌محیطی آن، از ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه و الگوریتم کرم شب‌تاب چندهدفه با یک الگوریتم ابتکاری برای حل استفاده شد؛ سپس به کمک مدل ریاضی جدید ارائه شده، یک چارچوب مفهومی برای زمان‌بندی فعالیت‌های یک پروژه ارائه شد که به کمک آن می‌توان گزینه‌های مختلف اجرای پروژه‌ها را با هزینه، زمان و اثرات زیست‌محیطی مشخص، بررسی کرده و از این طریق با توجه به اهداف هر پروژه بهترین تصمیم را اتخاذ کرد. نتایج اجرای دو الگوریتم برای داده‌های مسائل استاندارد موجود در پایگاه PSPLIB، سناریوهای شدنی برای اجرای فعالیت‌های این پروژه‌ها با مقادیر متفاوت برای توابع هدف است. این نتایج نشان از صحت مدل ریاضی ارائه شده و توانایی آن در ارائه یک جدول زمانی شدنی برای پروژه‌ها دارد. اجرای برنامه حل این مسئله بر روی سیستم عامل Windows با مشخصات سخت‌افزاری CPU Core i5 و RAM 4 انجام شد. با توجه به تعداد حالات ممکن برای این مسئله، می‌توان عملکرد این دو الگوریتم را قابل قبول دانست.

در مقایسه عملکرد دو الگوریتم، در مجموع الگوریتم MOPSO با مقادیر برابر یا بهتر برای توابع هدف (جدول ۵) عملکرد بهتری داشته است. با در نظر داشتن مکانیسم جست‌وجوی این

الگوریتم می‌توان این برتری را به هوش جمعی به‌کارگرفته‌شده و همچنین تمایل حرکت ذرات به سمت نقاط بهینه محلی و بهینه سراسری در این الگوریتم که از طریق ضرایب همگرایی عمل می‌کند، نسبت داد که توانسته است به نقاط شدنی بهتری دست پیدا کند؛ درحالی‌که الگوریتم MOFA با استفاده از تابع حرکت ذرات ساده‌تر (تمایل حرکت ذرات تنها به سمت بهینه سراسری است) این امکان را نداشته و عملکرد ضعیف‌تری در این مطالعه داشته است.

در مقایسه دو الگوریتم به‌کاررفته در این مطالعه از نظر شاخص‌های ارزیابی جواب (جدول ۶)، الگوریتم MOPSO از عملکرد بهتری برخوردار بوده است. این الگوریتم در اغلب شاخص‌های استفاده‌شده در مسائل منتخب به مقادیر بهتری دست یافته است که نشان از برتری عملکرد این الگوریتم نسبت به الگوریتم MOFA دارد. شاخص تعداد جواب پارتو، نشان‌دهنده برتری نقاط مورد بررسی به‌صورت هوشمند است. شاخص تنوع و فاصله به میزان پراکندگی جواب‌ها و نحوه پراکندگی آن‌ها در فضای شدنی مسئله اشاره دارد و معیار کیفی سهم هر الگوریتم در جواب‌های پارتو نهایی را نشان می‌دهد که در اغلب این شاخص‌ها (به‌جز دو نتیجه برای شاخص تنوع)، الگوریتم MOPSO توانسته عملکرد بهتری داشته باشد.

علی‌رغم برتری الگوریتم ازدحام ذرات در دو مقایسه مقادیر توابع هدف و شاخص‌های ارزیابی، الگوریتم کرم شب‌تاب نیز مقادیر نزدیک به مقادیر الگوریتم ازدحام ذرات را به دست آورده که می‌تواند عملکرد قابل‌قبولی در این مسئله NP-Hard به‌حساب آید.

خروجی‌های این مطالعه نشان داد که مدیران و ذی‌نفعان پروژه‌های عمرانی و صنعتی در صورت دراختیارداشتن اطلاعات اثرات زیست‌محیطی فعالیت‌های پروژه خود می‌توانند همزمان با اهداف اقتصادی و زمانی به محیط‌زیست اطراف خود نیز توجه داشته باشند و مجموع اثرات مخرب ناشی از اجرای پروژه بر محیط‌زیست را به‌عنوان یک مقدار قابل‌سنجش کمینه کنند؛ بدین منظور می‌توان از مدل ریاضی و روش حل به‌کاررفته در این مطالعه کمک گرفت و به کنترل اثرات زیست‌محیطی پروژه‌ها پرداخت.

## منابع

1. Afshar, A. & Zolfaghar Dolabi, H. R. (2014). Multi-Objective Optimization Of Time-Cost-Safety Using Genetic Algorithm. *Int. J. Optim. Civ. Eng.*, 4(4), 433–450.
2. Afshar, A., Kaveh, A., & Shoghli, O. R. (2007). Multi-Objective Optimization of Time-Cost-Quality Using Multi-Colony Ant Algorithm. *Asian J. Civ. Eng. (Building Housing)*, 8(2), 113–124.
3. Asadian Ardakani, F. & Morovvati Sharif Abadi, A. (2011). Combining Particle Swarm Optimization with CUL heuristic Algorithm for solving Tow Dimension cutting Problem. *Journal of Industrial Management Perspective*, 1(3), 121- 138.
4. Atkinson, R. (1999). Cost, time and quality , two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *Int. J. Proj. Manag.*, 17(6), 337–342.
5. Chao-guang, J. I. N., Zhuo-shang, J., Yan, L. I. N., Yuan-min, Z. & Zhen-dong, H. (2005). Research on the fully fuzzy time-cost based on genetic algorithms. *J. Mar. Sci. Appl.*, 4(3), 18–23.
6. 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.
7. Coello, C.C., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A. (2007). Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. *Springer Science & Business Media*.
8. Dunne, P., De, E. J., Ghosh, J. B., & Wells, C. E. (1995). Invited Review The discrete time-cost tradeoff problem revisited. *Eur. J. Oper. Res.*, 81, 225–238.
9. Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. *MHS'95. Proc. Sixth Int. Symp. Micro Mach. Hum. Sci.*, 39–43.
10. El-kholy, A. M. (2013). Time – cost tradeoff analysis considering funding variability and time uncertainty. *Alexandria Eng. J.*, 52(1), 113–121.
11. Farsijani, H., Fattahi, M., & Norozi, M. (2012). Selecting Inter-Acted Project Portfolio by Using of Particle Swarm Optimization Algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 2(5), 27- 49.
12. Hajshirmohammadi, A. (1998). *Project Control and Management*. Jahad-e-Daneshgahi Press, Isfahan, Iran.
13. Hajshirmohammadi, A. (2009) *Project Control and Management*. Jahad-e-Daneshgahi Press, Isfahan, Iran.
14. Jafarnejad, A. (2002). *Production and Operation Management*. University of Tehran Press, Tehran, Iran.
15. Jalali Naeini, S. Jafari Skandari, M. and Nozari, H. (2012), *Engineering Optimization Rely on Methaheuristic Methods*, Dibagaran-e-Tehran Press, Tehran, Iran.
16. Kennedy, J. F., Eberhart, R. C., & Shi, Y. (2001). *Swarm intelligence*. Morgan Kaufmann.
17. Mehdizadeh, A. & Mohsenian, O. (2009). Solving Time-Cost-Quality Trade-off Problem with Multi-objective stochasting programming. *Sharif management and industrial engeering*, 2(28), 102-111.
18. Mehregan, M. (2012). *Mathematical Modeling*, SAMT Press, Tehran, Iran.

19. Mirghaderi, S., & Zandiyeh, M. (2011). Designing a New Meta-heuristic Algorithm Relying On Behavior of  $x\cos(x)$  and  $\tanh(x)$  Functions. *Journal of Industrial Management Perspective*, 1(2), 107- 125.
20. Moore, J., & Chapman, R. (1999). Application of particle swarm to multiobjective optimization. *Dep. Comput. Sci. Softw. Eng. Dep. Auburn Univ.*, 1-4.
21. Nabipoor Afrouzi, E., Abbas Najafi, A., Roghanian, E., & Mazinani, M. A Multi-Objective Imperialist Competitive Algorithm for solving discrete time , cost and quality trade-off problems with mode-identity and resource-constrained situations. *Comput. Oper. Res.*, 50, 80-96, 2014.
22. Nazeri, A., & Bafruei, M. K. (2015). Implementation of meta-heuristic algorithms for supplier selection and evaluation and multi product order allocation. *J. UMP Soc. Sci. Technol. Manag.* 3(3).
23. Rahimi, M. & Iranmanesh, H. (2008). Multi Objective Particle Swarm Optimization by An Evolutionary Algorithm. *World Appl. Sci. J.*, 4(2), 270-276.
24. Ray, T., Kang, T., & Kian Chye, S. (2002). Multiobjective Design Optimization by An Evolutionary Algorithm. *Eng. Optim.*, 33(4).
25. Sabze parvar, M. (2014). *Project Control and Management*. Termeh Press, Tehran, Iran.
26. Schott, J. R. (1995). *Fault Tolerant Design Using Single and Multicriteria Genetic Algorithm Optimization*. DTIC Document,.
27. 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.*, 4(42), 2081-2094.
28. Shahsavari Pour, N., Modarres, M., & Tavakkoli-moghaddam, R. (2012). Time-Cost-Quality Trade-off in Project Scheduling with Linguistic Variables. *World Appl. Sci. J.*, 18(3), 404-413.
29. Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. John Wiley & Sons.
30. Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2006). On the discrete time, cost and quality trade-off problem. *Appl. Math. Comput.*, 181, 1305-1312.
31. Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2007). A solution procedure for the discrete time, cost and quality tradeoff problem using electromagnetic scatter search. *Appl. Math. Comput.*, 190, 1136-1145.
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.*, 41, 1830-1846.
33. 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.*, 41, 1830-1846.
34. Wei-Min, M., Qing-Hai, L., & Hua, K. (2014). A Stochastic Time-cost-quality Tradeoff Model for Discrete Project Scheduling Problem. *International Conference on Management Science and Management Innovation (MSMI 2014)* , 318-323.
35. Yaghini, M., & Akhavan Kazemzadeh, M. R. (2010). DIMMA: A Design and Implementation Methodology for Metaheuristic Algorithms – A Perspective from Software Development. *Int. J. Appl. Metaheuristic Comput.*, 1(4).



36. Yang, X. (2012). *Multiobjective firefly algorithm for continuous optimization*. pp. 13–15.
37. Yang, X.-S. (2010). Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimization. *Int. J. Bio-Inspired Comput.*, 2(2), 78–84,.
38. Zahedi, Sh., & Najafi, Gh. (2006). *Conceptual Framework for sustainable Development*. Modares Olome Ensani, 10 /4)
39. Zahedi, Sh. (2013). *Sustainable Development*. SAMT Press, Tehran, Iran.
40. Zitzler, E., Deb, K. & Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evol. Comput.*, 8(2), 173–195.