

تخصیص و زمان‌بندی واحدهای امداد در بلائیای طبیعی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات

سینانیری: دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
ابراهیم اسدی گنگرج*: استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، e.asadi@nit.ac.ir
سعید امامی: استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۲۵

چکیده

حوادث و بلائیای طبیعی مانند زلزله، سیل و سونامی هرساله خسارات جانی و مالی فراوانی به جای می‌گذارد. از این رو داشتن یک سیستم تصمیم‌گیری هوشمند برای مقابله با این حوادث ضروری به نظر می‌رسد. به منظور تخصیص و زمان‌بندی کارآمد واحدهای امداد در بلائیای طبیعی، در این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با هدف کمینه‌کردن وزن‌دار زمان اتمام کل کارها با در نظر گرفتن اثر خستگی ارائه شده است. امدادگران پس از رسیدگی به چند حادثه خسته می‌شوند و بازدهی آن‌ها کاهش می‌یابد و برای امداد رسانی به باقی حوادث نیاز به زمان بیشتری دارند. با توجه به پیچیدگی مسئله، حل مدل با استفاده از ابزارهای حل دقیق بسیار زمان‌بر است. در نتیجه برای حل این مسئله از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته استفاده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده الگوریتم ژنتیک از نظر زمان حل مسئله عملکرد بهتری دارد و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته نیز پاسخ‌های باکیفیت‌تری ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت بلائیای طبیعی، تخصیص و زمان‌بندی، اثر خستگی، ماشین‌های موازی نامرتب

Allocation and Scheduling The Rescue Units in Natural Disasters Using Genetic and Particle Swarm Optimization Algorithms

Sina Nayeri¹, Ebrahim Asadi-Gangraj^{2*}, Saeed Emami³

Abstract

Natural disasters, such as earthquakes, tsunamis, and hurricanes cause enormous harm each year. Thus it is necessary to have an intelligent decision support system in these disasters. To allocate and schedule rescue units efficiently, we develop a mix integer nonlinear programming model (MINLP) to minimize the sum of weighted completion times of relief operations with fatigue effect consideration. After relief to several incidents, rescuers become tired and need more time to relief the remaining incidents assigned to them. Because of the complexity of the candidate problem, finding the optimal solution for this complicated problem in a reasonable time using exact optimization tools is very time-consuming; thus, two meta-heuristics, Genetic algorithm (GA) and Enhanced particle swarm optimization (EPSO) are proposed to solve the candidate problem. The experimental results show that the GA has better performance in CPU time criteria and the EPSO generates better solutions for entire test problems.

Keywords: *Natural disaster management, Allocation & scheduling, Fatigue effect, unrelated parallel machine*

¹ M.Sc. student, Department of industrial engineering, Babol Noshirvani University of Technology

² Assistant Professor of Industrial Engineering, Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran; Email: e.asadi@nit.ac.ir

³ Assistant professor, Department of industrial engineering, Babol Noshirvani University of Technology

۵

شماره چهاردهم

پاییز و زمستان

۱۳۹۷

دوفصلنامه

علمی و پژوهشی



تخصیص و زمان‌بندی واحدهای امداد در بلائیای طبیعی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات

بی‌تردید، یکی از مهم‌ترین مسائلی که مسئولان و مدیران یک کشور با آن روبه‌رو هستند، مدیریت بحران و حوادث است. بلایای طبیعی نظیر زلزله، سیل و طوفان سالانه آسیب‌های جانی و مالی فراوانی به ملت‌ها وارد می‌کنند که در ایران می‌توان به زلزله‌ی رودبار و بم اشاره کرد. از این‌رو داشتن آمادگی لازم برای برخورد با این حوادث بسیار ضروری به نظر می‌رسد و نیاز است که عملیات امدادرسانی فوراً توسط نیروهای امدادگر انجام شود. یکی از مهم‌ترین وظایف مراکز واکنش اضطراری، تخصیص و زمان‌بندی مؤثر و کارآمد نیروهای امداد و نجات است [۱]. با توجه به محدودیت‌هایی نظیر کمبود زمان، توانایی واحدهای امداد در انجام کارها (برای مثال ممکن است یک گروه مخصوص امدادرسانی برای حادثه آتش‌سوزی و گروهی برای امدادرسانی به حادثه‌ی زلزله وجود داشته باشد) و سایر محدودیت‌ها، تدوین یک برنامه‌ی کارا برای مراکز عملیات اورژانس بسیار دشوار است.

با توجه به ماهیت این مسئله، می‌توان مسئله‌ی برنامه‌ریزی و تخصیص واحدهای امداد را به مسیریابی و زمان‌بندی تشبیه کرد. در ارتباط با تشابه این مدل با مسئله‌ی مسیریابی، می‌توان آن را مشابه با مسئله‌ی چند فروشنده‌ی دوره‌گرد ($mTSP$) در نظر گرفت که در آن واحدهای امداد همان فروشنده‌ها و حوادث معادل شهرها (گره‌ها) هستند. زمان سفر از یک شهر به شهر دیگر (از یک گره به گره‌ی دیگر) را می‌توان زمان مورد نیاز برای سفر واحدهای امداد بین دو حادثه در نظر گرفت. همچنین می‌توان این مسئله را به صورت مسئله‌ی زمان‌بندی ماشین‌های موازی نامرتب با زمان راه‌اندازی وابسته به توالی و با هدف کمینه کردن زمان اتمام کارها که در وزن کارها ضرب شده در نظر گرفت. در این تشابه حوادث معادل کارها و واحدهای امداد معادل ماشین‌ها هستند. زمان امدادرسانی به حوادث همان زمان پردازش کارها و زمان مورد نیاز گروه امداد برای سفر بین دو حادثه را نیز می‌توان زمان راه‌اندازی وابسته به توالی در نظر گرفت. این مسئله را در ادبیات مسائل زمان‌بندی و توالی عملیات و بر اساس مدل سه‌بخشی گراهام، می‌توان به صورت $R / ST_{SD} / \sum w_{rc}$ نمایش داد و با استفاده از همین تشابه می‌توان نشان داد که مسئله‌ی تخصیص و زمان‌بندی واحدهای امداد در بلایای طبیعی یک مسئله‌ی پیچیده (NP-Hard) است [۲].

در زمان‌بندی سنتی و در حالت قطعی، زمان پردازش کارها معمولاً ثابت در نظر گرفته می‌شود، اما این فرض ممکن است درست نباشد. برای مثال امدادگران را در نظر بگیرید؛ بدیهی است که بدن انسان پس از انجام فعالیت‌های پیاپی از لحاظ توان جسمانی افت کرده و بازدهی آن کاهش می‌یابد. می‌توان گفت که واحدهای امداد نیز پس از امدادرسانی به چند حادثه دچار خستگی شده و این امر احتمالاً موجب افزایش زمان مورد نیاز آن‌ها برای امدادرسانی خواهد شد.

در این پژوهش، یک مدل پشتیبانی تصمیم‌گیری برای زمان‌بندی و تخصیص واحدهای امداد پیشنهاد شده است. برای شباهت بیشتر مدل پیشنهادی به دنیای واقعی، برای واحدهای

امداد قابلیت‌های خاصی در نظر گرفته شده است و هر واحد امداد نمی‌تواند به همه نوع حادثه رسیدگی کند و تخصیص حوادث به امدادگران بر اساس محدودیت توانایی آن‌ها صورت می‌گیرد و همچنین اثر خستگی واحدهای امداد و تأثیر آن بر روی زمان امدادرسانی در مسئله لحاظ شده است.

در ادامه‌ی این تحقیق به بیان ادبیات و پیشینه‌ی پژوهش، تعریف مسئله، معرفی الگوریتم‌های پیشنهادی و ارائه‌ی نتایج محاسباتی می‌پردازیم و در انتها نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه می‌گردد.

ادبیات و پیشینه‌ی پژوهش

در ادبیات و پیشینه‌ی تحقیقات مربوط به مدیریت بلایای طبیعی، چالش‌ها و عملکردهای مربوطه به سه بخش دسته‌بندی شدند: ۱. بخش پیش‌گیری و آمادگی که مربوط به دوره‌ی قبل از وقوع حادثه می‌شود، ۲. بخش واکنش یا پاسخ، که مربوط به زمان وقوع حادثه و زمان اندکی پس از آن می‌شود، و ۳. بخش بهبود و ترمیم^۲ که مربوط به زمان بلندمدت بعد از وقوع حادثه می‌شود [۳]. [۴، ۵]. با توجه به تعاریف موجود در ادبیات، بخش پیش‌گیری و آمادگی شامل برنامه‌ریزی، پیش‌بینی، هشدار زودهنگام و استقرار تسهیلات و خدمات اورژانسی مورد نیاز است [۶، ۷، ۸، ۹]. هدف اصلی از بخش واکنش (پاسخ) نیز نجات دادن افراد از حادثه و تثبیت وضعیت نجات‌یافتگان است که شامل وظایفی نظیر کمک به افراد و تسکین مصدومان، ایجاد سرپناه، درمان مجروحان و اموری از این قبیل می‌شود [۱۰، ۱۱]. در بخش بهبود و ترمیم نیز وظایفی همچون تجزیه و تحلیل داده‌ها، مرمت و بازسازی خرابی‌های به وجود آمده و ارائه‌ی سایر خدمات مورد نیاز مطرح است [۱۲، ۱۳، ۱۴]. با هدف ارائه‌ی مدل پشتیبان تصمیم‌گیری، از ترکیب کردن روش‌های آمار کاربردی و تئوری احتمالات با رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی برای ایجاد الگوهایی که به رهبران در دقایق بحرانی تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری کمک کند، استفاده شده است [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹]. در تحقیقات اولیه، مکانیسم‌های رقابتی و مکانیسم‌های همکاری و تعاونی توسعه یافتند و مدل‌های ریاضی برای آن‌ها ارائه شد [۲۰]. در بخش دوم تحقیقات، می‌توان به پژوهش‌های لیفر [۲۱] و فن دی ویل و همکارانش [۲۲] برای پر کردن شکاف بین اصول طراحی سیستم‌های اطلاعاتی و فرایند تشکیل سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری اشاره کرد. در جریان سوم پژوهش، از نتایج تصمیم‌گیری‌های گذشته استفاده شد تا دوره‌های آموزشی نوینی ایجاد کند [۲۳]. در گام چهارم، بر روی فرایند تصمیم‌گیری بر اساس عوامل متمرکز و غیرمتمرکز تحقیقاتی انجام شد [۲۴].

رولند و همکارانش [۲۵] در سال ۲۰۱۰ با ارائه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی واحدهای امداد و تخصیص آن‌ها به حوادث، موجب بهبود بحث هماهنگی متمرکز شدند. اما مدل آن‌ها این موضوع را که حوادث مختلف سطح شدت متفاوتی دارند در نظر نگرفته بود. در راستای حل این مشکل، وکس و همکارانش [۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹] در چند تحقیق متوالی در

جدول ۱: طبقه‌بندی برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های مرتبط با موضوع

ردیف	نویسندگان	سال	مدل ریاضی	تخصیص و زمان بندی واحدهای امداد	زمان پردازش	روش حل
۱	فیدریچ و همکاران [۲۰]	۲۰۰۰	خطی	×	×	تبرید شبیه‌سازی شده
۲	تامورا و همکاران [۱۹]	۲۰۰۰	خطی	×	×	تابع ارزش تحت ریسک
۳	کامفرت و همکاران [۱]	۲۰۰۴	×	×	×	
۴	التای و گرین [۴]	۲۰۰۶	×	×	×	
۵	لیفر [۲۱]	۲۰۰۸	×	×	×	
۶	عجمی و همکاران [۳]	۲۰۰۹	×	×	×	
۷	رولند و همکاران [۲۵]	۲۰۱۰	غیرخطی	✓	ثابت	جستجوی ممنوعه
۸	وکس و همکاران [۲۶]	۲۰۱۱	غیرخطی	✓	ثابت	شبیه‌سازی مونت کارلو
۹	وکس و همکاران [۲۷]	۲۰۱۲	غیرخطی	✓	ثابت	شبیه‌سازی مونت کارلو
۱۰	وکس و همکاران [۲۸]	۲۰۱۳	غیرخطی	✓	ثابت	شبیه‌سازی مونت کارلو
۱۱	وکس و همکاران [۲۹]	۲۰۱۴	غیرخطی	✓	ثابت	ابتکاری و شبیه‌سازی مونت کارلو
۱۲	تحقیق حاضر		خطی	✓	وابسته به نوبت انجام کار با توجه به پدیده‌ی اثر خستگی	دو روش فراابتکاری

سیمپلکس، شاخه و کران و ... و حل تقریبی (مانند الگوریتم‌های فراابتکاری) تقسیم نمود که معمولاً زمانی که مدل پیچیده است یا ابعاد مسئله بزرگ است و استفاده از روش‌های حل دقیق از نظر زمان حل توجیه‌پذیر نیست، از روش‌های حل تقریبی استفاده می‌شود. از طرفی ممکن است برخی الگوریتم‌ها برای برخی مسائل کارا نباشند، از این رو باید در انتخاب الگوریتم مناسب برای حل مدل توجه نمود. الگوریتم‌ها را معمولاً از نظر زمان حل و کیفیت جواب به دست آمده با یکدیگر مقایسه می‌کنند تا الگوریتم کارا تر تعیین گردد.

در این تحقیق با توجه به پژوهش‌های پیشین، مدلی برای تخصیص و زمان بندی واحدهای امداد در بلایای طبیعی ارائه شده و سپس الگوریتم‌هایی برای حل مدل پیشنهاد گردیده است. پس از حل مسئله، عملکرد الگوریتم‌ها از نظر زمان حل و کیفیت پاسخ‌های به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. تصویر ۱ طرح کلی این پژوهش را نشان می‌دهد.

مدل ریاضی

در این بخش، مدل پیشنهادی برای زمان بندی و تخصیص واحدهای امداد به حوادث ارائه می‌شود. n حادثه و m گروه امداد در نظر گرفته می‌شود که هر واحد امداد، ظرفیت انجام R نوبت کاری را دارد. اندیس i و j برای حوادث، اندیس k برای واحدهای امداد و اندیس l برای نوبت‌های کاری در نظر گرفته شده است. پارامترهای مدل شامل شدت اثر حوادث، زمان پردازش استاندارد (زمان امداد رسانی) و زمان سفر از یک حادثه به حادثه‌ی دیگر است و متغیرهای تصمیم نیز شامل متغیر صفر و یک تخصیص، زمان آغاز، زمان پردازش واقعی و زمان اتمام کار است. هدف مدل برنامه‌ریزی ریاضی کمینه کردن زمان وزنی اتمام کل عملیات امداد رسانی است (رابطه‌ی ۱).

سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ مدلی برای زمان بندی و تخصیص واحدهای امداد برای امداد رسانی به حوادث در حالات قطعی و غیرقطعی ارائه دادند.

به منظور مشاهده‌ی سیر تحقیقات و تعیین جایگاه تحقیق حاضر، برخی از مهم‌ترین تحقیقات در رابطه با موضوع تحقیق بر اساس ویژگی‌هایشان در جدول ۱ طبقه‌بندی شده‌اند.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بررسی مسئله‌ی مدیریت بحران از دیدگاه تخصیص و زمان بندی دارای پیشینه‌ی نسبتاً کمی است و از سال ۲۰۱۰ توسط رولند مطرح شد و در سال‌های بعد توسط وکس مورد بررسی قرار گرفت. در تمام پژوهش‌های قبلی، زمان پردازش (زمان امداد رسانی) ثابت در نظر گرفته شده است، در حالی که می‌توان این امر را پذیرفت که واحدهای امداد پس از امداد رسانی به چند حادثه خسته شده و بازدهی آن‌ها کاهش یافته و این امر موجب افزایش زمان امداد رسانی (پردازش) خواهد شد. از این رو در این مقاله، با ارائه‌ی مدلی وجود پدیده‌ی اثر خستگی در مسئله‌ی تخصیص و زمان بندی واحدهای امداد در بلایای طبیعی بررسی می‌شود. همچنین برای حل این مسئله یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط خطی به همراه دو روش فراابتکاری ارائه شده است.

روش تحقیق

هدف این پژوهش استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی^۳ برای مسئله‌ی تخصیص و زمان بندی واحدهای امداد در بلایای طبیعی و ارائه‌ی الگوریتم مناسب برای حل آن است و مدل ارائه شده باید با روشی مناسب حل شود تا نتایج مورد نظر به دست آیند. برای حل مدل‌های ریاضی، رویکردها و الگوریتم‌های بسیاری توسط محققان ارائه شده است. به طور کلی می‌توان روش‌های حل مدل‌های ریاضی را به روش‌های حل دقیق (مانند روش

۷

شماره چهاردهم
پاییز و زمستان
۱۳۹۷

دوفصلنامه
علمی و پژوهشی



تخصیص و زمان بندی واحدهای امداد در بلایای طبیعی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات

استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی برای مسئله‌ی مدیریت بحران

بیان مسئله و تعیین پارامترها و متغیرهای مدل ریاضی

توسعه‌ی مدل برنامه‌ریزی ریاضی با توجه به فرضیات و محدودیت‌های مسئله

طراحی و ارائه‌ی الگوریتم‌های مناسب حل مدل ریاضی پیشنهادی

تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از حل مسئله و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های ارائه‌شده

نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی

تصویر ۱: طرح کلی تحقیق

کردن این امر در مدل از رابطه‌ی ۱۲ استفاده شده است. رابطه‌ی ۱۳ بیان می‌کند که زمان آغاز حادثه‌ی مجازی برابر صفر است و مجموعه روابط ۱۴ و ۱۵ محدوده‌ی متغیرها را نشان می‌دهد.

فرضیات مسئله به شرح زیر است:

- تعداد حوادث از تعداد واحدهای امداد در دسترس بیشتر در نظر گرفته شده است ($m < n$)
- تمامی واحدهای امداد کار خود را از ایستگاه مرکزی آغاز می‌کنند.
- انقطاع در عملیات مجاز نیست و عمل امداد رسانی به یک حادثه نباید متوقف شود.
- برای هر واحد امداد توانایی خاصی در نظر گرفته شده است و واحدهای امداد نمی‌توانند به همه‌ی حوادث امداد رسانی کنند، البته یک گروه امداد می‌تواند بیش از یک توانایی داشته باشد. این فرض برای شباهت بیشتر مسئله به دنیای واقعی در نظر گرفته شده است.
- واحدهای امداد برای عملیات امداد رسانی باید بین دو حادثه‌ی مختلف سفر کنند و زمان سفر برای آن‌ها لحاظ می‌شود.
- برای هر حادثه یک وزن در نظر گرفته شده که همان شدت اثر حادثه است. این امر با توجه به اینکه در واقعیت همه‌ی حوادث دارای شدت و آثار تخریب یکسان نیستند و برخی حوادث دارای شدت اثر بیشتری هستند لحاظ گردیده است.
- همچنین در این مدل اثر خستگی وجود دارد و زمان پردازش کارها ثابت نیستند بلکه با توجه به موقعیت (نوبت) آن‌ها در زمان بندی واحد امدادی که به آن تخصیص یافته‌اند، زمان پردازش آن‌ها تعیین می‌شود.

با توجه به توضیحات ارائه شده، مدل ریاضی مسئله‌ی تخصیص و زمان بندی واحدهای امداد در بلایای طبیعی با در نظر گرفتن اثر خستگی به شرح زیر است:

رابطه‌ی ۱:

$$\text{Min} \sum_i \sum_k DL_i \cdot FT_{ik} \quad i = 1, \dots, n$$

رابطه‌ی ۲:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{r=1}^R X_{ikr} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, R$$

رابطه‌ی ۳:

$$\sum_{i=1}^n X_{ikr} \leq 1 \quad k = 1, 2, \dots, m$$

رابطه‌ی ۴:

$$X_{0k0} = 1 \quad r = 0, 1, \dots, R-1; k = 1, 2, \dots, m$$

رابطه‌ی ۵:

$$\sum_{i=0}^n X_{ik(r+1)} \leq \sum_{i=0}^n X_{ikr} \quad k = 1, 2, \dots, m; r = 0, 1, \dots, R$$

رابطه‌ی ۶:

$$RT_{k(r)} = \sum_{i=0}^n RT_{ik} (1 + \alpha)^{r-1} X_{ikr} \quad k = 1, 2, \dots, m; r = 0, 2, \dots, R$$

هر حادثه باید توسط یک واحد امداد خدمت رسانی شود که این امر در رابطه‌ی ۲ لحاظ شده است. در هر نوبت کاری حداکثر یک حادثه می‌تواند قرار گیرد که این شرط در رابطه‌ی ۳ گنجانده شده است. شروع کار واحدهای امداد از ایستگاه مرکزی که آن را به منزله‌ی حادثه‌ی مجازی و با اندیس صفر در نظر می‌گیریم، به طوری که زمان پردازش و شدت اثر مربوط به حادثه‌ی مجازی برابر صفر است و برای آن تنها زمان سفر واحد امداد از ایستگاه مرکزی به اولین حادثه‌ی تخصیص یافته محاسبه می‌شود. رابطه‌ی ۴ بیانگر این امر است که واحدهای امداد باید کار خود را از ایستگاه مرکزی آغاز کنند. به منظور اینکه نوبت‌های کاری به ترتیب پر شوند (برای مثال از نوبت کاری ۲ به نوبت ۴ جهش نداشته باشیم)، از رابطه‌ی ۵ استفاده شده است. محاسبه‌ی زمان امداد رسانی واقعی با توجه به اثر خستگی در رابطه‌ی ۶ صورت می‌گیرد. زمان مورد نیاز برای واحدهای امداد برای سفر از یک حادثه به حادثه‌ی دیگر در رابطه‌های ۷ و ۸ و ۹ محاسبه می‌شود. به منظور محاسبه‌ی زمان اتمام و زمان آغاز عملیات امداد رسانی به هر حادثه، از روابط ۱۰ و ۱۱ استفاده شده است. هر واحد امداد دارای توانایی خاصی است و هر حادثه باید به واحدی که توانایی امداد رسانی به آن را دارد تخصیص یابد (برای مثال حادثه‌ی آتش سوزی به واحد آتش نشانی تخصیص یابد). به منظور برآورده

$$TT_{k[r]} \geq TT_{ij}^k - BigM \cdot (2 - X_{ikr} - X_{jk(r+1)}) \quad \text{رابطه ی ۷}$$

$$\forall_{\{(i,j)|i \neq j\}}; \forall_{k,r=0,1,\dots,R-1}$$

$$TT_{k[r]} \leq TT_{ij}^k + BigM \cdot (2 - X_{ikr} - X_{jk(r+1)}) \quad \text{رابطه ی ۸}$$

$$\forall_{\{(i,j)|i \neq j\}}; \forall_{k,r=0,1,\dots,R-1}$$

$$TT_{k[r]} \leq BigM \cdot \left(\sum_{i=1}^n X_{ikr} \right) \quad \text{رابطه ی ۹}$$

$$i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m; r = 0, \dots, R$$

$$FT_{ik} \geq (ST_{k[r]} + RT_{k[r]}) \cdot X_{ikr} \quad \text{رابطه ی ۱۰}$$

$$k = 1, \dots, m; r = 1, \dots, R$$

رابطه ی ۱۱:

$$ST_{k[r]} = (ST_{k[r-1]} + RT_{k[r]} + TT_{k[r]} \cdot \left(\sum_{i=1}^n X_{ikr} \right))$$

$$i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$$

رابطه ی ۱۲:

$$\sum_{r=1}^R X_{ikr} \leq Cap_{ik} \quad k = 1, 2, \dots, m$$

رابطه ی ۱۳:

$$ST_{k[0]} = 0 \quad i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m; r = 0, \dots, R$$

رابطه ی ۱۴:

$$X_{ikr} \in \{0, 1\} \quad i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m; r = 0, \dots, R$$

رابطه ی ۱۵:

$$ST_{k[r]}, RT_{k[r]}, TT_{k[r]}, FT_{ik} \geq 0$$

$$i = 0, \dots, n; k = 1, \dots, m; r = 0, \dots, R$$

که در مدل فوق i و J اندیس حوادث، k اندیس واحدهای امداد و r اندیس نوبت های کاری است. DL_i نشان دهنده ی شدت اثر یا سطح تخریب هر حادثه است. FT_{ik} نشان دهنده ی زمان اتمام عملیات امدادرسانی حادثه i توسط واحد امداد k است. متغیر تصمیم اصلی مسئله یک متغیر صفر و یک است که با X_{ikr} نشان داده می شود. اگر $X_{ikr} = 1$ شود نشان می دهد که حادثه ی i در نوبت کاری r به واحد امداد k تخصیص یافته است. زمان امدادرسانی استاندارد حادثه ی i توسط واحد امداد k با نماد RT_{ik} نشان داده می شود. زمان پردازش واقعی عملیات امدادرسانی با توجه به ضریب خستگی α توسط نیروی امداد k به حادثه ای که در نوبت کاری r با نماد $RT_{k[r]}$ نشان داده می شود. TT_{ij}^k نشان دهنده ی زمان سفر از حادثه ی i به حادثه ی j برای واحد امداد k است و $TT_{k[r]}$ نشان دهنده ی زمان سفر مورد نیاز واحد امداد k برای سفر به نوبت کاری r است. $ST_{k[r]}$ برابر زمان آغاز عملیات امدادرسانی توسط نیروی امداد k به حادثه ای که در نوبت کاری r است. Cap_{ik} یک پارامتر صفر و یک است که برای لحاظ کردن توانایی های خاص واحدهای امداد در مدل گنجانده شده

است؛ بدین صورت که اگر $Cap_{ik} = 1$ باشد، واحد امداد k توانایی رسیدگی به حادثه ی i را دارد و اگر $Cap_{ik} = 0$ باشد، حادثه ی i نمی تواند به واحد k تخصیص یابد. گفتنی است که پارامتر $BigM$ یک عدد مثبت بزرگ را نشان می دهد.

خطی سازی

با توجه به مجموعه محدودیت های ۱۰ و ۱۱ مدل ارائه شده غیرخطی است. با در نظر گرفتن خاصیت ۱ به سادگی می توان مدل غیرخطی پیشنهادی را به یک مدل خطی تبدیل نمود.

خاصیت ۱: فرض کنید $Z = X_1 \times X_2$ حاصل ضرب یک متغیر صفر و یک (X_1) و یک متغیر پیوسته (X_2) باشد. در این صورت وقتی متغیر صفر و یک مقدار یک بگیرد، متغیر Z مقداری برابر با مقدار متغیر پیوسته خواهد گرفت و در غیر این صورت مقدار صفر می گیرد. برای خطی سازی این عبارت از سه محدودیت زیر استفاده می شود [۳۰]:

$$Z \leq X_2 \quad \text{رابطه ی ۱۶}$$

$$Z \leq M \cdot X_1 \quad \text{رابطه ی ۱۷}$$

$$Z \geq X_2 - M \cdot (1 - X_1) \quad \text{رابطه ی ۱۸}$$

با استفاده از نامعادلات فوق شکل خطی محدودیت های ۱۰ به صورت زیر است:

$$Y_{k[r]} = ST_{k[r]} + RT_{k[r]} \quad \forall_{k,r} \quad \text{رابطه ی ۱۹}$$

$$FT_{ik} \geq Y_{k[r]} \cdot X_{ikr} \quad \forall_{i,k,r} \quad \text{رابطه ی ۲۰}$$

$$L_{ikr} = Y_{k[r]} \cdot X_{ikr} \Rightarrow FT_{ik} \geq L_{ikr} \quad \text{رابطه ی ۲۱}$$

$$L_{ikr} \leq Y_{k[r]} \quad \forall_{i,k,r} \quad \text{رابطه ی ۲۲}$$

$$L_{ikr} \leq M \cdot X_{ikr} \quad \forall_{i,k,r} \quad \text{رابطه ی ۲۳}$$

$$L_{ikr} \geq Y_{k[r]} - M \cdot (1 - X_{ikr}) \quad \forall_{i,k,r} \quad \text{رابطه ی ۲۴}$$

مجموعه محدودیت های ۱۱ نیز به طور مشابه خطی سازی می شوند.

الگوریتم های پیشنهادی

در مسائل کلاس NP-Hard پیچیدگی فضای حل سبب می شود تا روش های بهینه سازی دقیق نتوانند به راحتی به جواب بهینه ی سراسری دست یابند و یا برای دستیابی به چنین جوابی زمان زیادی صرف شود. به همین دلیل رویکرد حل مسئله در این تحقیق مبتنی بر به کارگیری الگوریتم فراابتکاری برای حل مسئله است. در این میان الگوریتم های ژنتیک و بهینه سازی ازدحام ذرات، از الگوریتم های فراابتکاری مشهور و پرکاربرد هستند که با

بررسی و مرور ادبیات موضوع، کاربرد گسترده‌ی آن برای مسائل زمان بندی و مسیریابی مشخص می‌شود.

الگوریتم ژنتیک (GA)^۴

الگوریتم ژنتیک که یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی و الهام گرفته شده از قوانین طبیعی است، اولین بار توسط جان هالند و همکارانش [۳۱] در سال ۱۹۷۵ میلادی ارائه گردید و بعدها این روش به وسیله‌ی دانشمندان دیگری مانند گلدبرگ [۳۲] و دیویس [۳۳] گسترش یافت. الگوریتم ژنتیک توسط مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها که به منزله‌ی جواب اولیه هستند، کار خود را آغاز می‌کند. هرکدام از این کروموزوم‌ها دارای یک مقدار برای تابع هدف است که مقدار برازندگی نام دارد. هر چه مقدار برازندگی بهتر باشد، کروموزوم مربوط شانس بیشتری برای بقا یا تولید مثل پیدا می‌کند. این کروموزوم‌ها، جمعیت اولیه نام دارند و به طرق مختلف مانند تولید تصادفی و یا استفاده از روش ابتکاری قابل تولید هستند. مرحله‌ی بعد ایجاد یک سازوکار برای انتخاب والدین و تولید نسل بعدی است. والدین انتخاب شده توسط این سازوکار تحت عملگرهای تقاطع و جهش قرار گرفته و فرزندان جدیدی را تولید و جایگزین نسل قبلی می‌کند. این الگوریتم آن قدر تکرار می‌شود تا به معیار توقف نظیر تعداد تکرار و تعداد تکرار بدون بهبود برسد.

نحوه‌ی نمایش جواب

اولین گام برای اجرای تکنیک ژنتیک، ایجاد یک کروموزوم یا ساختار جواب است. کروموزوم استفاده شده در این تحقیق به دو قسمت تقسیم می‌شود؛ قسمت اول نشان‌دهنده‌ی m حادثه (با استفاده از اعداد صحیح ۱ تا m) و قسمت دوم شامل $m-1$ علامت جداسازی است (که با "*" نشان می‌دهیم). در اینجا، هر عدد نشان‌دهنده‌ی یک حادثه است و زمانی که علامت جداسازی مشاهده شد، به این معنی است که واحد امداد تغییر کرده است. نمونه‌ای از ساختار جواب برای هفت حادثه و سه واحد امداد در تصویر ۲ به نمایش گذاشته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حوادث ۴ و ۱ به واحد امداد اول تخصیص یافته‌اند، علامت * به این معنی است که مجموعه کارهای واحد امداد یک به پایان رسیده و اکنون وارد لیست حوادث تخصیص یافته به امدادگر شماره‌ی دو خواهیم شد، حوادث ۳ و ۷ و ۵ به واحد دوم و همچنین حوادث ۶ و ۲ به واحد سوم تخصیص یافته‌اند.

استراتژی انتخاب والدین

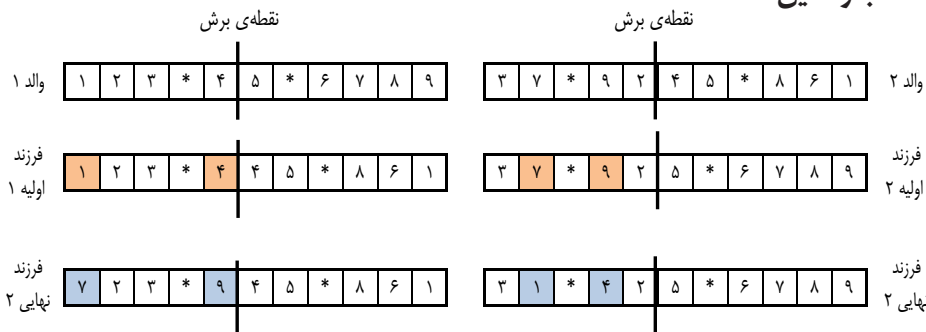
توالی حوادث روی هر واحد امداد						
واحد امداد یک: ۱-۴						
واحد امداد دو: ۵-۳-۷						
واحد امداد سه: ۲-۶						
۴	۱	*	۳	۷	۵	*

تصویر ۲: مثالی از ساختار جواب برای الگوریتم ژنتیک

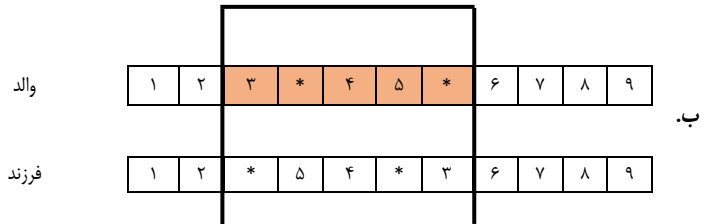
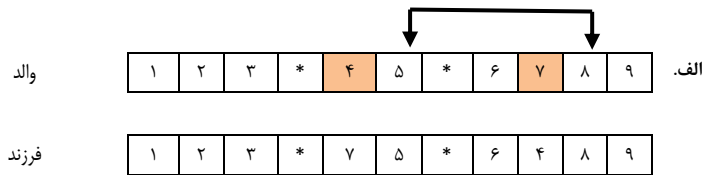
استراتژی انتخاب والدین به معنی چگونگی انتخاب کروموزوم‌ها از جمعیت فعلی به منظور تولید نسل بعدی است. در این پژوهش از چرخه‌ی رولت برای انتخاب والدین استفاده شده است؛ که در آن عنصری که عدد برازش (تناسب) بیشتری داشته باشد، با احتمال بیشتری انتخاب می‌شود. در واقع به نسبت عدد برازش برای هر عنصر یک احتمال تجمعی نسبت می‌دهیم و با این احتمال است که شانس انتخاب هر عنصر تعیین می‌شود.

طراحی عملگر تقاطع

این عملگر یک عملگر ترکیبی است که شامل سه مرحله می‌شود. در مرحله‌ی نخست یک جفت از کروموزوم‌های برگزیده را به طور تصادفی انتخاب می‌کند؛ در مرحله‌ی دوم محلی را برای ادغام به طور تصادفی در طول رشته‌ی کروموزوم انتخاب می‌کند و سرانجام در مرحله‌ی سوم، مقدار دو رشته را با توجه به محل ادغام که مشخص کرده‌ایم جابه‌جا می‌کند. در عملگر تقاطع استفاده شده در این تحقیق همان‌طور که در تصویر ۳ مشاهده می‌شود، ابتدا دو والد انتخاب شده و یک نقطه برش تصادفی نیز انتخاب می‌شود. سپس تمامی عناصر قبل از نقطه‌ی برش والد اول، در قسمت اول فرزند اولیه‌ی شماره‌ی یک قرار داده می‌شود و عناصر بعد از نقطه‌ی برش نیز در قسمت دوم فرزند اولیه‌ی شماره دو قرار می‌گیرد. همچنین عناصر قبل از نقطه‌ی برش والد دوم نیز در قسمت اول فرزند اولیه‌ی شماره‌ی دو و عناصر بعد از نقطه‌ی برش آن در قسمت دوم فرزند اولیه‌ی شماره‌ی یک قرار می‌گیرند. از آنجایی که ممکن است بعد از عمل تقاطع در ساختار جواب اعداد تکراری ظاهر شود، اعداد تکراری جایگزین می‌شوند تا فرزندان نهایی یک و دو به وجود آیند.



تصویر ۳: نمایش عملگر تقاطع



تصویر ۴: نمایش عملگر جهش. الف. جابه جایی، ب. معکوس سازی

رابطه ی ۲۵: $Vel_i(k+1) = w \times Vel_i(k) + c_1 \times r_1$

$(pbest_i - X_i(k)) + c_2 \times r_2 \times (gbest - X_i(k))$

رابطه ی ۲۶: $X_i(k+1) = X_i(k) + Vel_i(k+1)$

که در معادلات فوق $Vel_i(k)$ معرف سرعت ذره ی i -ام در تکرار k -ام است. $X_i(k)$ موقعیت ذره ی i در تکرار k را نشان می دهد. $pbest_i$ نشان دهنده بهترین موقعیت ذره ی i و $gbest$ معرف بهترین موقعیتی که تاکنون به دست آمده است. r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین صفر و یک بوده، c_1 و c_2 به ترتیب جزء ادراکی و اجتماعی هستند و w ضریب اینرسی است.

نمایش جواب

با توجه به این که تکنیک PSO یک الگوریتم توسعه یافته در ناحیه ی حل پیوسته است، برای ایجاد جواب در فضای گسسته از روش زیر استفاده شده است. برای تعداد n حادثه و m واحد امداد، یک بردار شامل اعداد تصادفی بین صفر و یک به ابعاد $(n+m-1)$ تولید می کنیم، هر عدد تولید شده دارای یک موقعیت در بردار است. سپس اعداد به ترتیب صعودی مرتب می شوند. شماره موقعیت اعداد در بردار مرتب شده که یک بردار از اعداد صحیح مثبت با ابعاد $(n+m-1)$ است، به عنوان جواب اولیه ی الگوریتم مورد استفاده قرار می گیرد. مراحل انجام این روش در تصویر ۵ مشاهده می شود.

بهبود عملکرد PSO

در این پژوهش برای بهبود عملکرد PSO و به روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات، از روش ارائه شده توسط کلرک [۳۷] استفاده شده است. طبق این روش ابتدا ضریب \mathcal{L} با استفاده از روابط ۲۷ و ۲۸ محاسبه شده و سپس با جای گذاری آن در رابطه ی ۲۵ مورد نظر برای به روزرسانی سرعت ذرات به صورت معادله ی ۲۹ به دست می آید.

طراحی عملگر جهش

این عملگر یک ژن از یک کروموزوم را به طور تصادفی انتخاب نموده و سپس محتوای آن ژن را تغییر می دهد. اگر ژن از جنس اعداد دودویی باشد، آن را به وارونش تبدیل می کند و چنانچه متعلق به یک مجموعه باشد مقدار یا عنصر دیگری از آن مجموعه را به جای آن ژن قرار می دهد. در این پژوهش دو نوع عملگر مختلف برای انجام جهش در نظر گرفته شده است که در تصویر ۴ مشاهده می شود.

الف. جابه جایی^۵ (تعویض): دو عنصر از یک کروموزوم انتخاب شده و جای آن ها با یکدیگر عوض می شود.
ب. معکوس سازی^۶: دو نقطه ی تصادفی در یک کروموزوم انتخاب می شود، سپس موقعیت عناصر قرار گرفته بین این دو نقطه معکوس می شود.

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات بهبود یافته (EPSO)

الگوریتم PSO ابتدا توسط ابرهارت و کندی در سال ۱۹۹۵ معرفی شد [۳۴]. PSO یک الگوریتم جست و جو محور مبتنی بر جمعیت است که بر شبیه سازی رفتار اجتماعی پرندگان و زنبورها و ماهی ها منطبق است. شبیه سازی جست و جوی پرندگان برای غذا نشان می دهد اعضای گروه برای پیدا کردن غذا، سرعت خود را با دو فاکتور بهترین تجربه خودشان و بهترین تجربه اعضای دیگر تعیین می کنند [۳۵]. هر ذره در گروه با استفاده از موقعیت و سرعت تعریف می شود به گونه ای که موقعیت ذره نشان دهنده ی جواب مسئله ی بهینه سازی و سرعت نشان دهنده ی فاصله و جهت جست و جو است که حرکت ذرات را راهنمایی می کند. برای یافتن جواب بهینه، هر ذره حرکت خود را بر اساس دانش خود و همسایگانش تنظیم می کند. شی و ابرهارت این دو قسمت را به ترتیب جزء ادراکی و جزء اجتماعی نامیدند [۳۶]. همچنین هر ذره سرعتش را بر اساس سرعت جاری، بهترین مکان مشاهده شده برای ذره ($pbest$) و بهترین مکان جستجو شده از سوی گروه ($gbest$) به روزرسانی می کند. در هر تکرار سرعت و مکان ذرات با استفاده از روابط زیر به روز می شوند:

۰,۳	۰,۷۵	۰,۴۲	۰,۱	۰,۶۸	۰,۰۵	۰,۵۵
-----	------	------	-----	------	------	------

اعداد تصادفی از بازه (۰,۱)

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
---	---	---	---	---	---	---

موقعیت اعداد

۰,۰۵	۰,۱	۰,۳	۰,۴۲	۰,۵۵	۰,۶۸	۰,۷۵
------	-----	-----	------	------	------	------

اعداد تصادفی مرتب شده

۶	۴	۱	۳	۷	۵	۲
---	---	---	---	---	---	---

شماره‌ی موقعیت اعداد مرتب شده

تصویر ۵: مثالی برای ساختار جواب الگوریتم PSO

تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت، با انجام آزمایش‌های محاسباتی، کارایی الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل مدل مورد بررسی قرار داده می‌شوند. همچنین برای ارزیابی عملکرد آن‌ها، در ابعاد کوچک نتایج حل مسئله با روش‌های فراابتکاری با نتایج حل مسئله با نرم‌افزار لینگو ۱۶ (روش دقیق) مورد مقایسه قرار گرفته است. گفتنی است الگوریتم‌های پیشنهادی در نرم‌افزار متلب (Matlab) پیاده‌سازی شده‌اند. تصویر ۶ نشان‌دهنده‌ی مراحل حل مسئله با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی است.

تولید داده

برای ارزیابی مدل در این پژوهش ۲۰ نمونه مسئله شامل ۱۰ مسئله در ابعاد کوچک و ۱۰ مسئله در ابعاد بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد حوادث (n) بین ۶ تا ۱۲ عدد برای ابعاد کوچک و بین ۲۰ تا ۳۵ حادثه برای ابعاد بزرگ است. همچنین تعداد واحدهای امداد (m) بین ۲ تا ۵ واحد برای ابعاد کوچک و بین ۱۰ تا ۱۵ واحد امداد برای ابعاد بزرگ است. سطح تخریب حوادث اعداد تصادفی بین یک و پنج است و مقدار زمان امدادسانی (RT_{ik}) با استفاده از توزیع نرمال با میانگین ۲۰ و واریانس ۵ تولید شده است. زمان سفر بین حوادث (TT_{ij}) نیز دارای توزیع یکنواخت در بازه‌ی ۱۰ و ۱۵ است. قابلیت واحدهای امداد برای رسیدگی به حوادث (CAP_{ik}) نیز به صورت یک ماتریس صفر و یک تصادفی تولید شده است. همچنین نرخ اثر خستگی نیز برابر ۰,۲۵ در نظر گرفته شده است.

تنظیم پارامترها

عملکرد روش‌های فراابتکاری به شدت وابسته به مقادیر پارامترهای آن‌ها است. از این‌رو تخصیص مقدار مناسب به پارامترهای الگوریتم می‌تواند تأثیر بسزایی در کیفیت جواب‌های به دست آمده داشته باشد. در این تحقیق برای تنظیم پارامترها از روش تاگوچی استفاده شده است. برای الگوریتم ژنتیک پارامترهای حداکثر تعداد تکرار ($MaxIt$)، تعداد جمعیت ($Npop$)، نرخ تقاطع (P_c) و نرخ جهش (P_m) و برای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پارامترهای حداکثر تعداد تکرار ($MaxIt$)، تعداد جمعیت ($Swarm - Size$)، ضریب ادراکی (c_1) و ضریب اجتماعی

$$c_1 + c_2 > 4 \quad \text{رابطه‌ی ۲۷}$$

$$\chi = \frac{2}{C - 2 + \sqrt{C^2 - 4C}}, (C = c_1 + c_2) \quad \text{رابطه‌ی ۲۸}$$

$$Vel_i(k+1) = \chi \times [Vel_i(k) + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_i - X_i(k)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest - X_i(k))] \quad \text{رابطه‌ی ۲۹}$$

موقعیت ذرات نیز با استفاده از رابطه‌ی ۲۶ به روز می‌شود.

جستجوی همسایگی

برای بهبود عملکرد الگوریتم PSO ، در پایان تکرارها با استفاده از عملگرهایی جستجوی محلی بر روی جواب انجام شده تا منجر به بهبود پاسخ نهایی گردد. برای این جستجو از عملگرهای جابه‌جایی و معکوس‌سازی استفاده شده است.

تعیین مقادیر ورودی‌های مدل
(پارامترها)

تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های
پیشنهادی برای بهبود عملکرد آن‌ها

حل مدل توسط الگوریتم‌ها در
نمونه‌ی مسئله‌های طراحی شده

تجزیه و تحلیل نتایج و ارزیابی
عملکرد الگوریتم‌ها

تصویر ۶: روند حل مدل با الگوریتم‌های پیشنهادی

جدول ۴: مقادیر بهینه‌ی پارامترها

الگوریتم ژنتیک		
مقدار بهینه	سطح بهینه	نام پارامتر
(۵۰،۴۰۰)	۳	(تعداد تکرار، جمعیت)
۰،۷	۱	نرخ تقاطع
۰،۰۳	۳	نرخ جهش
الگوریتم <i>EPSO</i>		
(۷۰،۳۰۰)	۱	(تعداد تکرار، جمعیت)
۲،۱	۱	ضریب ادراکی
۲،۱	۲	ضریب اجتماعی

نتایج حل مدل

در این قسمت نتایج حاصل شده از حل مسئله در ابعاد بزرگ و کوچک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری در ابعاد کوچک، جواب‌های به دست آمده توسط *GA* و *EPSO* با نتایج حاصل از نرم‌افزار لینگو (که یک رویکرد حل دقیق است و مسئله را با روش شاخه و کران حل می‌کند) مقایسه شده‌اند.

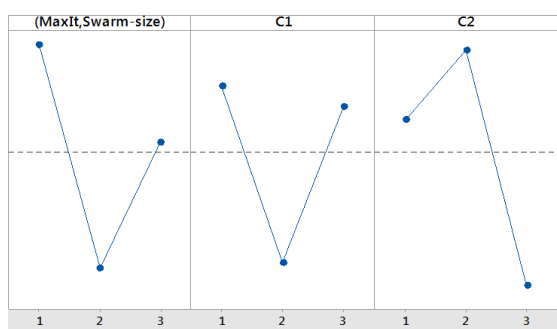
از آنجایی که در ابعاد کوچک جواب بهینه‌ی مسئله با استفاده از نرم‌افزار لینگو به دست می‌آید، برای بررسی عملکرد الگوریتم‌ها از دو معیار زمان پردازش و درصد خطای نسبی (*PRE*) استفاده شده است. که مقدار درصد خطای نسبی با استفاده از رابطه‌ی ۳۱ به دست می‌آید:

$$PRE = \frac{ALG_{sol} - OPT_{sol}}{OPT_{sol}} \times 100 \quad \text{رابطه‌ی ۳۱}$$

که در رابطه‌ی فوق ALG_{sol} جواب به دست آمده از الگوریتم و OPT_{sol} جواب بهینه‌ی مسئله است.

نتایج حل مسئله در ابعاد کوچک در جدول ۵ نشان داده شده است که در آن m نشان دهنده‌ی تعداد حوادث، m نشان دهنده‌ی تعداد واحدهای امداد و میانگین جواب‌ها نشان دهنده‌ی متوسط پاسخ‌های به دست آمده در ۱۰ تکرار است.

همان‌طور که بیان شد، عملکرد الگوریتم‌ها را می‌توان با دو معیار زمان حل و کیفیت جواب مقایسه کرد و سپس با توجه به معیار مهم‌تر از نظر تصمیم‌گیرندگان، الگوریتم مناسب‌تر را انتخاب



تصویر ۸: نمودار سیگنال به نویز الگوریتم *EPSO*

جدول ۲: پارامترهای الگوریتم ژنتیک و مقادیر سطوح مختلف آن‌ها

سطح سه	سطح دو	سطح یک	
(۵۰،۴۰۰)	(۶۰،۳۵۰)	(۷۰،۳۰۰)	(تعداد تکرار، جمعیت)
۰،۸	۰،۷۵	۰،۷	نرخ تقاطع
۰،۰۳	۰،۰۵	۰،۰۱	نرخ جهش

جدول ۳: پارامترهای الگوریتم *EPSO* و مقادیر سطوح مختلف آن‌ها

سطح سه	سطح دو	سطح یک	
(۵۰،۴۰۰)	(۶۰،۳۵۰)	(۷۰،۳۰۰)	(تعداد تکرار، جمعیت)
۲،۲	۲،۳	۲،۱	ضریب ادراکی
۲،۳	۲،۱	۲،۲	ضریب اجتماعی

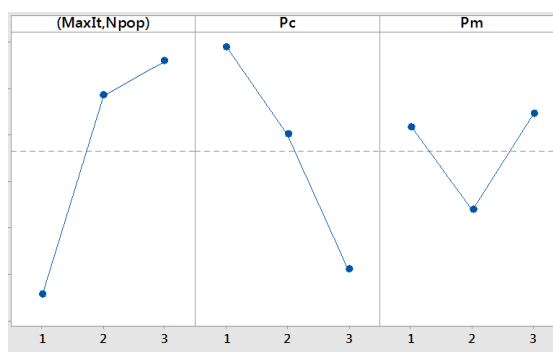
(C_2) نیاز به تنظیم دارند. برای هر پارامتر سه سطح در نظر گرفته شده است که جدول ۲ و ۳ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی سطوح مختلف برای پارامترهای *GA* و *EPSO* هستند.

در این پژوهش برای به دست آوردن سطح بهینه‌ی پارامترهای هر الگوریتم، از نمودار نسبت سیگنال به نویز (S/N) استفاده شده است. نسبت S/N نشان‌دهنده‌ی میزان انحراف از متغیر پاسخ است و هدف بیشینه کردن نسبت سیگنال به نویز است [۳۸]. در روش طراحی آزمایشات تاگوچی، توابع هدف به سه دسته تقسیم می‌شوند: هرچه کمتر بهتر^۱، هرچه بیشتر بهتر^۲ و مقدار اسمی بهتر^۳. برای حالت هرچه کمتر بهتر (که تابع هدف مسئله‌ی تحقیق از این نوع است) نسبت S/N با استفاده از رابطه‌ی ۳۰ محاسبه می‌شود [۴۰، ۳۹].

$$S/N = -10 \cdot \log_{10}(Z)^2 \quad \text{رابطه‌ی ۳۰}$$

که در رابطه‌ی فوق Z مقدار تابع هدف است. نمودارهای سیگنال به نویز حاصل از انجام آزمایشات روش تاگوچی به برای الگوریتم‌های ژنتیک و *EPSO* به ترتیب در تصویر ۷ و تصویر ۸ به نمایش گذاشته شده است.

هر چه یک پارامتر در سطح بالاتری قرار گیرد، مقدار آن مناسب‌تر است. سطحی که در نمودار مقدار بهینه‌ی پارامترها در جدول ۴ آمده است.



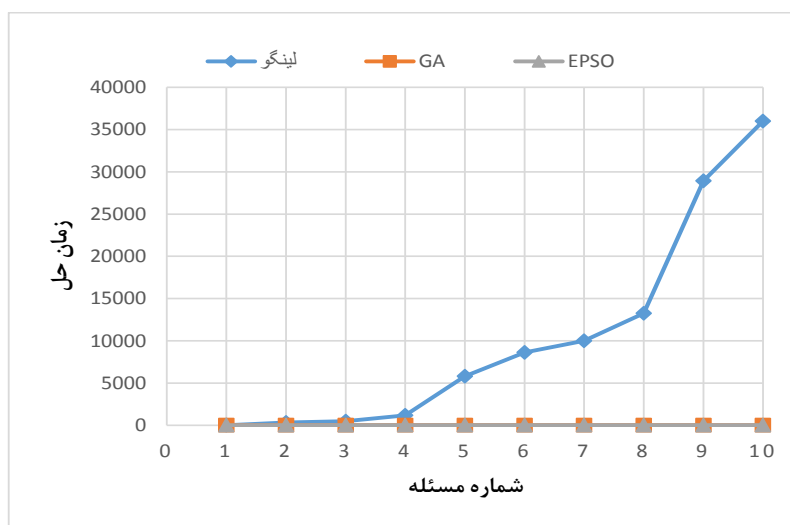
تصویر ۷: نمودار سیگنال به نویز الگوریتم ژنتیک

جدول ۵: نتایج حل مسئله در ابعاد کوچک

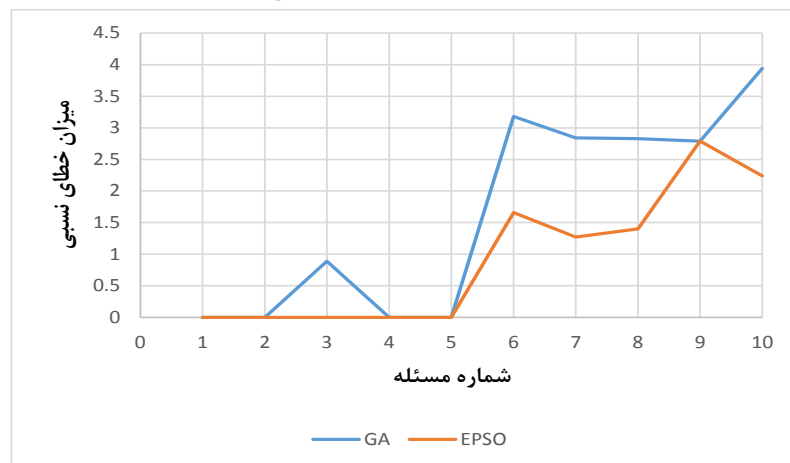
EPSO				GA				لینگو		m	n	مسئله
PRE	زمان حل (s)	میانگین جواب‌ها	بهترین جواب	PRE	زمان حل (s)	میانگین جواب‌ها	بهترین جواب	زمان حل (s)	جواب بهینه			
...	۱۶.۷	۱۰۷۱.۶	۱۰۵۸.۲۵	...	۸	۱۰۷۴.۵۵	۱۰۵۸.۲۵	۸	۱۰۵۸.۲۵	۲	۶	۱
...	۱۸.۲	۱۳۶۴.۲۲	۱۳۳۵.۵	...	۸.۹	۱۳۶۸.۱۱	۱۳۳۵.۵	۳۲۰	۱۳۳۵.۵	۳	۸	۲
...	۲۰	۱۸۰۰	۱۷۷۴.۲۵	۰.۸۹	۹.۲۲	۱۸۰۳.۱۵	۱۷۹۰	۴۹۸	۱۷۷۴.۲۵	۳	۹	۳
...	۱۹.۸	۲۰۸۸.۳۲	۲۰۶۳.۳۱	...	۹.۳۸	۲۰۹۵.۸	۲۰۶۳.۳۱	۱۱۷۵	۲۰۶۳.۳۱	۳	۱۰	۴
...	۲۰.۳۱	۱۷۶۴.۹۵	۱۷۲۰.۴۴	...	۹.۵	۱۷۸۳.۹۲	۱۷۲۰.۴۴	۵۷۹۵	۱۷۲۰.۴۴	۴	۱۰	۵
۱.۶۶	۲۰.۸۶	۲۴۹۱.۲۲	۲۴۵۱.۳۸	۳.۱۸	۹.۷	۲۵۱۰.۶۴	۲۴۸۸.۱۸	۸۶۳۷	۲۴۱۱.۴۳	۳	۱۱	۶
۱.۲۷	۲۱.۳	۱۹۹۵.۲۹	۱۹۲۸.۷۵	۲.۸۴	۱۰.۱	۲۰۰۸.۳۳	۱۹۵۸.۷۴	۱۰۰۰	۱۹۰۴.۶۲	۴	۱۱	۷
۱.۴۰	۲۱.۶۱	۱۸۷۵.۷۲	۱۸۲۰.۶	۲.۸۳	۱۰.۴۲	۱۹۰۳.۶۳	۱۸۴۶.۲۷	۱۳۲۶۱	۱۷۹۵.۳۸	۵	۱۱	۸
۲.۷۹	۲۲	۲۱۲۸.۴۴	۲۱۰۷.۹۲	۲.۷۹	۱۰.۵۵	۲۱۳۶.۵۱	۲۱۰۷.۹۲	۲۸۹۶۳	۲۰۵۰.۷۵	۴	۱۲	۹
۲.۲۴	۲۲.۳۵	۱۷۸۷.۶۶	۱۷۴۳.۳۱	۳.۹۴	۱۰.۶۷	۱۸۳۴.۸۶	۱۷۷۲.۳۱	۳۶۰۰۰	۱۷۰۵.۱۲	۵	۱۲	۱۰

از الگوریتم‌های پیشنهادی را با روش حل دقیق (لینگو) و تصویر ۱۰ میزان خطای نسبی (PRE) الگوریتم‌های پیشنهادی را مقایسه می‌کنند.

نمود. با توجه به جدول ۵، الگوریتم ژنتیک از نظر زمان حل نسبت به الگوریتم EPSO عملکرد مناسب‌تری داشته است اما الگوریتم EPSO با میانگین درصد خطای نسبی ۰.۹۴، پاسخ‌های با کیفیت‌تری تولید کرده است. تصویر ۹ زمان حل مسائل با استفاده



تصویر ۹: نمودار مقایسه‌ی زمان حل با روش‌های مختلف



تصویر ۱۰: نمودار مقایسه‌ی خطای نسبی الگوریتم‌ها در ابعاد کوچک

جدول ۶: نتایج حل مسئله در ابعاد بزرگ

EPSO				GA				m	n	مسئله
RPD	زمان حل	میانگین جواب‌ها	بهترین جواب	RPD	زمان حل	میانگین جواب‌ها	بهترین جواب			
...	۲۹,۳۶	۲۸۹۵,۳۳	۲۸۰۰,۷۵	...	۱۳,۶۳	۲۹۰۷,۲۸	۲۸۰۰,۷۵	۱۰	۲۰	۱
...	۳۰,۰۰	۳۲۴۳,۶۱	۳۱۹۸,۲	۱,۰۴	۱۴,۲	۳۲۹۸,۵۲	۳۲۳۱,۵۶	۱۰	۲۲	۲
...	۳۲,۸۶	۳۹۲۵,۴۳	۳۸۰۴,۲۹	...	۱۵,۷۵	۳۹۴۷,۶۱	۳۸۰۴,۲۹	۱۱	۲۵	۳
...	۳۳,۲۵	۳۵۶۸,۹۱	۳۴۸۲,۳۸	۰,۹۷	۱۵,۸۸	۳۶۷۱,۸۳	۳۵۱۶	۱۲	۲۵	۴
...	۳۶,۴۸	۴۸۰۳,۵۵	۴۷۱۰,۸۲	۰,۶۰	۱۷	۴۸۳۵,۱۱	۴۷۳۹,۲	۱۱	۲۸	۵
...	۳۷,۱۳	۴۳۵۱,۸۶	۴۲۹۱,۳۷	۰,۶۲	۱۷,۳۸	۴۴۲۱,۵۵	۴۳۱۷,۹۳	۱۲	۲۸	۶
...	۳۹,۸۴	۵۱۰۴,۶۶	۴۹۲۸,۷۵	۱,۱۴	۱۸,۲۶	۵۱۰۸,۴۷	۴۹۸۵,۱۳	۱۲	۳۰	۷
...	۳۹,۹۶	۴۶۵۲,۹۵	۴۴۸۵,۴۹	۰,۹۲	۱۸,۵	۴۶۸۵,۷۱	۴۵۲۷	۱۳	۳۰	۸
...	۴۴,۶۹	۵۴۶۸,۷۲	۵۳۹۴,۲۲	۱,۵۵	۲۱,۷۵	۵۵۸۸,۵۳	۵۴۷۷,۶۲	۱۴	۳۵	۹
...	۴۵,۱۷	۵۱۱۲,۳۶	۴۹۴۶,۷۵	۱,۴۳	۲۱,۴۸	۵۱۷۳,۲۲	۵۰۱۷,۴۸	۱۵	۳۵	۱۰

$$RPD = \frac{ALG_{sol} - Best_{sol}}{Best_{sol}} \times 100$$

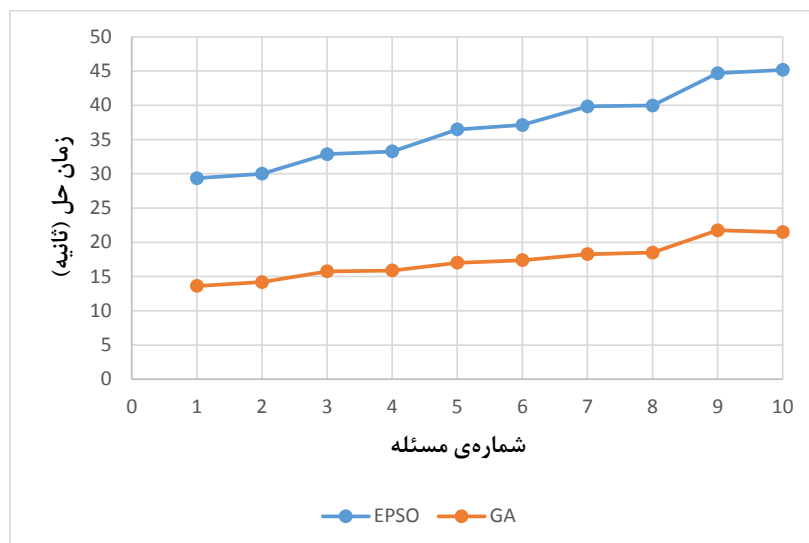
رابطه‌ی ۳:

که در معادله‌ی فوق ALG_{sol} نشان‌دهنده‌ی جواب به دست آمده از الگوریتم و $Best_{sol}$ معرف بهترین جواب به دست آمده است.

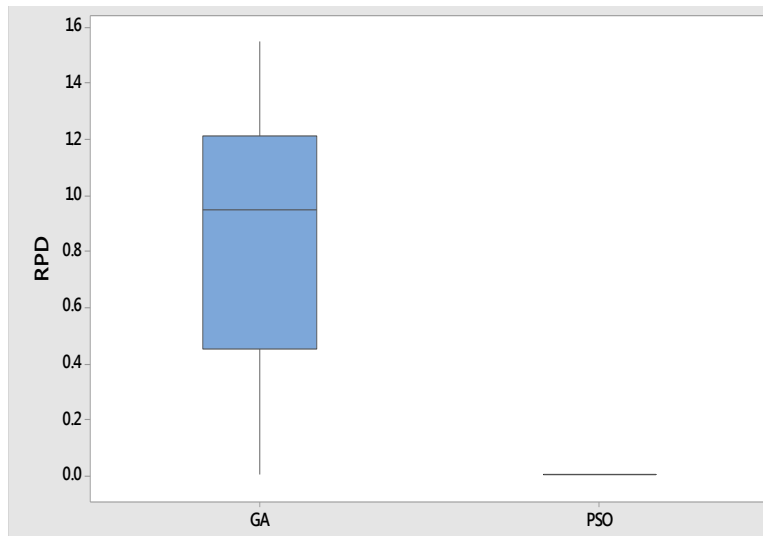
همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، در تمامی نمونه مسئله‌ها الگوریتم EPSO جواب‌های با کیفیت‌تری ارائه داده و الگوریتم ژنتیک از نظر معیار زمان حل عملکرد بهتری داشته است. تصویر ۱۱ زمان حل مسئله در ابعاد بزرگ توسط الگوریتم‌های پیشنهادی را مورد مقایسه قرار می‌دهد که نشان می‌دهد با افزایش ابعاد مسئله الگوریتم ژنتیک مدل را در زمان کمتری نسبت به الگوریتم EPSO حل می‌کند.

تصویر ۹ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد حوادث و واحدهای امداد، زمان روش حل دقیق (نرم‌افزار لینگو) به صورت نمایی افزایش می‌یابد، اما الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی مسئله را در زمانی به مراتب کمتر از روش دقیق حل کرده‌اند. با توجه به جدول ۴ و تصویر ۹، الگوریتم ژنتیک از نظر معیار زمان حل عملکرد بهتری نسبت به EPSO داشته است.

با توجه به تصویر ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش ابعاد مسئله‌ی الگوریتم EPSO از نظر کیفیت راه‌حل‌های ارائه شده عملکرد بهتری دارد و پاسخ‌های مناسب‌تری را ایجاد می‌کند. اما از آنجایی که در مقیاس بزرگ، به دست آوردن جواب بهینه‌ی سراسری مسئله امکان‌پذیر نیست، برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی، علاوه بر زمان پردازش از معیار درصد انحراف نسبی (RPD)^{۱۳} استفاده شده است که با استفاده از رابطه‌ی ۳۲ محاسبه می‌شود:



تصویر ۱۱: نمودار مقایسه‌ی زمان حل مسئله در ابعاد بزرگ



تصویر ۱۲: نمودار جعبه‌ای درصد انحراف نسبی

در نظر گرفت. همچنین می‌توان پنجره‌ی زمانی برای حوادث را وارد مدل کرده و به بررسی اثرات آن در نتایج پرداخت.

پی‌نوشت

1. Multi travelling salesman problem
2. Recovery
3. Mathematical modeling
4. Genetic algorithm
5. Swap
6. Inversion
7. Enhanced Particle Swarm Optimization
8. Signal-to-noise
9. Smaller-is-better
10. Larger-is-better
11. Nominal-is-better
12. Percentage relative error
13. Relative percentage deviation

منابع

1. Comfort, L. K., Ko, K., & Zagorecki. (2004). Coordination in rapidly evolving disaster response systems the role of information. *American Behavioral Scientist*, 48, 295–313
2. Bektas, T. (2006). The multiple traveling salesman problem: An overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 34, 209–219
3. Ajami, S., & Fattahi, M. (2009). The role of earthquake information management systems (EIMs) in reducing destruction: A comparative study of Japan, Turkey and Iran. *Disaster Prevention and Management*, 18, 150–161.
4. Altay, N., & Green, W. G. III, (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175, 475–493.
5. IFRC (2012). Disaster management – IFRC

تصویر ۱۲ نیز نمودار جعبه‌ای معیار درصد انحراف نسبی (کیفیت جواب) مربوط به دو الگوریتم را نشان می‌دهد که بر اساس این تصویر در تمامی نمونه‌های ابعاد بزرگ مسئله، الگوریتم *EPSO* عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد.

نتیجه‌گیری

حوادث و بلایای طبیعی سالانه خسارات مالی و جانی فراوانی را به ملت‌ها وارد می‌کنند؛ از این رو داشتن یک سیستم تصمیم‌گیری مناسب برای مقابله‌ی به موقع با بحران و مشکلات به وجود آمده پس از حوادث ضروری است. با توجه به وجود محدودیت‌هایی نظیر محدودیت منابع و زمان، تدوین یک برنامه‌ی مناسب برای رویارویی با بلایای طبیعی کار دشواری است. در سال‌های اخیر محققان مسئله‌ی مدیریت بحران را به مسئله‌ی زمان‌بندی ماشین‌های موزی نامرتبط با زمان راه‌اندازی وابسته به توالی و مسئله‌ی مسیریابی تشبیه کرده و آن را به صورت مدل ریاضی فرموله کرده‌اند. در پژوهش‌های قبلی زمان امداد رسانی به حوادث به سبک زمان‌بندی قطعی سنتی، ثابت در نظر گرفته شده است. در این تحقیق با در نظر گرفتن پدیده‌ی اثر خستگی و این موضوع که واحدهای امداد در طی امداد رسانی به حوادث مختلف خسته شده و بازدهی آن‌ها کاهش خواهد یافت و برای امداد رسانی به باقی حوادث به زمان بیشتری احتیاج دارند، زمان پردازش کارها به موقعیت (نوبت) آن‌ها در زمان‌بندی واحد امدادی که به آن تخصیص یافته‌اند وابسته است. با توجه به پیچیدگی مسئله، برای حل آن، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبود یافته مورد استفاده قرار گرفت و بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد الگوریتم ژنتیک از نظر معیار زمان حل عملکرد بهتری دارد و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جواب‌های با کیفیت‌تری ارائه می‌دهد.

برای پژوهش‌های آتی می‌توان عدم قطعیت را در مدل لحاظ کرد و زمان پردازش و شدت اثر حوادث و زمان سفر را به صورت فازی

signment for emergency management applications, Proceedings of the 5th international conference on business process management (BPM 2007). Berlin, New York: Springer.

19. Tamura, H., Yamamoto, K., Tomiyama, S., & Hatono, I. (2000). Modeling and analysis of decision making problem for mitigating natural disaster risks. *European Journal of Operational Research*, 122, 461–468.
20. Fiedrich, F., Gehbauer, F., & Rickers, U. (2000). Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. *Safety Science*, 35, 41–57.
21. Leifler, O. (2008). Combining technical and human-centered strategies for decision support in command and control: The ComPlan approach, Proceedings of the 5th conference on information systems for crisis response and management (ISCRAM 2008). Washington, DC.
22. Van de Walle, B., & Turoff, M. (2008). Decision support for emergency situations, Handbook on decision support systems 2 international handbooks on information systems. Berlin, Heidelberg: Springer.
23. Faraj, S., & Xiao, Y. (2006). Coordination in fast-response organizations. *Management Science*, 52, 1155–1169.
24. Falasca, M., Zobel, C. W., & Fetter, G. M. (2009). An optimization model for humanitarian relief volunteer management, Proceedings of the 6th conference on information systems for crisis response and management (ISCRAM 2009). Gothenburg, Sweden.
25. Rolland, E., Patterson, R., Ward, K., & Dodin, B. (2010). Decision support for disaster management. *Operations Management Research*, 3, 68–79.
26. Wex, F., Schryen, G., & Neumann, D. (2011). Intelligent decision support for centralized coordination during emergency response. Proceedings of the 8th international conference on information systems for crisis response and management (ISCRAM 2011).
27. Wex, F., Schryen, G., & Neumann, D. (2012). Operational emergency response under informational uncertainty: A fuzzy optimization model for scheduling and allocating rescue units. Proceedings of the 9th international conference on information systems for crisis response and management (ISCRAM 2012).
28. Wex, F., Schryen, G., & Neumann, D. (2013). Decision modeling for assignments of collaborative rescue units during emergency response. In Proceedings of the 46th Hawaii international conference on system science. Wailea, HI: IEEE Computer Society Press.
29. Wex, F., Schryen, G., Feuerriegel, S., & Neumann, D. (2014). Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units. *European Journal Of Operational Research*, 235, 697–708
30. Glover F. & Woolsey, L. (1974). Converting the 0–1 polynomial programming problem to a 0–1 linear program. *Operation Research*, 22, 180–182.
31. Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and arti-
6. Gasparini, P., Manfredi, G., & Zschau, J. (Eds.) (2007). Earthquake early warning systems. Berlin, Heidelberg: Springer
7. Nisha de Silva, F. (2001). Providing spatial decision support for evacuation planning: A challenge in integrating technologies. *Disaster Prevention and Management*, 10, 11–20.
8. Pollak, E., Falash, M., Ingraham, L., & Gottesman, V. (2004). Operational analysis framework for emergency operations center preparedness training. In Proceedings of the 36th conference on winter simulation. Piscataway, NJ: IEEE.
9. Svensson, A., Holst, J., Lindquist, R., & Lindgren, G. (1996). Optimal prediction of catastrophes in autoregressive moving-average processes. *Journal of Time Series Analysis*, 17, 511–531.
10. UN/ISDR (2005). Hyogo framework for action: building the resilience of nations and communities to disasters.
11. GAO. (2006). Disaster relief: Government wide framework needed to collect and consolidate information to report on billions in federal funding for the 2005 gulf coast hurricanes: GAO-06-834.
12. Saleem, K., Luis, S., Deng, Y., Chen, S.-C., Hristidis, V., & Li, T. (2008). Towards a business continuity information network for rapid disaster recovery, Proceedings of the 2008 international conference on digital Government Research ACM international conference proceeding series.
13. Sherali, H. D., Carter, T. B., & Hobeika, A. G. (1991). A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25, 439–452.
14. Chen, R., Sharman, R., Rao, H. R., & Upadhyaya, S. J. (2008). Coordination in emergency response management. *Communications of the ACM*, 51, 66–73.
15. Airy, G., Mullen, T., & Yen, J. (2009). Market based adaptive resource allocation for distributed rescue teams. In J. Landgren & S. Jul (Eds.), Proceedings of the 6th conference on information systems for crisis response and management (ISCRAM 2009). Gothenburg, Sweden
16. Comes, T., Conrado, C., Hiete, M., Kamermans, M., Pavlin, G., & Wijngaards, N. (2010). An intelligent decision support system for decision making under uncertainty in distributed reasoning frameworks, Proceedings of the 7th international conference on information systems for crisis response and management (ISCRAM 2010). Seattle, USA.
17. Lambert, J. H., & Patterson, C. E. (2002). Prioritization of schedule dependencies in hurricane recovery of transportation agency. *Journal of Infrastructure Systems*, 8, 103–111.
18. Reijers, H. A., Jansen-Vullers, M. H., Zur Muehlen, M., & Appl, W. (2007). Workflow management systems + swarm intelligence = dynamic task as-

- ficial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence: U Michigan Press.
32. Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning, Machine learning, Addison-Wesley, Boston.
 33. Davis, L. (1991). A genetic algorithms tutorial, Handbook of genetic algorithms. New York, Informa UK Limited
 34. Eberhart, R. & Kennedy, J. (1995). A New Optimizer Using Particles Swarm Theory. Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science (Nagoya, Japan), IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 39-43.
 35. Kennedy, J. & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. IEEE Conference on Neural networks, (Perth, Australia), Piscataway, NJ, IV, 1942-1948.
 36. Shi, Y. & Eberhart, R. C. (1998). A modified particle swarm optimizer. In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 69-73.
 37. Clerc, M. & Kennedy, J. (2002). The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6 (1), 58-73.
 38. Naderi, B., Ghomi S.M.T.F. & Zandieh, M. (2011). Scheduling open shops with parallel machines to minimize total completion time. Journal Of Computational and Applied Mathematics, 235, 1275-1287.
 39. Phadke, M.S. (1995). Quality engineering using robust design, Prentice Hall PTR.
 40. Naderi, B., Zandieh, M., Balagh, A.K.G. & Roshanaei, V. (2009). An improved simulated annealing for hybrid flowshops with sequence-dependent setup and transportation times to minimize total completion time and total tardiness, Expert Systems with Applications, 36, 9625-9633.

