

ارایه روش انتخاب اقدامات اصلاحی در فرآیند مدیریت ریسک ایمنی با استفاده از مدل سازی ریاضی

مرتضی چراغی^{۱*} - بابک امیدوار^۲ - علی اکبر اسلامی بلده^۲ - حمیدرضا جعفری^۴ - علی محمد یونسی^۵
 cheraqi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۲

مکیده

مقدمه: ارزیابی ریسک از اصلی ترین ابزارها در مدیریت ایمنی شناخته می شود که با ایجاد بستر اطلاعاتی مناسب، مدیران ایمنی را در انتخاب بهتر اقدامات اصلاحی یاری می نماید. هدف از این مطالعه انتخاب اقدامات اصلاحی بهینه از بین اقدامات پیشنهادی توسط کارشناسان با توجه به در نظر گرفتن الزامات استانداردها و هم چنین محدودیت هایی از جمله هزینه بر اساس مدل سازی ریاضی می باشد.

روش کار: در این مطالعه مدلی برای انتخاب بهینه اقدامات اصلاحی ارایه شده است که بر طبق آن اقدامات اصلاحی بر اساس اهداف (افزایش میزان کاهش ریسک) و محدودیت های موجود از جمله هزینه و سطح ریسک قابل قبول سازمان انتخاب می گردد. با توجه به گستردگی تعداد جواب های مساله و استفاده متغیرهای دودویی در مساله، برای حل مساله از الگوریتم ژنتیک استفاده شد.

یافته ها: برای نشان دادن توان مندی این روش در یک صنعت تولید برق تعداد ۴۰ خطر شناسایی شده و مقدار ریسک آن ها تخمین زده شد، سپس برای هر کدام از آن خطرات، اقدامات اصلاحی ممکن تعیین گردید. با استفاده از مدل پیشنهادی، اقدامات اصلاحی به صورت بهینه انتخاب گردید که با کم ترین هزینه ممکن کلیه ریسک ها به زیر سطح ریسک قابل قبول سازمان تقلیل یافتند.

نتیجه گیری: در این مطالعه نشان داده شد که انتخاب اقدامات اصلاحی با استفاده از مدل سازی ریاضی انتخابی مناسب، با دقت بالا در کم ترین زمان حاصل می گردد. این روش به عنوان روشی جایگزین روش های کیفی و مبتنی بر نظر کارشناسان پیشنهاد می گردد.

کلمات کلیدی: اقدامات اصلاحی، مدل سازی ریاضی، ریسک، ایمنی

- ۱- کارشناس ارشد HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۲- دانشیار، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۳- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- ۴- استاد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
- ۵- کارشناس ارشد مهندسی شیمی (HSE)، موسسه آموزش عالی انرژی، ساوه، ایران

مقدمه

مدیریت ریسک شامل فرآیند تعریف سیستم، شناسایی خطر، شناسایی سناریوهای حادثه، کمی کردن احتمالات و پیامدها، ارزیابی ریسک، شناسایی موارد انتخابی کنترل ریسک، تصمیم‌گیری برای اجرا، شناسایی و مدیریت ریسک‌های باقی مانده می‌باشد (۱). مدیریت و ارزیابی ریسک قلب سیستم‌های مدیریتی مرتبط با HSE به شمار رفته و با استفاده از آن، ضمن شناسایی خطرات محیط کار می‌توان نسبت به اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی و اختصاص منابع لازم برای این کار اقدام نمود (۲). یکی از بخش‌های مهم مدیریت ریسک که کم‌تر به آن پرداخته شده است کنترل ریسک می‌باشد که تمرکز این مقاله بر روی این بخش است.

کنترل ریسک به آن بخش از مدیریت ریسک گفته می‌شود که شامل خط‌مشی‌ها، استانداردها و فرایندهایی به‌منظور کاهش، جلوگیری و یا به حداقل رسانیدن ریسک‌هایی است که یک شرکت با آن‌ها مواجه است (۳). در بخش کنترل ریسک از فرایند مدیریت ریسک باید در جهت حذف و یا کاهش ریسک‌های شناسایی شده تلاش کرد. در انتخاب و اجرای اقدامات اصلاحی عوامل زیادی موثر است که از جمله آن‌ها می‌توان به میزان ریسک، هزینه اقدام اصلاحی، نوع و شدت صدمه، قابلیت اجرای اقدام اصلاحی و عدم ایجاد مخاطرات جدید اشاره کرد (۲). همان‌طور که گفته شد به این بخش از مدیریت ریسک توجه کم‌تری شده است. در روش‌های سنتی برای انتخاب اقدام اصلاحی از نظر کارشناسان استفاده می‌شده که این امر سبب سلیقه‌ای بودن انتخاب اقدامات اصلاحی می‌گردیده است. از جمله روش‌هایی که تمرکز آن بر روی کنترل ریسک می‌باشد می‌توان

به روش معرفی شده توسط Fine در سال ۱۹۷۱ اشاره کرد که در این روش پس از تعیین ریسک، به اهمیت انتخاب اقدام اصلاحی می‌پردازد. در روش ویلیام فاین برای هر اقدام اصلاحی سه عامل ریسک خطر، هزینه و درجه میزان کاهش ریسک در نظر گرفته شده است. در روش مذکور انتخاب هر اقدام اصلاحی به صورت جداگانه انجام می‌گیرد (۴، ۵). روش ویلیام فاین دارای محدودیت‌هایی چون عدم در نظر گرفتن خطرات و اقدامات اصلاحی به صورت هم‌زمان، عدم در نظر گرفتن محدودیت‌های سازمان از جمله بودجه تعیین شده برای کاهش ریسک می‌باشد. هم‌چنین در این روش امکان در نظر گرفتن اهداف مختلف سازمان وجود ندارد. همان‌طور که گفته شد روش ویلیام فاین برای اجرا یا عدم اجرای یک اقدام اصلاحی که جهت کاهش یک ریسک خاص در نظر گرفته شده است می‌تواند کاربرد داشته باشد اما زمانی که تعداد ریسک‌ها و هم‌چنین تعداد اقدامات اصلاحی زیاد باشد و منابع موجود از جمله بودجه در نظر گرفته شده برای کاهش ریسک‌های سازمان محدود باشد، فرایند انتخاب اقدامات اصلاحی با پیچیدگی بالایی همراه خواهد بود. امروزه مطالعات و روش‌های دیگری در این زمینه انجام شده است که اکثر این مطالعات با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه از جمله AHP، TOPSIS، ELCTRE و ... برای وزن دهی یا رتبه‌بندی اقدامات اصلاحی استفاده شده است. با توجه به محدودیت روش‌های رتبه‌بندی استفاده از این روش‌ها برای انتخاب بهینه اقدامات اصلاحی مناسب نمی‌باشد. روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه برای رتبه‌بندی اقدامات اصلاحی مناسب می‌باشد و از این روش‌ها می‌توان برای انتخاب یک اقدام

اصلاحی از بین چندین اقدام اصلاحی استفاده کرد اما برای انتخاب چندین اقدام اصلاحی برای حجمی از خطرات، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه کارآمد نبوده و ضعف‌هایی از جمله عدم در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم مانند بودجه سازمان و نیز عدم امکان تعریف اهداف مختلف برای انتخاب بهینه اقدامات اصلاحی را به همراه خواهد داشت.

شناسایی و انتخاب برنامه و اقداماتی جهت کاهش تعداد و عواقب حوادث اهمیت بسیاری دارد (۶، ۷). گسترش روزافزون اهمیت ایمنی، توسعه روش‌های مختلف ارزیابی ریسک، هم‌چنین حجم انبوه خطرات در یک سازمان، پیشنهادات مختلف برای اجرای اقدامات اصلاحی مختلف برای هر خطر و محدودیت‌هایی از جمله هزینه امکان تصمیم‌گیری دقیق بدون استفاده از روش‌های ریاضی را با خطا همراه می‌نماید. تا کنون از مدل سازی ریاضی در زمینه‌های مختلفی از جمله قابلیت اطمینان، نگه‌داری و تعمیرات، سیستم‌های ایمنی و... استفاده شده (۸) اما از مدل سازی ریاضی برای انتخاب اقدامات اصلاحی در فرآیند مدیریت ریسک ایمنی کم‌تر استفاده شده است.

رشد فناوری و افزایش اهمیت ایمنی در واحدهای صنعتی و حجم انبوه خطرات باعث شده تا فرآیند تصمیم‌گیری برای انتخاب اقدامات اصلاحی مناسب در بین انبوهی از انتخابات موجود یکی از دغدغه‌های مدیران ارشد ایمنی در واحدهای صنعتی به شمار آید. هدف از این مطالعه ارایه مدلی جهت انتخاب بهینه اقدامات اصلاحی از بین اقدامات اصلاحی پیشنهادی توسط کارشناسان، با توجه به در نظر گرفتن الزامات استانداردها و هم‌چنین

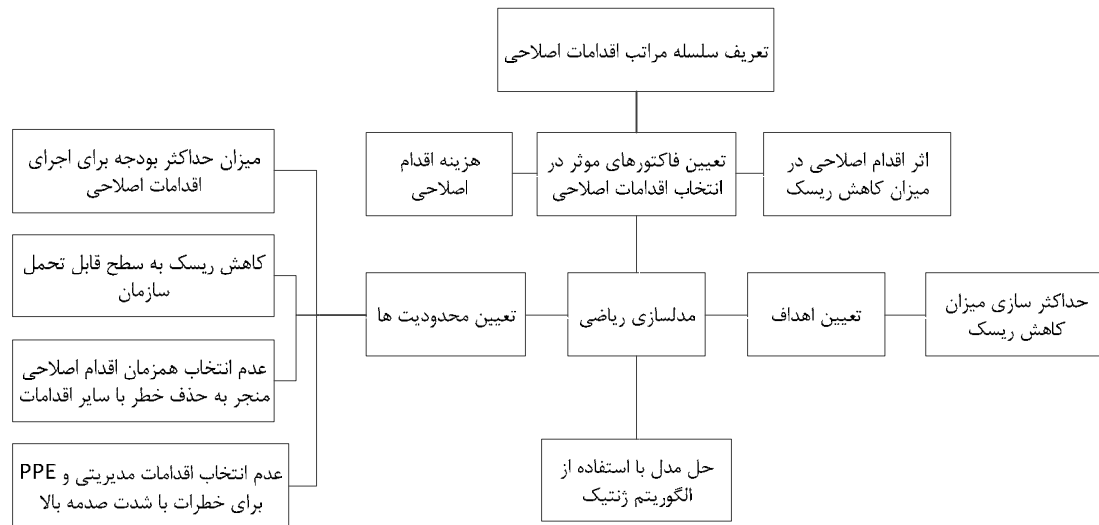
محدودیت‌هایی از جمله هزینه بر مبنای مدل‌سازی ریاضی می‌باشد.

== مدل سلزی و روش کار

فرآیند مدیریت ریسک شامل گام‌های شناسایی خطرات، ارزیابی ریسک‌ها، کاهش ریسک‌های شناسایی شده و مستندسازی نتایج می‌باشد (۹). تمرکز اصلی این مطالعه بر روی گام کاهش ریسک‌های شناسایی شده می‌باشد. پیش از مدل‌سازی ریاضی انتخاب اقدامات اصلاحی، ابتدا باید اقدامات اصلاحی گروه‌بندی گردند که برای این منظور از سلسله‌مراتب اقدامات اصلاحی استفاده شده است. سپس برای اقدامات اصلاحی پیشنهادی برای هر یک از خطرات دو عامل میزان اثر در کاهش ریسک و هزینه تعیین می‌گردد. در گام بعدی با توجه به سیاست‌های سازمان اهداف و محدودیت‌ها به صورت مدل ریاضی تعریف خواهد گردید و در انتها جواب بهینه مدل تشکیل شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل می‌گردد. چارچوب کلی مدل پیشنهادی در شکل (۱) نمایش داده شده است.

سلسله‌مراتب اقدامات اصلاحی

در این مطالعه برای گروه‌بندی اقدامات اصلاحی از سلسله‌مراتب انتخاب اقدامات اصلاحی پیشنهادی در استانداردها استفاده شده است. استفاده از نظر کارشناسان از دیرباز تاکنون به‌عنوان روشی کاربردی برای انتخاب اقدامات اصلاحی به شمار می‌آید. در روش‌های سنتی، پس از ارزیابی ریسک و اولویت‌بندی ریسک‌ها، کارشناسان با توجه به سلسله‌مراتب پیشنهادی انتخاب اقدامات اصلاحی در استانداردها، برای کاهش ریسک‌ها به سطح ریسک قابل قبول



شکل (۱) - چارچوب کلی مدل انتخاب بهینه اقدامات اصلاحی

خطرات می شود در نظر می گیریم.

۳. به کارگیری تجهیزات یا ابزارهای مهندسی اگر کاهش ریسک از طریق تغییر طراحی ممکن نباشد، شدت و/ یا احتمال رویداد ناگوار مربوط به خطرات را با استفاده از تجهیزات و ابزارهای مهندسی کاهش می دهیم.

۴. استفاده از تجهیزات هشداردهنده

اگر استفاده از تجهیزات و ابزارهای مهندسی ممکن نباشد و یا شدت و یا احتمال رویداد ناگوار مربوط به خطرات به اندازه کافی کاهش نیابد از سیستم های تشخیص دهنده و هشداردهنده جهت هشدار به کارکنان در مورد وجود شرایط مخاطره آمیز یا وقوع رویداد خطرناک استفاده می کنیم.

۵. به کارگیری علائم و تابلوها، رویه ها، آموزش و تجهیزات حفاظت فردی (PPE) (Personal Protective Equipment)

درجایی که متغیرهای طراحی، تغییرات طراحی و تجهیزات و ابزارهای مهندسی ممکن نباشد و تجهیزات هشداردهنده نتواند به اندازه کافی شدت

اقدامات اصلاحی را در گزارش ارزیابی ریسک پیشنهاد می دادند. ریسک قابل قبول به ریسکی می گویند که به سطحی کاهش یافته باشد که با توجه به تعهدات قانونی و خط مشی ایمنی و بهداشت حرفه ای برای سازمان قابل پذیرش باشد (۱۰).

در سال ۲۰۰۶، Manuele در مقاله خود سلسله مراتب اقدامات اصلاحی را در استانداردهای مختلف مورد بررسی قرار داده است (۱۱). در اکثر استانداردهای مختلف سلسله مراتب انتخاب اقدامات اصلاحی تقریباً به طور مشابهی بیان گردیده است که سلسله مراتب و الزامات موجود در استاندارد MIL-STD-882E به شرح ذیل می باشد (۱۲):

۱. حذف خطرات از طریق انتخاب طراحی به طور ایده آل خطرات باید به وسیله انتخاب طراحی یا جایگزینی مواد حذف گردند.

۲. کاهش ریسک از طریق تغییر طراحی اگر اتخاذ تغییر طراحی یا مواد برای حذف خطرات ممکن نباشد، تغییرات طراحی را که باعث کاهش شدت و/ یا احتمال رویداد ناگوار مربوط به

و انتخاب اقدامات اصلاحی که اثر بیش تری دارند یکی از اولویت‌های انتخاب اقدامات اصلاحی به شمار می‌آید.

۲. هزینه اقدام اصلاحی

هزینه اجرای اقدام اصلاحی به‌عنوان یکی از عوامل انتخاب هر اقدام تعریف شده است و معمولاً مدیران ایمنی مقدار محدودی از منابع مالی برای انتخاب اقدامات اصلاحی در اختیار دارند. کارشناسان بعد از مشخص کردن اقدام اصلاحی باید هزینه تقریبی اجرای آن را نیز تخمین بزنند. ویژگی هزینه می‌تواند در انتخاب یا عدم انتخاب یک اقدام اصلاحی تأثیرگذار باشد.

مدل سازی ریاضی

با توجه به سیاست‌های مدیران ایمنی و نوع محیط‌های کاری اهداف متفاوتی برای انتخاب اقدامات اصلاحی مدنظر بوده و محدودیت‌های مختلفی در فرایند انتخاب بهینه اقدامات اصلاحی باید در نظر گرفته شود. مدل ریاضی ارایه شده در این تحقیق برای بهینه سازی اقدامات اصلاحی به صورت زیر می باشد:

$$\max \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij} x_{ij} \leq TC \quad (1)$$

$$R_i - \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} \leq LCC, i = 1, 2, \dots, I \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} \leq R_i, i = 1, 2, \dots, I \quad (3)$$

$$M. x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} \leq M, i = 1, 2, \dots, I \quad (4)$$

$$x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} \geq x_{i5}, i \in catastrophic\ severity \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

یا احتمال رویداد ناگوار مربوط به خطرات را کاهش دهد، علایم و تابلوها، رویه‌ها، آموزش و PPE را به کار می‌گیریم. علایم شامل پلاکاردها، برجسب‌ها، علایم و سایر نگاره‌های بصری می‌باشد. رویه‌ها و آموزش باید در بردارنده هشدار و اخطارهای مناسب باشد. رویه‌ها می‌تواند استفاده از PPE را تعیین کند. برای خطراتی که در گروه بحرانی و فاجعه‌بار طبقه‌بندی می‌شوند از علایم و تابلوها، رویه‌ها، آموزش و PPE به‌عنوان تنها راه کاهش ریسک نباید استفاده شود. (محدودیت چهارم در مدل ریاضی).

برای دسته بندی اقدامات اصلاحی در این مطالعه با توجه به سلسله مراتب انتخاب اقدامات اصلاحی در استاندارد MIL-STD-882E اقدامات اصلاحی پیشنهادی کارشناسان در ۵ گروه حذف خطر، کاهش ریسک، اقدامات مهندسی، تجهیزات هشداردهنده و گروه به کارگیری علایم و PPE دسته بندی شده است.

عوامل مؤثر در انتخاب اقدامات اصلاحی

با مطالعه استانداردهای ISO 17776:2000 و ANSI/AIHA Z10-2012، برخی از عوامل مؤثر در انتخاب اقدامات اصلاحی شناسایی شدند که از جمله مهم ترین آن‌ها می‌توان به سهم اقدام اصلاحی در کاهش ریسک، هزینه لازم برای اجرای اقدام اصلاحی و تعیین سطح ریسک قابل قبول سازمان برای پذیرش خطرات اشاره کرد که در اهداف و محدودیت های این مطالعه در نظر گرفته شده است (۱۳، ۱۴).

۱. اثر اقدام اصلاحی در میزان کاهش ریسک

هر اقدام اصلاحی بعد از اجرا باعث حذف یا کاهش مقدار ریسک می‌گردد که به مقدار کاهش ریسک مرتبط با هر اقدام، اثر آن اقدام گفته می‌شود. شناسایی

فردی و آموزش و رویه (دسته شماره ۵) به صورت تنها قابل پذیرش نباشد.

حل مدل

تعداد متغیرهای تصمیم مساله برابر $5N$ می‌باشد که N تعداد خطرات شناسایی شده می‌باشد و عدد ۵ نیز تعداد گروه اقدام اصلاحی می‌باشد. با توجه به این که هر متغیر می‌تواند دو مقدار صفر یا یک را انتخاب نماید، تعداد جواب‌های موجود برای مساله برابر $5N \times 2$ عدد می‌باشد (تعداد جواب برای مساله ای با ۴۰ خطر شناسایی شده ۲۲۰۰ عدد می‌باشد). با توجه به گستردگی تعداد جواب‌های مساله و استفاده متغیرهای دودویی در مساله، برای حل آن از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

ایده اصلی الگوریتم‌های تکاملی در سال ۱۹۶۰ میلادی توسط Richenberg مطرح گردید. الگوریتم‌های ژنتیک که منشعب از این نوع الگوریتم‌ها می‌باشد، در حقیقت روش جستجوی کامپیوتری بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی و بر اساس ساختار ژن‌ها و کروموزوم‌ها است که توسط Holland (۱۹۷۰) در دانشگاه میشیگان مطرح شد (۱۵). پس از وی یکی از دانشجویانش به نام Goldberg با حل مساله بسیار سخت کنترل انتقال خط لوله گاز در رساله خود (۱۹۸۹)، الگوریتم ژنتیک را مشهور ساخت (۱۶). یکی از بهترین و جامع‌ترین تعاریف الگوریتم‌های ژنتیک نیز متعلق به کتاب گلدبرگ است: "الگوریتم‌های ژنتیک مدلی از یادگیری ماشین است که نحوه رفتار آن تمثیلی از فرآیندهای تکاملی موجود در عالم طبیعت است". الگوریتم‌های ژنتیک یکی از قوی‌ترین روش‌های برگرفته از طبیعت است که به جستجوی فضای مساله به صورت تصادفی

که در آن x_{ij} متغیر تصمیم در مورد اجرا (۱) یا عدم اجرای (۰) اقدام اصلاحی زام و خطر i ام می‌باشد

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if عدم اجرای اقدام اصلاحی} \\ 1 & \text{if اجرای اقدام اصلاحی} \end{cases} \quad x_{ij} \in \{0,1\}$$

d_{ij} میزان کاهش ریسک برای اقدام اصلاحی زام و خطر i ام که برابر است با $R_i e_{ij}$ ، درصد کاهش ریسک با اجرای اقدام اصلاحی زام و خطر i ام، c_{ij} هزینه اجرای اقدام اصلاحی زام برای خطر i ام، TC حداکثر هزینه ای که مدیریت سازمان برای اجرای اقدامات اصلاحی در نظر گرفته است، LCC سطح ریسک قابل تحمل یا قابل قبول سازمان، R_i عدد ریسک مربوط به خطر i ام و M یک عدد بسیار بزرگ می‌باشد.

تابع هدف مدل ریاضی حداکثر سازی میزان کاهش ریسک کل سیستم می‌باشد. محدودیت اول نشان می‌دهد که میزان هزینه اجرای اقدامات اصلاحی باید کم تر از حداکثر هزینه ای باشد که مدیریت سازمان برای اجرای اقدامات اصلاحی در نظر گرفته است، محدودیت دوم باعث می‌شود که حداکثر ریسک باقی مانده برای هر خطر به کم تر از سطح ریسک قابل قبول سازمان برسد، محدودیت سوم باعث این امر می‌شود که مجموع کاهش ریسک برای هر خطر بیش تر از ریسک آن خطر نگردد. محدودیت چهارم در مدل ریاضی باعث می‌شود تا در صورت اجرای اقدام اصلاحی دسته حذف خطر (دسته شماره ۱)، اقدام اصلاحی دیگری اجرا نشود و در آخر محدودیت پنجم باعث می‌شود تا برای خطرات با شدت صدمه بالا (خطراتی که عامل شدت در ارزیابی ریسک برای آن‌ها زیاد و بسیار زیاد تخمین زده شده) اجرای اقدام اصلاحی دسته تجهیزات حفاظت

جدول (۱) - نتایج ارزیابی ریسک انجام شده در یک صنعت تولید برق با ۵ عامل ریسک و عدد ریسک نسبی به دست آمده از روش TOPSIS فازی

شماره خطر (i)	فعالیت	مخاطرات باقوه/ عوامل زیان آور	تاثیرات / پیامدها	شدت صدمه	احتمال حادثه	ناآشکار سازی	حساسیت به اجرا نشدن نگه داری و تعمیرات	حساسیت به عدم استفاده از PPE	ضریب نزدیکی (Ri)
۱	کار در ارتفاع	سقوط از ارتفاع	صدمات جسمانی	ب.م	ب.م	ک	ب.م	ک.م	۰.۳۶۶۶۷۹۸۵
۲	حضور در واحدها	الکتریسیته	برق گرفتگی	ب.ز	ک	ک.م	ب.م	ک.م	۰.۳۷۵۹۴۵۶۷
۳	کار با تجهیزات اطفاء حریق	تماس با مواد شیمیایی	تحریک پوستی و تنفسی	ک	ب.ز	ک	ک	ز	۰.۳۴۵۵۹۹۱۱
۴	عملیات اطفاء	گازها و بخارات ناشی از حریق	احتمال خفگی و مشکلات تنفسی	ب.م	ک	ک.م	خ.ن	ک	۰.۳۵۸۳۹۰۲۲
۵	عملیات اطفاء	پرتو UV و IR	عوارض پوستی و ...	ب.م	ک	ک.م	خ.ن	ک	۰.۳۵۸۳۹۰۲۲
۶	حضور در واحدها	سروصدا	صدمات شنوایی	ب.م	خ.ن	ک.م	ک.م	خ.ن	۰.۳۵۲۶۲۸۷۷
۷	فشار کاری	استرس شغلی	صدمات روانی	ک	ک	ک	خ.ن	خ.ن	۰.۱۵۷۹۴۵۹۳
۸	ارتعاش واحدها	ارتعاش تمام بدن	صدمات جسمانی	ب.م	ب.م	ک.م	ب.ز	ک	۰.۴۰۴۰۷۱۵۹
۹	راه اندازی واحدها	الکتریسیته	برق گرفتگی	ب.ز	ک	ب.م	زیاد	ب.م	۰.۴۳۰۵۲۶۶۱
۱۰	حضور در واحدها با توجه به عمر بیش از حد واحدها	ترکیدن CT های لاین تراب	آسیب دیدگی	ب.ز	ک	ب.م	ب.م	ب.م	۰.۴۱۲۲۷۶۰۱
۱۱	حضور در واحدها و اتاق فرمان	کافی نبودن علائم و تابلوهای راهنمایی	تصادفات، آسیب دیدگی	ب.ز	ک	ک.م	ک.م	ک	۰.۳۴۴۰۶۰۳۸
۱۲	مواد قابل اشتعال	آتش سوزی	صدمات جسمانی	ب.م	ک	ک	ک.م	ب.م	۰.۳۹۶۴۷۲۷۷
۱۳	ورود رطوبت به داخل ترانس	انفجار تانک	آسیب دیدگی	ب.ز	خ.ن	ک	خ.ن	ک.م	۰.۳۷۷۶۴۵۷۵
۱۴	انجام نوبت کاری	نوبت کاری	خستگی و اختلالات بهداشتی	ک	ک	ک	خ.ن	خ.ن	۰.۱۵۷۹۷۵۹۳
۱۵	ارت کردن بریکر قبل از باز شدن سکسیونر	الکتریسیته	برق گرفتگی و سوختگی	ب.م	ک	ک	ک.م	ک.م	۰.۳۶۸۳۷۱۳
۱۶	حضور در واحدها	وجود حیوانات موذی و وحشی	گاز گرفتگی و گزیدگی	ب.م	ک	ک	ک.م	ک.م	۰.۲۸۲۵۳۱۱۹
۱۷	حضور در واحدها با توجه به عمر بیش از حد واحدها	نشت روغن	آتش سوزی	ب.م	ک	ک.م	ک.م	ک	۰.۳۹۰۸۸۱۱۷
۱۸	انجام تعمیرات در محیط های کم نور	روشنایی	صدمات بینایی	ک	ب.م	ک.م	ک.م	ک.م	۰.۳۰۴۶۰۸۳۳
۱۹	انجام تعمیرات در واحدها	میدان های الکترو مغناطیس	صدمات جسمانی	ب.م	خ.ن	ک.م	ب.م	ک.م	۰.۳۹۷۱۲۴۰۷
۲۰	انجام تعمیرات در واحدها	سروصدا	صدمات شنوایی	ب.م	ک	ک.م	ب.م	خ.ن	۰.۳۹۷۱۵۲۲۹
۲۱	انجام تعمیرات در واحدها	الکتریسیته	برق گرفتگی	ب.ز	ک	ک.م	ک.م	ک	۰.۳۴۴۰۶۰۳۸
۲۲	کار در ارتفاع	سقوط اجسام	صدمات جسمانی	ب.م	ک	ک	ک.م	ک	۰.۳۶۸۸۰۳۹۴
۲۳	تماس با ساینسرها	الیاف آزبست	سرطان	ب.م	خ.ن	ک	ک.م	ک	۰.۳۴۲۷۳۱۴۳
۲۴	انجام تعمیرات	سرما	کاهش هوشیاری و سرمازدگی	ک	ب.م	ک.م	ک.م	ک	۰.۳۹۰۸۸۱۱۷
۲۵	شرایط نامناسب کار	حمل دستی بار	MSDs	ب.م	ب.م	ب.م	ک.م	ک.م	۰.۳۹۳۲۰۶۷
۲۶	کار با برق	الکتریسیته	برق گرفتگی	ب.ز	ک	ک.م	ز	ک.م	۰.۳۹۴۲۶۸۸۹
۲۷	استفاده از مواد شیمیایی	تماس با دست و بدن	صدمات پوستی	ب.م	ب.م	ک.م	ز	ک	۰.۳۹۳۵۷۵۴۸

جدول (۱) - نتایج ارزیابی ریسک انجام شده در یک صنعت تولید برق با ۵ عامل ریسک و عدد ریسک نسبی به دست آمده از روش TOPSIS فازی (ادامه)

شماره خطر (i)	فعالیت	مخاطرات باقوه / عوامل زیان آور	تاثیرات / پیامدها	شدت صدمه	احتمال حادثه	ناآشکار سازی	حساسیت به اجرا نشدن نگه داری و تعمیرات	حساسیت به عدم استفاده از PPE	ضریب نزدیکی (R _i)
۲۸	فضاهای بسته (باتری خانه)	گازهای اسیدی	صدمات تنفسی	ب.م	ب.م	ک.م	ز	خ.ن	۰/۳۸۱۶۲۲۳
۲۹	تعمیرات واحدها	ارتعاش	صدمات جسمانی	ب.م	ب.م	خ.ن	ب.م	ب.م	۰/۳۶۲۴۷۲۳۶
۳۰	حضور در واحدها	میدان الکترومغناطیس	صدمات جسمانی	ب.م	خ.ن	ک.م	ب.م	ک.م	۰/۲۹۷۱۲۴۰۷
۳۱	وجود مواد قابل اشتعال	حریق	سوختگی	ب.م	ک	ک	ک	ب.م	۰/۲۷۸۷۸۸۶۸
۳۲	حضور در واحدها	سقوط سایلنسرها	صدمات جسمانی	ب.م	ب.م	ک	ب.م	ک.م	۰/۳۶۶۶۷۹۸۵
۳۳	تعمیرات واحدها	گرما	گرم‌زدگی	ک	ب.م	ک	ک.م	ک	۰/۲۶۸۸۰۳۹۴
۳۴	نشئی گازوییل و روغن	آتش سوزی	سوختگی	ب.م	ب.م	ب.م	ک.م	ب.ز	۰/۴۲۷۴۸۲۶۱
۳۵	کار با تجهیزات دوار	نیپ پوینت	صدمات جسمانی	ب.م	ب.م	ک.م	زیاد	ک	۰/۳۹۳۵۷۵۴۸
۳۶	تعمیرات واحدها	نامناسب بودن محل کار	MSDs	ب.م	ک	ک.م	ک	ک.م	۰/۲۸۶۸۷۷۲۹
۳۷	کار با مواد آلرژن	آلرژن	صدمات جسمانی	ب.م	ب.م	خ.ن	ب.م	ب.م	۰/۳۶۲۴۷۲۳۶
۳۸	کار بر روی سطح لغزنده	لغزندگی	صدمات جسمانی	ب.م	خ.ن	ک.م	ب.م	ک.م	۰/۲۹۷۱۲۴۰۷
۳۹	کار با چرثقیل	سقوط بار	صدمات جسمانی	ب.م	ب.م	ک	ک	ب.م	۰/۳۴۴۴۵۴۴۸
۴۰	استفاده از مواد شیمیایی	استنشاق هوا	صدمات تنفسی	ک	ک.م	ک	ک.م	ک	۰/۲۳۵۲۱۳۶۵

*: خ.ن: خیلی ناچیز / ک: کم / ک.م: کمتر از متوسط / ب.م: بیشتر از متوسط / ز: زیاد / ب.ز: بسیار زیاد

شده می باشد ($i = 1, 2, \dots, 40$). برای به دست آوردن عدد نسبی ریسک و اولویت بندی خطرات از روش Fuzzy TOPSIS استفاده گردیده است که این روش ارزیابی ریسک در (۱۷) معرفی و به تفصیل شرح داده شده است و چون روش ارزیابی ریسک از اهداف این مطالعه خارج است بیش از این به آن پرداخته نمی شود. در روش ارزیابی ریسک استفاده شده از ۵ عامل ریسک شامل شدت صدمه، احتمال حادثه، ناآشکار سازی، حساسیت به اجرا نشدن نگه داری و تعمیرات و حساسیت به عدم استفاده از PPE برای ارزیابی خطرات استفاده گردیده است. در جدول (۲) اقدامات اصلاحی برای ۴۰ خطر شناسایی شده پیشنهاد گردیده است که با استفاده از مدل پیشنهادی در این تحقیق اقدامات اصلاحی

هدایت شده پرداخته که این جستجو در قالب تلاش جهت ایجاد جواب‌هایی بهتر، در هر نسل نسبت به جواب‌های نسل قبل صورت می گیرد و یکی از بهترین اشکال بهینه‌سازی عددی در مسایل علوم و مهندسی را ارایه می کند. توضیحات بیش تر در مورد الگوریتم ژنتیک و هم چنین برخی از زمینه‌های کاربردی این الگوریتم در (۱۶) گفته شده است.

مطالعه موردی

روش پیشنهادی محدودیتی در مورد روش ارزیابی و شناسایی ریسک ندارد. در این مطالعه از نتایج ارزیابی ریسک انجام شده در یک صنعت تولید برق که در جدول (۱) آمده برای اجرای مدل پیشنهادی استفاده گردیده است که شامل ۴۰ خطر شناسایی

جدول (۲) - اقدامات اصلاحی پیشنهادی برای ۴۰ خطر شناسایی شده.

شماره خطر (i)	حذف خطر	کاهش ریسک	اقدامات مهندسی	تجهیزات هشداردهنده	علائم و PPE
۱	-	مونتاز در سکوی کم ارتفاع و سپس حمل قطعه با جرثقال	دسترسی با طناب	-	فول بادی هارنس دارای جاذب شوک
۲	-	-	میله راد به عنوان ارت	-	نصب علائم خطر برق گرفتگی و پدهای عایق
۳	خرید فوم ایمن	-	استفاده از هم زن خودکار	-	در دسترس بودن دستکش و لباس ایمنی
۴	-	سیستم اطفا حریق خودکار	-	سیستم اعلان حریق	شارژ منظم BA
۵	-	سیستم اطفا حریق خودکار	حفاظ های تشعشع	-	آموزش اطفا حریق
۶	سیستم اتوماتیک	تقویت فوندانسیون	جاذب ارتعاش و صدا	-	-
۷	-	زمان بندی مناسب	-	-	-
۸	-	جایگزینی دستگاه	جاذب ارتعاش	پایش ارتعاش محیط	کفش ضد ارتعاش
۹	-	ترانس کاهنده	تعمیرات چاه ارت	الارم	آموزش ایمنی راه اندازی
۱۰	سیستم اتوماتیک و کنترل روم	نوسازی	حفاظ گذاری	الارم برای ورود به حریم	-
۱۱	جلوگیری از تردد وسایل نقلیه	-	-	-	-
۱۲	-	استفاده از مواد با خطر اشتعال کمتر با وجود گران بودن آن	انبار مواد قابل اشتعال ۲۵ متر دورتر از واحد	کالیبراسیون دتکتورها	-
۱۳	نگه داری ترانس در محیط کاملا خشک	-	عایق کردن ترانس	-	-
۱۴	-	افزایش زمان استراحت و کاهش شیفت کاری شب	-	-	-
۱۵	-	استفاده از تجهیزات پیشرفته	بازرسی منظم تجهیزات	-	تدوین دستورالعمل
۱۶	-	سم پاشی	-	-	-
۱۷	-	-	بازرسی منظم تجهیزات	اعلان حریق	آموزش استفاده از خاموش کننده های دستی
۱۸	انتقال تجهیز و انجام تعمیرات در اداره تعمیرات	استفاده از سیستم روشنایی پرتابل	-	-	-
۱۹	-	-	حفاظ گذاری محوطه های ممنوعه	تست امواج الکترومغناطیس قبل از انجام تعمیرات	تدوین دستورالعمل
۲۰	-	جایگزینی با ادوات کم صدا	جاذب صدا	-	تحويل ایرپلاگ به کارکنان تعمیرات
۲۱	-	کار با تجهیزات عایق توسط کارکنان تعمیرات برق	-	-	تحويل دستکش و کفش عایق به کارکنان تعمیرات برق
۲۲	-	-	نصب تور ایمنی	-	-
۲۳	-	پایش منظم کارکنان در فواصل زمانی کوتاه تر	-	-	-
۲۴	تغییر برنامه زمان بندی تعمیرات	-	-	-	استفاده از البسه گرم
۲۵	جابه جایی بار با نوارنقاله	-	حمل بار با استفاده از چرخ دستی	-	آموزش اصول حمل دستی بار
۲۶	-	از رده خارج کردن ادوات مستعمل	بازرسی منظم چاه ارت	استفاده از دستگاه های هشدار دهنده قبل از کار با برق	آموزش ایمنی برق
۲۷	کار با حلال به صورت اتوماتیک	استفاده از حلال با خطر کم تر	دوش ایمنی	-	آموزش MSDS برای کارکنان پیمانکاری
۲۸	-	-	تامین تهویه مناسب	الارم	نصب تابلوهای هشداردهنده و تدوین دستورالعمل
۲۹	-	خرید دستگاه با ارتعاش کم تر	استفاده از جاذب ارتعاش	-	دستکش ضد ارتعاش

جدول (۲) - اقدامات اصلاحی پیشنهادی برای ۴۰ خطر شناسایی شده.
(ادامه)

۳۰	-	-	حفاظ گذاری محوطه های ممنوعه	تست امواج الکترومغناطیسی قبل از ورود	تدوین دستورالعمل
شماره خطر (i)	حذف خطر	کاهش ریسک	اقدامات مهندسی	تجهیزات هشداردهنده	علامت و PPE
۳۱	-	استفاده از مواد با خطر اشتعال کمتر با وجود گران بودن آن	سیستم اطفاء حریق خودکار	بازرسی منظم سیستم اعلان حریق	-
۳۲	ممانعت از ورود افراد و انجام کار به صورت اتوماتیک	-	مهار ساینسرها	-	-
۳۳	تغییر برنامه زمان بندی تعمیرات	-	سیستم تهویه	-	-
۳۴	-	طراحی دایک برای مخازن	بازرسی منظم مخازن	کالیبراسیون دکتورها	تدوین دستورالعمل بازرسی ایمنی
۳۵	-	جانمایی دستگاه خارج از محدوده دسترسی (دو و نیم متر)	طراحی حفاظ برای قطعات دوار	-	خرید لباس کار چسبان
۳۶	انجام تعمیرات در محیط با طراحی ارگونومیک	-	خرید نردبان و تجهیزات ایمن و عدم کار در ارتفاع بالای سر	-	آموزش اصول ارگونومی
۳۷	-	کاهش میزان مواد آلرژن (وجود مواد بیش تر از مقدار مورد نیاز)	-	-	-
۳۸	-	-	آچارکشی هفتگی اتصالات	کالیبراسیون تجهیزات ابزار دقیق	تدوین دستورالعمل بازرسی و کالیبراسیون SIS ها
۳۹	-	-	استفاده از ریگر	-	تدوین دستورالعمل ایمنی پارپرداری
۴۰	-	-	استفاده از دمنده	در سرویس آوردن آشکارسازها	خرید ماسک تنفسی مناسب

جدول (۳) - راهنمای اثر اقدام اصلاحی.

شماره	درصد تأثیر (%)	اثر	میزان اثر اقدام اصلاحی
۱	۱۰	بسیار ناچیز	اقدام اصلاحی تأثیر بسیار ناچیزی در کاهش ریسک خطر دارد
۲	۲۰	ناچیز	اقدام اصلاحی تأثیر ناچیزی در کاهش ریسک خطر دارد
۳	۳۰	خیلی کم	اقدام اصلاحی تأثیر خیلی کمی در کاهش ریسک خطر دارد
۴	۴۰	کم	اقدام اصلاحی تأثیر کمی در کاهش ریسک خطر دارد
۵	۵۰	در حد متوسط	اقدام اصلاحی در حد متوسط در کاهش ریسک خطر تأثیر دارد
۶	۶۰	نسبتاً زیاد	اقدام اصلاحی تأثیر نسبتاً زیادی در کاهش ریسک خطر دارد
۷	۷۰	زیاد	اقدام اصلاحی تأثیر زیادی در کاهش ریسک خطر دارد
۸	۸۰	خیلی زیاد	اقدام اصلاحی تأثیر خیلی زیاد در کاهش ریسک خطر دارد
۹	۹۰	بسیار زیاد	اقدام اصلاحی تأثیر بسیار زیاد در کاهش ریسک خطر دارد
۱۰	۱۰۰	حذف خطر	با اجرای اقدام اصلاحی خطر مربوطه به طور کلی از بین خواهد رفت

بهینه از بین این اقدامات انتخاب می گردد. در این مقاله جهت تخمین میزان اثر اقدام اصلاحی در کاهش ریسک به عنوان راهنما از جدول (۳) استفاده شده است. اقدامات اصلاحی ممکن برای هر خطر در پنج گروه تقسیم بندی شده است

$(j = 1, 2, \dots, 5)$ که تخمین هزینه (تومان) اقدامات اصلاحی و میزان درصد اثر هر اقدام اصلاحی در کاهش ریسک برای خطر مربوطه با استفاده از نظر کارشناسان در جدول (۴) آمده است.

در نهایت مدل ریاضی بهینه سازی اقدامات

بهینه از بین این اقدامات انتخاب می گردد. در این مقاله جهت تخمین میزان اثر اقدام اصلاحی در کاهش ریسک به عنوان راهنما از جدول (۳) استفاده شده است. اقدامات اصلاحی ممکن برای هر خطر در پنج گروه تقسیم بندی شده است

جدول (۴) - میزان هزینه (تومان) اقدامات اصلاحی پیشنهادی و درصد میزان اثر آن ها در کاهش ریسک.

شماره خطر (1)	حذف خطر		کاهش ریسک		اقدامات مهندسی		تجهیزات هشداردهنده		علائم و PPE	
	هزینه (Cij)	درصد اثر (eij)	هزینه (Cij)	درصد اثر (eij)	هزینه (Cij)	درصد اثر (eij)	هزینه (Cij)	درصد اثر (eij)	هزینه (Cij)	درصد اثر (eij)
۱	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۵۰	۷۵۰۰۰۰	۳۰	-	-	۲۰۰۰۰۰	۲۰
۲	-	-	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۴۰	-	-	۲۴۰۰۰۰	۲۰
۳	۴۰۰۰۰۰۰	۱۰۰	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	۳۰	-	-	۲۵۰۰۰۰	۲۰
۴	-	-	۱۷۵۰۰۰۰	۴۰	-	-	۵۰۰۰۰۰	۲۰	۳۰۰۰۰۰	۲۰
۵	-	-	۲۰۰۰۰۰۰	۸۰	۱۵۰۰۰۰۰	۵۰	-	-	۳۰۰۰۰۰	۳۰
۶	۱۵۰۰۰۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۶۰	۱۰۰۰۰۰۰	۶۰	-	-	-	-
۷	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۴۰	-	-	-	-	-	-
۸	-	-	۲۰۰۰۰۰۰	۵۰	۱۰۰۰۰۰۰	۳۰	۳۰۰۰۰۰	۲۰	۱۲۰۰۰۰	۲۰
۹	-	-	۲۰۰۰۰۰۰	۴۰	۱۰۰۰۰۰۰	۳۰	۵۰۰۰۰۰	۲۰	۱۰۰۰۰۰	۱۰
۱۰	۷۰۰۰۰۰۰	۱۰۰	۳۰۰۰۰۰۰	۶۰	۲۰۰۰۰۰۰	۳۰	۵۰۰۰۰۰	۱۰	-	-
۱۱	۱۵۰۰۰۰۰	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۲	-	-	۳۰۰۰۰۰۰	۶۰	۱۵۰۰۰۰۰	۵۰	۱۰۰۰۰۰۰	۲۰	-	-
۱۳	۷۵۰۰۰۰۰	۱۰۰	-	-	۲۰۰۰۰۰۰	۵۰	-	-	-	-
۱۴	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۴۰	-	-	-	-	-	-
۱۵	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۷۰	۱۰۰۰۰۰۰	۵۰	-	-	۲۵۰۰۰۰	۲۰
۱۶	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۷۰	-	-	-	-	-	-
۱۷	-	-	-	-	۲۰۰۰۰۰۰	۷۰	۵۰۰۰۰۰	۵۰	۲۰۰۰۰۰	۲۰
۱۸	۶۰۰۰۰۰۰	۱۰۰	۳۰۰۰۰۰۰	۶۰	-	-	-	-	-	-
۱۹	-	-	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	۳۰	۱۵۰۰۰۰۰	۳۰	۲۰۰۰۰۰	۲۰
۲۰	-	-	۴۰۰۰۰۰۰	۴۰	۲۰۰۰۰۰۰	۳۰	-	-	۲۰۰۰۰۰	۲۰
۲۱	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۶۰	-	-	-	-	۳۰۰۰۰۰	۳۰
۲۲	-	-	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	۶۰	-	-	-	-
۲۳	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۵۰	-	-	-	-	-	-
۲۴	۲۰۰۰۰۰۰	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	۲۰۰۰۰۰	۲۰
۲۵	۳۰۰۰۰۰۰	۱۰۰	-	-	۱۷۵۰۰۰۰	۵۰	-	-	۱۰۰۰۰۰	۱۰
۲۶	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۴۰	۱۰۰۰۰۰۰	۲۰	۵۰۰۰۰۰	۲۰	۱۰۰۰۰۰	۱۰
۲۷	۶۰۰۰۰۰۰	۱۰۰	۲۰۰۰۰۰۰	۴۰	۱۵۰۰۰۰۰	۴۰	-	-	۱۰۰۰۰۰	۲۰
۲۸	-	-	-	-	۲۰۰۰۰۰۰	۶۰	۵۰۰۰۰۰	۲۰	۲۰۰۰۰۰	۲۰
۲۹	-	-	۲۰۰۰۰۰۰	۶۰	۱۰۰۰۰۰۰	۴۰	-	-	۱۰۰۰۰۰	۲۰
۳۰	-	-	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	۳۰	۱۵۰۰۰۰۰	۳۰	۲۰۰۰۰۰	۲۰
۳۱	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۶۰	۱۰۰۰۰۰۰	۴۰	۵۰۰۰۰۰	۳۰	-	-
۳۲	۵۰۰۰۰۰۰	۱۰۰	-	-	۲۰۰۰۰۰۰	۷۰	-	-	-	-
۳۳	۳۰۰۰۰۰۰	۱۰۰	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	۴۰	-	-	-	-
۳۴	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۳۰	۷۵۰۰۰۰	۲۰	۲۰۰۰۰۰	۱۰	۵۰۰۰۰۰	۱۰
۳۵	-	-	۱۲۰۰۰۰۰	۵۰	۲۰۰۰۰۰۰	۶۰	-	-	۲۵۰۰۰۰	۲۰
۳۶	۲۵۰۰۰۰۰	۱۰۰	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	۶۰	-	-	۲۵۰۰۰۰	۱۰
۳۷	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	۴۰	-	-	-	-	-	-
۳۸	-	-	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	۳۰	۱۵۰۰۰۰۰	۳۰	۲۰۰۰۰۰	۲۰
۳۹	-	-	-	-	۱۵۰۰۰۰۰	۴۰	-	-	۳۰۰۰۰۰	۱۰
۴۰	-	-	-	-	۱۰۰۰۰۰۰	۴۰	۷۰۰۰۰۰	۴۰	۳۵۰۰۰۰	۳۰

$$\max \sum_{i=1}^{40} \sum_{j=1}^5 d_{ij} x_{ij}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{40} \sum_{j=1}^5 c_{ij} x_{ij} \leq 25,000,000$$

اصلاحی در این صنعت تولید برق با تعداد ۴۰ خطر شناسایی شده، تعداد ۵ گروه اقدام اصلاحی، محدودیت بودجه TC=25,000,000، سطح ریسک قابل قبول سازمان LCC=0.3 به صورت زیر به دست خواهد آمد.

داده شده است، طبق مدل ریاضی پیشنهادی تنها استفاده از پدهای عایق و نصب علائم خطر برق گرفتگی کافی نمی باشد (با توجه به محدودیت پنجم مدل- برای خطرات با شدت صدمه بالا اجرای اقدام اصلاحی دسته تجهیزات حفاظت فردی و آموزش و رویه (دسته شماره ۵) به صورت تنها قابل پذیرش نمی باشد) و در جواب این مدل اجرای اقدام اصلاحی ارت کردن تجهیزات نیز پیشنهاد گردیده است. به همین ترتیب عدم اجرا و یا اجرای اقدامات اصلاحی برای دیگر خطرات در جدول (۵) قابل مشاهده می باشد که مشاهده جزییات این اقدامات در جدول (۲) آمده است.

در جواب به دست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک مقدار مجموع کاهش ریسک (مقدار تابع هدف) برابر ۴/۱۹۳ به دست آمده است که در صورت اجرای اقدامات اصلاحی انتخاب شده هزینه ای به مقدار ۲۴/۸۶۰/۰۰۰ تومان به مجموعه تحمیل خواهد گردید که در آن کلیه ریسک ها به زیر سطح ریسک قابل قبول سازمان تقلیل خواهد یافت. با توجه به هزینه های بالای اقدامات اصلاحی حذف خطرات، این گروه از اقدامات اصلاحی در جواب بهینه به علت محدودیت بودجه کم تر مورد انتخاب قرار گرفته است. با توجه به وجود محدودیت کاهش همه ریسک ها به پایین تر از سطح قابل تحمل سازمان در مدل، بیش تر هزینه ها صرف کاهش ریسک های خطرات با ریسک بالاتر گردید (این مساله در خطرات شماره ۹، ۳۴، ۱۰ و ۸ قابل مشاهده است).

در ادامه به یک سری از مقالات که از مدل سازی ریاضی برای بهینه سازی در مسایل گوناگون استفاده کرده اند و هم چنین مقالاتی که در زمینه اقدامات اصلاحی انجام شده است به صورت مختصر

$$R_i - \sum_{j=1}^5 d_{ij} x_{ij} \leq 0.3 \quad i = 1, 2, \dots, 40$$

$$\sum_{j=1}^5 d_{ij} x_{ij} \leq R_i \quad i = 1, 2, \dots, I$$

$$M \cdot x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} \leq M$$

$$i = 1, 2, \dots, 40$$

$$x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} \geq x_{i5}$$

$$i \in \text{catastrophic severity}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

حل مساله با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در مجموع تعداد متغیرهای تصمیم مساله برابر ۲۰۰ = ۵*۴۰ می باشد که تعداد جواب های موجود برای آن برابر ۲۲۰۰ عدد می باشد. با توجه به نوع مساله، پارامترها به صورت Crossover rate: 0.7، initial population: 20، mutation rate: 0.1، generation size: 500 برای الگوریتم ژنتیک تعیین گردید. با اجرای الگوریتم ژنتیک با پارامترهای مختلف برای مدل مساله، جواب بهینه به صورت جدول (۴) به دست آمده است که در آن الگوریتم کم تر از ۵۰ تکرار به هم گرایی رسیده است.

بحث

همان گونه که در جدول (۵) قابل مشاهده است، در جواب بهینه به دست آمده از مدل پیشنهادی که اهداف و محدودیت های سازمان در آن لحاظ گردیده است، برای خطر شناسایی شده با شماره خطر ۱ که کار در ارتفاع می باشد و مخاطره سقوط از ارتفاع را به همراه دارد، استفاده از فول بادی هارنس دارای جاذب شوک توصیه گردیده است. در خطر شماره ۲ که خطر برق گرفتگی می باشد به علت این که شدت صدمه در ارزیابی ریسک بسیار زیاد (ب ز) تشخیص

اشاره می شود. Innal و همکاران در سال ۲۰۱۴ در مقاله خود مدلی جهت تعیین عمل کرد تجهیزات ایمنی ارایه نموده است و با توجه به تأثیر کیفیت این تجهیزات در سطح ایمنی مجموعه با استفاده

از مدل سازی ریاضی به بهینه سازی این تجهیزات پرداخته است (۱۸). در سال ۲۰۱۵، Hokstad در مقاله خود عمر تجهیزات ایمنی را مورد تحلیل قرار داده و اثر استفاده از اجزای مازاد برای این تجهیزات

جدول (۵) - جواب بهینه انتخاب اقدامات اصلاحی در مطالعه موردی (عدد ۱ نشان دهنده انتخاب شدن آن اقدام اصلاحی می باشد).

شماره خطر (i)	حذف خطر	کاهش ریسک	اقدامات مهندسی	تجهیزات هشداردهنده	علایم و PPE
۱	۰	۰	۰	۰	۱
۲	۰	۰	۱	۰	۱
۳	۰	۰	۰	۰	۱
۴	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	۱
۶	۰	۱	۰	۰	۰
۷	۰	۰	۰	۰	۰
۸	۰	۰	۰	۱	۱
۹	۰	۰	۱	۰	۱
۱۰	۰	۰	۱	۰	۰
۱۱	۱	۰	۰	۰	۰
۱۲	۰	۰	۰	۰	۰
۱۳	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۰	۰	۱	۰	۰
۱۶	۰	۰	۰	۰	۰
۱۷	۰	۰	۰	۱	۱
۱۸	۰	۱	۰	۰	۰
۱۹	۰	۰	۰	۰	۱
۲۰	۰	۰	۰	۰	۱
۲۱	۰	۰	۰	۰	۱
۲۲	۰	۰	۰	۰	۰
۲۳	۰	۰	۰	۰	۰
۲۴	۰	۰	۰	۰	۱
۲۵	۰	۰	۱	۰	۱
۲۶	۰	۰	۰	۱	۱
۲۷	۰	۰	۱	۰	۱
۲۸	۰	۰	۰	۱	۱
۲۹	۰	۰	۰	۰	۱
۳۰	۰	۰	۰	۰	۱
۳۱	۰	۰	۰	۰	۰
۳۲	۰	۰	۱	۰	۰
۳۳	۰	۰	۰	۰	۰
۳۴	۰	۰	۱	۱	۱
۳۵	۰	۱	۰	۰	۱
۳۶	۰	۰	۰	۰	۰
۳۷	۰	۱	۰	۰	۰
۳۸	۰	۰	۰	۰	۱
۳۹	۰	۰	۱	۰	۰
۴۰	۰	۰	۰	۰	۱

در نظر گرفته شده است (۲۳). روش تحلیل سود-هزینه برای تعیین و انتخاب اقدامات کنترلی برای یک خطر مناسب است اما از آن جا که یک اقدام اصلاحی می تواند بر روی چندین خطر تاثیر گذار باشد، لذا استفاده از این روش محدودیت هایی برای انتخاب بهینه اقدامات اصلاحی ایجاد می نماید. در سال ۲۰۱۴، ساعدی و همکاران در مطالعه خود یک مدل برای ارزیابی ریسک نیروگاه برق آرایه نمودند که در آن برای خطرات با ریسک های بالا در نیروگاه ها اقدامات اصلاحی مناسبی را معرفی نمودند (۲۴). در مقاله آن ها تنها به معرفی اقدامات اصلاحی پرداخته شده و مدلی برای بهینه سازی و انتخاب اقدامات آرایه نشده است. Samantra و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از روش های تصمیم گیری چند شاخصه به اولویت بندی اقدامات اصلاحی پرداخته اند. آن ها ریسک را در سه بخش مالی، عملیات و نگه داری و تعمیرات مورد بررسی قرار داده اند (۲۵). در سال ۲۰۱۵، Ilankumaran و همکاران در مقاله خود برای کاهش ریسک دمای بالای کاری برای کارگران اقدامات اصلاحی مختلفی را مطرح کرده و با استفاده از روش های تصمیم گیری چند شاخصه اقدامات اصلاحی مناسب را انتخاب نمودند (۲۶). روش های تصمیم گیری چند شاخصه برای رتبه بندی اقدامات اصلاحی می تواند مناسب باشد اما برای انتخاب بهینه اقدامات اصلاحی کفایت نمی کند زیرا روابط انتخاب هم زمان اقدامات، تعریف محدودیت ها و اهداف در روش های رتبه بندی امکان پذیر نمی باشد. انتخاب اقدامات اصلاحی بر اساس روش های تصمیم گیری چند شاخصه، در صورت انتخاب یک اقدام اصلاحی از بین تعدادی اقدام اصلاحی شاید مناسب به نظر برسد اما در صورت انتخاب چندین اقدام اصلاحی

را در افزایش ایمنی کل سیستم مورد بررسی قرار داده است و مدلی ریاضی برای این امر آرایه داده است (۱۹). اجزای مازاد می تواند به عنوان یکی از اقدامات اصلاحی در مدل آرایه شده در نظر گرفته شود. در سال ۲۰۰۷، Yang با توجه به اهمیت محل ایستگاه آتش نشانی در مبارزه حریق و مقابله با شرایط اضطراری با استفاده از مدل سازی ریاضی به مکان یابی ایستگاه های آتش نشانی پرداخته است (۲۰). با توجه به این که ماتریس ریسک یکی از روش های متداول برای ارزیابی ریسک خطرات شناخته می گردد، لذا Reniers و همکاران در سال ۲۰۱۳ از ماتریس ریسک برای میزان اثر گذاری اقدامات اصلاحی استفاده نموده اند. انتخاب اقدامات اصلاحی در روش آن ها بر اساس میزان کاهش گروه ریسک خطرات می باشد (۲۱). در مقاله حاضر از ریسک ضربی برای تعیین میزان ریسک خطرات استفاده گردیده است و اختلاف عدد ریسک به عنوان میزان تاثیر گذاری اقدامات اصلاحی استفاده گردیده است. در سال ۲۰۱۵، Janssens و همکاران برای انتخاب حفاظ های ایمنی برای جلوگیری از ریسک دومینو از مدل سازی ریاضی بهره جسته اند. هدف آن ها انتخاب حفاظ مناسب برای حداکثر سازی زمان خرابی سیستم بوده است (۲۲). در این مقاله تنها به بهینه سازی و انتخاب یک نوع از اقدامات اصلاحی پرداخته در حالی که در این مقاله محدودیتی در نوع و تعداد اقدامات اصلاحی وجود ندارد. Yuan و همکاران در مطالعه ای در سال ۲۰۱۵ بعد از شناسایی ریسک انفجار در صنایع فرایندی با استفاده از شبکه بیزین، برای انتخاب اقدامات اصلاحی پیشنهادی از تحلیل سود-هزینه استفاده نموده اند. در روش آن ها بودجه سازمان به عنوان محدودیت

برای حجمی از خطرات معایبی از جمله عدم در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم و عدم امکان تعریف اهداف مختلف برای بهینه‌سازی را به همراه خواهد داشت.

نتیجه گیری

با توجه به اهمیت انتخاب اقدامات اصلاحی در مدیریت ایمنی، استفاده از روش‌های ریاضی برای انتخاب اقدامات اصلاحی در سال‌های اخیر توسعه پیدا کرده است. اکثر این مطالعات با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه از جمله روش سلسله مراتبی AHP، TOPSIS، و ELCTRE و ... برای وزن دهی یا رتبه بندی اقدامات اصلاحی استفاده شده است. تعداد بالای خطرات در محیط‌های صنعتی و اقدامات اصلاحی مختلف برای هر خطر، باعث گردیده تا فرایند انتخاب اقدامات کاهش ریسک با پیچیدگی‌های فراوانی همراه باشد، لذا استفاده از روش‌های دستی و سنتی تضمینی برای انتخاب بهترین اقدامات کاهش ریسک نمی‌باشد. در این مطالعه نشان داده شد که با استفاده از مدل سازی ریاضی برای بهینه سازی انتخاب اقدامات اصلاحی می‌توان با توجه به این که حجم انبوهی از خطرات و اقدامات اصلاحی وجود دارد با کمترین زمان به بهترین انتخاب برسیم.

روش ارایه شده با در نظر گرفتن تمامی اقدامات اصلاحی و با توجه به محدودیت‌های سیستم، انتخاب بهینه را به صورتی انجام می‌دهد که دست یابی به اهداف موردنظر مدیران ارشد سازمان حداکثر گردد. ارزیابی عوامل مختلف مؤثر در انتخاب مانند هزینه و اثر اقدام در کاهش ریسک سبب انتخاب بهینه اقدامات اصلاحی شد. با توجه به بزرگی حجم مساله با استفاده از الگوریتم ژنتیک جواب بهینه در زمانی قابل قبول به دست آمد. مدل سازی ریاضی مساله انتخاب اقدامات اصلاحی، باعث می‌گردد تا فرایند انتخاب با دقت بالایی انجام گردد و این امر در زمانی که تعداد خطرات زیاد باشد به کمک مدیران آمده تا انتخاب اقدامات کاهش ریسک را با دقت بالایی انجام دهند.

روش ارایه شده قابلیت استفاده در صنایع مختلف را داشته و خاص یک صنعت نمی‌باشد. با استفاده از مدل سازی ریاضی اهداف مختلفی را می‌توان با توجه به نیاز سازمان در نظر گرفت که هدف در نظر گرفته شده در این مطالعه بیشترین میزان کاهش ریسک می‌باشد. با توجه به این که در این روش امکان تغییر در اهداف و محدودیت‌ها نیز با توجه به نیازهای واحدهای صنعتی و اهداف مدیران ارشد وجود دارد، لذا تحقیق در انواع محیط‌ها با توجه به اهداف و نیازهای سازمان قابل اجراء می‌باشد.

REFERENCES

- Mullai A. Risk management system-risk assessment frameworks and techniques: DaGoB (Safe and Reliable Transport Chains of Dangerous Goods in the Baltic Sea Region) Project Office, Turku School of Economics, Turku, Finland; 2006.
- Brauer RL, Mohammadfam (Trans.) I, Mirzaei Aliabadi (Trans.) M. Safety and health for engineers: Fanavaran publisher, Iran, Tehran; 2014. [Persian]
- Bueno S, Salmeron JL. Fuzzy modeling enterprise resource planning tool selection. Computer Standards & Interfaces. 2008;30(3):137-47.
- Habibi E, Alizadeh M. Industrial Safety. Fanavaran publisher, Iran, Tehran; 2011. [Persian]
- Fine WT. Mathematical evaluations for controlling hazards. NAVAL ORDNANCE LAB WHITE OAK

- MD, 1971.
6. Mohammadfam I, Moghimbeigi A. Evaluation of injuries among a manufacturing industry staff in Iran. *Journal of research in health sciences*. 2009;9(1):7-12.
 7. Shirali GA, Motamedzade M, Mohammadfam I, Ebrahimipour V, Moghimbeigi A. Assessment of resilience engineering factors based on system properties in a process industry. *Cognition, Technology & Work*. 2016;18(1):19-31.
 8. Modarres M, Kaminskiy MP, Krivtsov V. *Reliability engineering and risk analysis: a practical guide*: CRC press; 2016.
 9. Main BW. Risk assessment. *Professional Safety*. 2004;49(12):37.
 10. Samani BA, Shahbodaghlou F. A fuzzy systematic approach to construction risk analysis. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*. 2012;2(4):275-84.
 11. Manuele FA, editor *Risk Assessments and Hierarchies of Control [Emphasizing Z10 Requirements]*. ASSE Professional Development Conference and Exposition; 2006: American Society of Safety Engineers.
 12. DoD U. MIL-STD-882E, Department of Defense Standard Practice System Safety. US Department of Defense. 2012.
 13. ISO B. 17776,(2000). Petroleum and natural gas industries—offshore production installations—guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment. 2000:1-45.
 14. Association AIH. ANSI/AIHA Z10–2005, American National Standard—Occupational Health and Safety Management Systems. Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association; 2012.
 15. Sivanandam S, Deepa S. *Introduction to genetic algorithms*: Springer Science & Business Media; 2007.
 16. Haupt RL, Haupt SE. *Practical genetic algorithms*: John Wiley & Sons; 2004.
 17. Grassi A, Gamberini R, Mora C, Rimini B. A fuzzy multi-attribute model for risk evaluation in workplaces. *Safety Science*. 2009;47(5):707-16.
 18. Innal F, Dutuit Y, Chebila M. Safety and operational integrity evaluation and design optimization of safety instrumented systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015;134:32-50.
 19. Hokstad P. Demand rate and risk reduction for safety instrumented systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014;127:12-20.
 20. Yang L, Jones BF, Yang S-H. A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*. 2007;181(2):903-15.
 21. Reniers GLL, Sørensen K. An Approach for Optimal Allocation of Safety Resources: Using the Knapsack Problem to Take Aggregated Cost-Efficient Preventive Measures. *Risk Analysis*. 2013;33(11):2056-67. doi: 10.1111/risa.12036.
 22. Janssens J, Talarico L, Reniers G, Sørensen K. A decision model to allocate protective safety barriers and mitigate domino effects. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015;143:44-52. doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.05.022>.
 23. Yuan Z, Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Risk-based optimal safety measure allocation for dust explosions. *Safety science*. 2015;74:79-92.
 24. Saedi A, Thambirajah J, Pariatamby A. A HIRARC model for safety and risk evaluation at a hydroelectric power generation plant. *Safety science*. 2014;70:308-15.
 25. Samantra C, Datta S, Mahapatra SS. A risk-based decision support framework for selection of appropriate safety measure system for underground coal mines. *International journal of injury control and safety promotion*. 2017;24(1):54-68.
 26. Ilankumaran M, Karthikeyan M, Ramachandran T, Boopathiraja M, Kirubakaran B. Risk analysis and warning rate of hot environment for foundry industry using hybrid MCDM technique. *Safety science*. 2015;72:133-43.

Corrective actions selection in the safety risk management process using mathematical modeling

Morteza Cheraghi^{1,}, Babak Omidvar², Ali Akbar Eslami-Baladeh³, Hamid Reza Jafari⁴, Ali Mohammad Younesi⁵*

¹ M.Sc., Department of Health, Safety and Environment (HSE), Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

³ M.Sc., Department of Industrial Engineering and Management System, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

⁴ Professor, Department of Environmental Engineering, Graduate Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

⁵ M.Sc., Department of Chemical Engineering, Energy Institution of Higher Education, Saveh, Iran

Abstract

Introduction: Risk assessment is a main tool in safety management process as it can help managers to choose corrective actions by providing appropriate information. The purpose of this paper was to select the optimal corrective actions among the proposed ones by the experts based on mathematical modeling, taking into account the standards and also the limitations including the cost.

Material and Method: In this paper, a model was presented to find the optimal corrective actions regarding the organization goals (maximum in risk reduction value) and the limitations such as cost and level of acceptable risk. Due to extensive number of solutions, Genetic Algorithm (GA) is used for solving the problem.

Result: To show the capability of this method in an industrial environment, a power generation industry with 40 hazards was considered as the case study. Then, the risk of hazards was estimated and corrective actions were determined for each of them. Using the proposed model, corrective actions were selected optimally, with the least possible cost; all risks were reduced below the level of organizational acceptable risk.

Conclusion: It was shown that the optimal corrective actions using mathematical modeling are selected with high precision in acceptable time. This method is suggested as an alternative for conventional qualitative methods based on expert's opinions.

Key words: *Corrective Action, Mathematical Modeling, Risk, Safety*

* Corresponding Author Email: cheraqi@ut.ac.ir