Emergency Management, Vol. 15, No. 1, pp: 62-93

Determining the Optimal Point of Safety Investments in Process Industry Using Fuzzy Numbers Based on Risk Assessment and Cost-Benefit Analysis

Bakhtiar Ostadi [*1], **Seyyed Mohsen Mousavi-Khoshdel** [2]

1. Prof., Dept. of Systems and Productivity Management, Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) bostadi@modares.ac.ir
2. Former Graduated Student, Dept. of Systems and Productivity Management, Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1405.15.1.4.9

Original Paper

Appropriate investment in safety controls to prevent future accident costs is a beneficial strategy. This paper presents a mechanism to achieve the optimal level of safety investment considering budget constraints. First, risk assessment was conducted using the FMEA method, and then the data related to the probability of occurrence and detection of risks were converted into fuzzy numbers. With the help of an expert team, the costs of accidents, the costs of proposed controls, the impact of each control on risk reduction, and the company's degree of fault in each incident were estimated. Using nonlinear programming with zero-one variables, the problem was modeled, and after executing the model, the available budget was optimally allocated to the proposed controls. By implementing the model in an oil refining company without budget constraints, it was found that increasing investment up to a certain level reduces the company's total costs, but beyond that point, further investment does not significantly reduce the total costs.

Keywords:
Safety Investment Optimization, Risk Assessment, Risk Priority Number, Safety Controls, Fuzzy Triangular Numbers, Cost and Benefit Studies.

Received: Dec. 09, 2025
Revised: Feb. 18, 2026
Accepted: Apr. 11, 2026

To cite this article:
Ostadi, B., Mousavi-Khoshdel, S. M., 2026. Determining the optimal point of safety investments in process industry using fuzzy numbers based on risk assessment and cost-benefit analysis. *Emergency Management*, 15(1), 62-93.
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1405.15.1.4.9

Use your device to scan and read the article online

© The Author(s).
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

مدیریت بحران، دوره ۱۵، شماره ۱، صفحه: ۹۳-۶۲

به دست آوردن نقطه بهینه سرمایه‌گذاری‌های ایمنی در شرکت‌ها با استفاده از اعداد فازی مبتنی بر ارزیابی ریسک و مطالعات هزینه و فایده

بختیار استادی [*۱]، سید محسن موسوی خوشدل [۳]

۱ استاد، گروه مدیریت سیستم و بهره‌وری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) bostadi@modares.ac.ir
۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مدیریت سیستم و بهره‌وری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مقاله پژوهشی
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1405.15.1.4.9

چکیده

سرمایه‌گذاری مناسب در کنترل‌های ایمنی برای جلوگیری از هزینه‌های حوادث آینده یک راهبرد سودمند است. در این مقاله، مکانیسمی به‌منظور دستیابی به نقطه بهینه میزان سرمایه‌گذاری ایمنی با در نظر گرفتن بودجه ارائه‌شده است. لذا ابتدا ارزیابی ریسک به روش FMEA انجام، سپس داده‌های احتمال وقوع و احتمال کشف تبدیل به اعداد فازی شده است. به کمک تیم خبره هزینه حوادث، هزینه و کنترل‌های پیشنهادی برای هر ریسک تعیین و میزان تأثیرات هر کنترل بر کاهش ریسک و میزان قصور شرکت در هر حادثه تخمین زده‌شده است. با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی با متغیرهای صفر و یک مسئله مدل‌سازی و پس از اجرای مدل، بودجه در دسترس به کنترل‌های پیشنهادی به‌صورت بهینه تخصیص‌یافته است. با اجرای مدل در یک شرکت پالایش نفت بدون محدودیت بودجه مشخص شد که افزایش سرمایه‌گذاری تا مقدار مشخصی باعث کاهش هزینه کل شرکت خواهد شد و پس‌ازآن افزایش سرمایه‌گذاری باعث کاهش هزینه کل به میزان قابل‌انتظار نخواهد شد.

واژه‌های کلیدی:
بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری ایمنی، ارزیابی ریسک، عدد اولویت ریسک، کنترل‌های ایمنی، اعداد مثلثی فازی، مطالعات هزینه و فایده

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸
اصلاح: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
استادی، ب.، موسوی خوشدل، س. م.، ۱۴۰۵، به دست آوردن نقطه بهینه سرمایه‌گذاری‌های ایمنی در شرکت‌ها با استفاده از اعداد فازی مبتنی بر ارزیابی ریسک و مطالعات هزینه و فایده، *مدیریت بحران*، ۱۵(۱)، ۹۳-۶۲
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1405.15.1.4.9

© The Author(s).
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه (بیان مسئله و پیشینه پژوهش)

بروز حادثه یک مسئله قابل‌ملاحظه اقتصادی در سطح ملی، سازمانی و فردی است. به همین دلیل مسائل ایمنی و بهداشت امروزه از مسائلی است که اکثر صاحبان صنایع که در تفکر تولیدی قابل‌رقابت با بازارهای جهانی می‌باشند به آن توجه دارند. رعایت مسائل ایمنی می‌تواند تأثیر مستقیمی را بر پیکره تولید گذاشته و با افزایش بهره‌وری سیستم سبب کاهش قیمت تمام‌شده تولید شود [۱].

تجزیه‌وتحلیل اثرات و حالات شکست (FMEA[1]) به‌عنوان یکی از مفیدترین ابزارهای ارزیابی ریسک برای کاهش پتانسیل شکست در سیستم، فرآیندها، طرح‌ها و خدمات شناخته می‌شود و در گستره وسیعی از صنایع مورداستفاده قرارگرفته است. همچنین از FMEA می‌توان به‌منظور شناخت و انتخاب خطرات با ریسک بالا استفاده کرد.

هدف از این تحقیق ارائه یک متدولوژی ارزیابی ریسک با در نظر گرفتن نقاط ضعف FMEA و تلاش در راستای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سیستم و عدم وابستگی نتایج ارزیابی ریسک به نظرات تیم و یا افراد انجام دهنده ارزیابی ریسک است. همچنین در این مطالعه با استفاده از مزایای منطق و اعداد فازی و همچنین با کمک گرفتن از خبرگان نقطه بهینه‌ای برای سرمایه‌گذاری‌های ایمنی حاصل خواهد شد و تخصیص بهینه‌ای از بودجه صورت خواهد پذیرفت.

این تحقیق به‌صورت پایلوت در یکی از فرایندهای تعمیرات اساسی در یکی از شرکت‌های بهره‌برداری نفت و گاز در ایران اجرا و نتایج آن در این مقاله ارائه‌شده است.

ازآنجاکه همواره پیشگیری به‌مراتب بهتر از درمان است، شناسایی و اولویت‌بندی نقاط ضعف سیستم ایمنی واحدهای تولیدی و صنعتی و برنامه‌ریزی و انجام سرمایه‌گذاری‌های لازم در راستای رفع این نقاط ضعف و پیشگیری از وقوع حوادث از پیشنهادهای مطالعات انجام‌گرفته در بخش هزینه است.

سرمایه‌گذاری ایمنی شاخه‌ای مهم در زمینه پیشگیری از حوادث بوده است. یک فرض عمومی وجود دارد که افزایش سرمایه‌گذاری در ایمنی منجر به بهبود عملکرد ایمنی می‌شود که می‌تواند با شاخص‌هایی مانند نرخ تکرار حادثه و میزان شدت حوادث نشان داده شود. لوپز-آلونسو و دیگران پیشنهاد می‌کند که بین میانگین تعداد حوادث و هزینه پیشگیری از حوادث که به‌عنوان سرمایه‌گذاری ایمنی نیز شناخته می‌شود رابطه معکوس وجود دارد[۲]. اگرچه بعضی محققان دریافتند که همبستگی مثبت بین سرمایه‌گذاری ایمنی و عملکرد ایمنی ضعیف است که نشان می‌دهد اینکه آیا افزایش سرمایه‌گذاری ایمنی می‌تواند منجر به بهبود عملکرد ایمنی شود قابل‌بحث است (تئو و فنگ، ۲۰۱۰). تأییدشده است که بخشی از تأثیر سرمایه‌گذاری ایمنی بر عملکرد ایمنی توسط فرهنگ ایمنی متمرکزشده است و فرهنگ ایمنی با سرمایه‌گذاری ایمنی رابطه مثبت دارد [۳]. بر اساس این تحقیق، ما هنوز می‌توانیم فرض کنیم که افزایش سرمایه‌گذاری ایمنی باعث بهبود عملکرد ایمنی می‌شود.

سرمایه‌گذاری ایمنی می‌تواند به بهبود عملکرد ایمنی کمک کند، اما این به این معنی نیست که برای شرکت‌ها با سطوح بالاتر سرمایه‌گذاری ایمنی بهتر است. این به این دلیل است که سرمایه‌گذاری‌های ایمنی معمولاً تأثیر قابل‌توجهی بر کل هزینه‌های شرکت‌هایی که قصد افزایش سود را دارند می‌گذارد؛ بنابراین، رویکردهای

[1] Failure Mode & Effect Analysis

تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری بهینه ایمنی برای کاهش تکرار حوادث و کنترل هزینه‌های کل برای شرکت مهم است. تجزیه‌وتحلیل هزینه-سود که به‌طور گسترده‌ای برای تجزیه‌وتحلیل تصمیمات سرمایه‌گذاری ایمنی استفاده می‌شود، نشان‌دهنده نقطه‌ای است که سرمایه‌گذاری اضافی باعث کاهش بازده می‌شود و بازده سرمایه‌گذاری منفی می‌شود [۴].

به‌طور خاص، در تلاش برای بهینه‌سازی هزینه‌های ایمنی در ساخت‌وساز، تانگ و همکاران [۵]اطلاعات مربوط به سرمایه‌گذاری‌های ایمنی از پروژه‌های ساختمانی در هنگ‌کنگ را جمع‌آوری کرد و دریافت که سرمایه‌گذاری‌های ایمنی به سه بخش عمده تقسیم‌شده است: تجهیزات ایمنی، پرسنل مدیریت ایمنی، آموزش و ارتقاء ایمنی. سرمایه‌گذاری در تجهیزات ایمنی شامل هزینه‌های تجهیزات حفاظت شخصی و سایر تجهیزات است که به ارائه ایمنی در سایت‌های ساخت‌وساز کمک می‌کند. سرمایه‌گذاری در کارکنان مدیریت ایمنی شامل هزینه‌های استخدام نیروهای ایمنی مانند افسران ایمنی، سرپرست‌های ایمنی، یا افراد ایمنی و ... است. هزینه‌های آموزش ایمنی و ارتقاء شامل فعالیت‌هایی است که مسئولیت کارکنان و درگیر شدن در ایمنی را افزایش می‌دهد [۵].

در مطالعه دیگری به بررسی میزان ارتباط بین سرمایه‌گذاری ایمنی و عملکرد ایمنی در پروژه‌های ساختمانی در هنگ‌کنگ پرداخته‌شده است. بدین منظور سه نوع سرمایه‌گذاری ایمنی بررسی‌شده است: (۱) اجرای سیستم مدیریت نوآوری مبتنی بر فن‌آوری‌های نوآورانه؛ (۲) استخدام سرپرست ایمنی برای انجام بازرسی؛ و (۳) تشویق به مسئولیت ایمنی دیگر همکاران. همچنین، برای اندازه‌گیری عملکرد ایمنی از شاخص‌های پرو اکتیو و شاخص‌های پسیو استفاده‌شده است که به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر از اثربخشی سرمایه‌گذاری ایمنی است. شاخص‌های عملکرد مورداستفاده عبارت‌اند از آگاهی ایمنی، سوابق ایمنی، هزینه‌ایمنی، هزینه اتلاف هزینه و نمره ایمنی و بهره‌وری [۶].

در این زمینه، محققان نتایج غیرمنتظره‌ای در مورد رابطه علی بین سرمایه‌گذاری ایمنی و عملکرد ایمنی پیدا کردند که لزوماً میزان عملکرد ایمنی به نسبت سرمایه‌گذاری ایمنی بهبود نمی‌یابد یکی از یافته‌های اصلی این مطالعه‌این است که مسئولیت ایمنی سایر همکاران و پیاده‌سازی ابزارهای نوآورانه در مقایسه با بازرسی‌های سرپرستان برای ارتقای ایمنی ساختمانی، مقرون به‌صرفه‌تر است. یافته‌های دیگر این است که سرمایه‌گذاری‌های مختلف ایمنی می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر بهره‌وری ایمنی ساختمانی داشته باشد.

در مقاله‌ای با عنوان ارزشیابی ریسک به روش FMEA با استفاده از روش VIKOR در محیط فازی بیان شد؛ RPN حاصل از FMEA سنتی دارای نواقص و نارسایی‌های زیادی است. در این مطالعه متغیرهای زبانی در قالب اعداد ذوزنقه‌ای یا مثلثی فازی برای ارزیابی و اندازه‌گیری وزن ریسک فاکتورها (احتمال وقوع، شدت پیامد و احتمال کشف) مورداستفاده قرارگرفته است. برای انتخاب جدی‌ترین حالات شکست از روش VIKOR برای تعیین اولویت‌های ریسک ناشی از حالات شکست شناسایی‌شده استفاده می‌شود[۷].

جمشیدی و برادران در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۰ در مقاله تحت عنوان «مدل FMEA فازی بر مبنای هزینه» در مورد نواقص FMEA سنتی تحقیق کردند و متدولوژی جدیدی بر مبنای FMEA فازی هزینه‌ای و ارزش تجهیزات معرفی نمودند. در این متد RPN جدید فازی معرفی‌شده است و در آن برای مقایسه کارشناسی زوجی سه فاکتور احتمال وقوع، شدت پیامد و احتمال کشف AHP برای فازی کردن بکار رفته است [۸].

استفاده از رویکرد مبتنی بر ریسک در بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری ایمنی و به‌ویژه در صنعت فرآیند در تحقیقات اخیر موردتوجه بوده است[۹]. در تحقیقاتی مشابه و در حوزه بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری ایمنی، مدلی یکپارچه از آنها برای شرکت‌های شبکه برق مبتنی بر دینامیک سیستم و نظریه شبکه بیزی ارائه‌شده است[۱۰].

در تحقیقی دیگر نیز، یک مدل بهینه‌سازی مقرون‌به‌صرفه تخصیص سرمایه‌گذاری ایمنی برای کاهش ریسک اثرات دومینو ارائه شد. در این کار، یک مدل بهینه‌سازی کاهش ریسک مقرون‌به‌صرفه برای تخصیص عینی سرمایه‌گذاری ایمنی در مورد اثرات دومینو با توجه به ریسک و هزینه اقتصادی پیشنهادشده است. متفاوت از ارزیابی های قبلی عملکرد موانع ایمنی، مستقیماً ریسک به هزینه اقتصادی از طریق توابع ریاضی مرتبط شده تا اثربخشی اقتصادی و ریسک اثر دومینو را تحت عدم اطمینان کمتر مبادله کند. [۱۱].

با توجه به مباحث مطرح‌شده در ادبیات تحقیق که به بررسی عمیق موضوعات اصلی پرداخته شد. پس از شناسایی روش‌های ارزیابی ریسک و شناسایی انواع کنترل‌ها و روش کاهش آنها سازمان‌ها در پی انجام روش‌های کاهش و یا حذف ریسک برمی‌آیند اما یک مسئله بسیار مهم که معمولاً در سازمان‌ها باعث ایجاد تنش‌های سازمانی و در تقابل قرار گرفتن اهداف سازمان از قبیل کاهش هزینه از یک‌سو و کاهش حوادث از سوی دیگر می‌شود جلب‌توجه خواهد کرد. در بخش بعد متدولوژی پیشنهادی موردبررسی قرار خواهد گرفت که با کمک آن تا حدودی نقطه بهینه میزان سرمایه‌گذاری بر روی ایمنی مشخص خواهد شد. همچنین تخصیص بهینه بودجه به کنترل‌های ایمنی در قدم بعدی مشخص‌شده است.

۲- روش تحقیق و ابزارها

در روش پیشنهادی گام‌های شکل ۱ به ترتیب انجام خواهد شد:

گام اول: تیم خبره متشکل از ۵ تا ۹ نفر از کارشناسان رشته‌های مختلف سیستم‌های مدیریتی تشکیل می‌شود و برحسب ۳ معیار تحصیلات، تجربه، سمت سازمانی با روش تنظیم وزن [۱۶] مشابه FMEA وزنی، حالات خطا، علل و اثران آن [۱۷] وزن‌دهی و اولویت‌بندی می‌شوند.

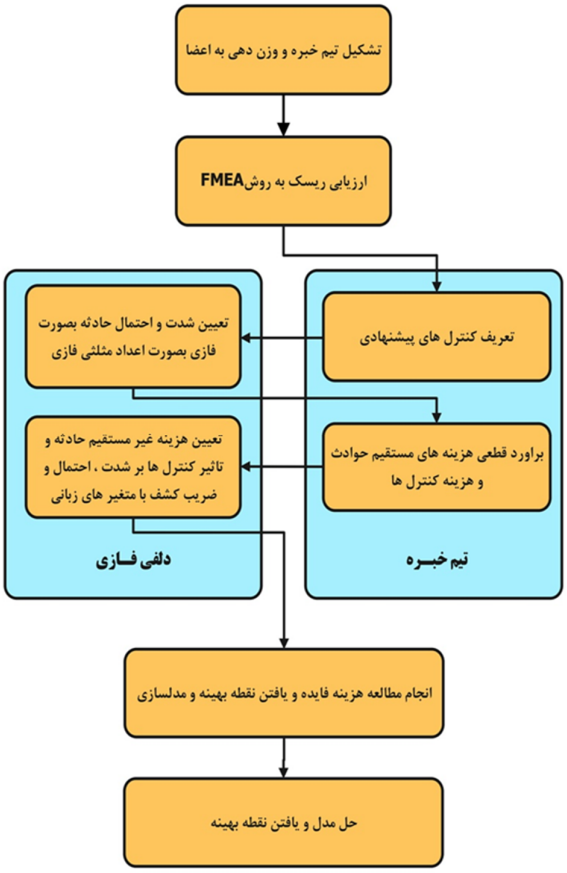
گام دوم: برای انجام ارزیابی ریسک‌های ایمنی از روش FMEA استفاده می‌شود و مطابق با الزامات آن از متخصصان رشته‌های مختلف مسلط بر فعالیت مورداشاره انجام می‌پذیرد. در این گام حداقل کنترل‌های موجود در فعالیت برای هر ریسک شناسایی می‌شود.

گام سوم: کنترل‌های پیشنهادی هر ریسک توسط افراد خبره پیشنهاد می‌شود.

گام چهارم: از روش دلفی فازی به‌منظور امتیازدهی به‌احتمال وقوع و شدت اثر حادثه استفاده می‌شود به‌این‌ترتیب که تیم خبره احتمال وقوع و شدت اثر حادثه هر ریسک را با استفاده از عددی مثلثی فازی بیان می‌کند. سپس میانگین موزون (با وزن تخصیص‌یافته در گام دوم) اعداد اختصاص‌یافته به‌شدت اثر حادثه و احتمال وقوع را محاسبه و اختلاف هر فرد با میانگین به وی اعلام‌شده و مجدداً اعداد توسط تیم خبره اصلاح می‌شود.

گام پنجم: هزینه مستقیم حوادث در صورت وقوع، همچنین هزینه کنترل‌های پیشنهادی و جاری توسط تیم خبره تخمین زده می‌شود.

گام ششم: متغیرهای زبانی بکار گرفته می‌شود تا تخمینی از هزینه‌های غیرمستقیم حادثه، میزان تأثیر هر کنترل بر شدت اثر، احتمال وقوع، احتمال کشف و قصور شرکت به دست آید.



شکل ۱: مراحل اجرایی روش پیشنهادی

گام هفتم: مسئله به‌وسیله یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی با متغیرهای صفر و یک با هدف کاهش هزینه هر ریسک و کاهش عدد اولویت ریسک با محدودیت بودجه مدل‌سازی می‌شود.

گام هشتم: مسئله مدل‌سازی شده توسط نرم‌افزار حل و نقطه بهینه مطلوب به دست می‌آید.

۲-۱- ارزیابی ریسک به روش FMEA

مراحل اجرایی FMEA که با نظر تیم FMEA قابل‌اجرا است، شامل مراحل زیر است:

مرحله ۱: بازبینی فرآیند

مرحله ۲: برگزاری جلسات طوفان فکر به‌منظور شناسایی خطر

مرحله ۳: لیست کردن پیامدهای بالقوه هر خطر

مرحله ۴: اختصاص دادن یک رتبه شدت پیامد برای هر خطر[1]

مرحله ۵: اختصاص دادن یک رتبه احتمال وقوع برای هر خطر[2]

مرحله ۶: اختصاص یک رتبه احتمال کشف برای هر خطر[3]

مرحله ۷: محاسبه عدد اولویت ریسک[4]

در مرحله نهایی عدد اولویت ریسک طبق

[1] Severity
[2] Occurrence
[3] Detection
[4] Risk Priority Number

رابطه ۱ محاسبه می‌شود

$$RPN = S \times O \times D \qquad (۱)$$

۲-۲- تشکیل تیم خبره و وزن‌دهی به اعضا

در این گام افرادی با تخصص‌های مختلف و علاقه‌مند به موضوع جمع‌آوری می‌شود تعداد اعضای تیم بین ۵ تا ۹ نفر است. ازآنجایی‌که همه افراد تیم در یک رده شغلی نیستند و همچنین تجربیات و دیدگاه‌های یکسانی ندارند لذا نظرات آنها نیز از اعتبار یکسانی برخوردار نیست؛ بنابراین بهتر است که برای هر عضو گروه یک ضریب وزنی در نظر گرفته شود تا بدین‌وسیله بتوان نتایج بهتری از این جلسات گرفت. برای اینکه بتوان ضرایب وزنی هر عضو را تعیین کرد نیاز است که افراد گروه توسط یک یا چند معیار با یکدیگر مقایسه شوند.

در اینجا اعضای تیم توسط سه معیار جدول ۱ امتیازدهی می‌شوند. سپس امتیاز هر عضو از طریق میانگین‌گیری از این سه معیار محاسبه می‌شود.

امتیاز وزنی عضو i ام = ۳/(امتیاز سمت سازمانی + امتیاز سابقه کاری + امتیاز تحصیلات) (۲)

بنابراین، فاکتور وزنی عضو i ام از رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

فاکتور وزنی عضو i ام = امتیاز وزنی عضو i ام تقسیم‌بر مجموع امتیازات اعضا (۳)

۲-۳- تعریف کنترل‌های پیشنهادی

در این گام کنترل‌هایی برای کاهش ریسک فرایند می‌بایست پیشنهاد شود.

در این گام با استفاده از طوفان فکری[1] از تیم خبره خواسته می‌شود تا کلیه اقدامات کنترلی که قابل انجام بوده و به ایمن‌تر شدن فرایند کمک می‌کند ثبت و موردبحث قرار گیرد.

۲-۴- تعیین شدت و احتمال وقوع حادثه به کمک اعداد مثلثی فازی

استفاده از تئوری فازی به دلیل وجود عدم قطعیت در مفهوم مدیریت ریسک به‌طور گسترده به کار گرفته‌شده است. با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی، داده‌ها می‌توانند به شکل مبهم و عبارات زمانی مانند احتمال کم، اثر شدید یا ریسک بالا تعریف شوند. این عبارات را نمی‌توان به شکل معناداری با یک عدد نشان داد اما تئوری فازی ابزاری را فراهم می‌کند که می‌توان این عبارت‌ها را با منطق ریاضی تعریف کرد [۱۲].

۲-۴-۱- اعداد فازی

تئوری مجموعه‌های فازی را پروفسور لطفی زاده مطرح کرد. این تئوری در شرایط ابهام و عدم اطمینان کاربرد دارد. این نظریه قادر است بسیاری از مفاهیم و عبارات نادقیق را با زبان ریاضی بیان کند و زمینه را برای استدلال، استنتاج، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد [۱۳].

انواع مختلفی از توابع عضویت فازی وجود دارد که می‌توان به توابع عضویت مثلثی، ذوزنقه‌ای، زنگوله‌ای و گاوسین اشاره کرد [۱۴].

در این مطالعه به‌منظور تسهیل در محاسبات فازی و همچنین با توجه به اینکه افراد تیم خبره لزوماً به تئوری فازی آشنا نیستند از ساده‌ترین این اعداد یعنی اعداد مثلثی استفاده‌شده است.

اعداد فازی مثلثی به‌عنوان یکی از کاربردی‌ترین اعداد فازی، عددی است که به‌صورت A=(a, α, β) نشان داده می‌شود. α نما، α فاصله تا کران پایین و فاصله تا کران بالا است. اعداد فازی مثلثی به‌صورت a=(a1, a2, a3) هم نشان داده می‌شود.

شکل ریاضی تابع عضویت عدد فازی مثلثی:

[1] Brain storming

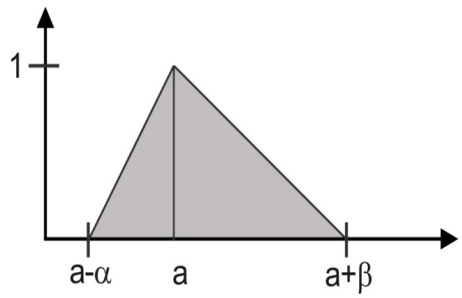
جدول ۱: معیارهای امتیازدهی به اعضای تیم

معیارها	گروه‌ها	امتیازات	معیارها	گروه‌ها	امتیازات
سمت سازمانی	رئیس اداره	۵	سطح تحصیلات	دکترا	۵
	مسئول/ناظر	۴		کارشناسی ارشد	۴
	مهندس/بازرس	۳		کارشناسی	۳
	تکنیسین/افسر	۲		کاردانی	۲
	کارگر/ آتش‌نشان	۱		دیپلم و پایین‌تر	۱
سابقه خدمت	بیش از ۳۰	۵			
	۲۰-۳۰	۴			
	۱۰-۲۰	۳			
	۵-۱۰	۲			
	۱-۵	۱			

(۴)

$$A=\begin{cases}1-(a-t)/\alpha & a-\alpha\le t\le a\\ 1-(t-a)/\beta & a\le t\le a+\beta\\ 0 & otherwise\end{cases}$$

تابع عضویت به‌صورت خط شکل ۲ است که از سمت چپ در حال صعود کردن است تا به a برسیم و از سمت راست در حال نزول است تا به محور x ها برسیم.



شکل ۲: اعداد فازی مثلثی

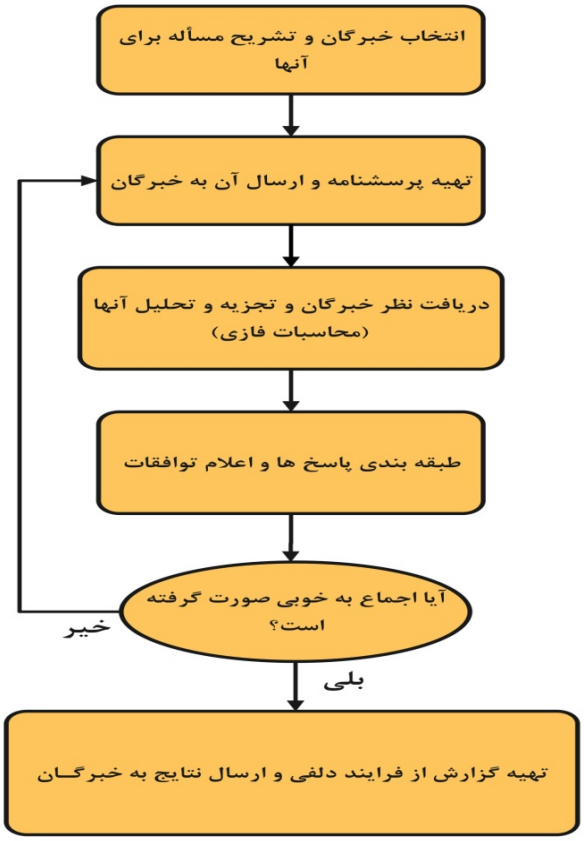
در این مطالعه با توضیح اعداد فازی به خبرگان از آنها خواسته می‌شود برای شدت حادثه و احتمال وقوع حوادث از اعداد فازی مثلثی استفاده کنند. بدین‌صورت که مطابق با «فصل ششم کتاب علم مدیریت فازی دکتر عادل آذر» به‌طور مثال در صورت سقوط یک فرد از ارتفاع متناسب با ارتفاع سقوط می‌تواند از کمترین آسیب یعنی شکستگی استخوان (۶) تا مرگ (۱۰) با حالت محتمل نقص عضو (۸) پیش‌بینی کرد؛ یعنی عدد فازی (۶، ۸ و ۱۰) به این مورد توسط یکی از خبرگان اختصاص می‌یابد.

همچنین برای احتمال وقوع یک حادثه نیز یک عدد فازی مشابه شدت حادثه در نظر گرفته می‌شود.

۲-۴-۲- روش دلفی فازی

برای تعیین میزان اهمیت شاخص‌ها و غربال مهم‌ترین شاخص‌های شناسایی‌شده در یک پژوهش علمی، می‌توان از تکنیک دلفی با رویکرد فازی استفاده کرد.

روش دلفی فازی در سال ۱۹۹۳ توسط ایشیکاوا و همکارانش پیشنهاد شد. درواقع روش دلفی فازی از ترکیب روش دلفی سنتی و نظریه مجموعه فازی حاصل شد. نوردرهابن (۱۹۹۵) دریافت که استفاده از روش دلفی فازی برای



شکل ۳: الگوریتم دلفی فازی [۱۵]

تصمیمات گروهی می‌تواند منجر به درک مشترک از نظرات کارشناسان و خبرگان شود. الگوریتم اجرای دلفی فازی به شرح شکل ۳ است [۱۵].

در تحقیق حاضر به‌منظور محاسبات دلفی فازی از روش میانگین فازی استفاده می‌شود و همچنین از دو یا چند تکرار به دلیل اینکه به‌نوعی قصد پیش‌بینی با این روش را داریم استفاده می‌شود؛ یعنی ابتدا تیم خبره مشخص می‌شود سپس با اعداد مثلثی و موضوع ارزیابی آشنا شده و از ایشان درخواست می‌شود به هرکدام از شدت و احتمال هر ریسک شناسایی‌شده عددی فازی نسبت دهند سپس میانگین فازی این اعداد محاسبه و فاصله هر فرد خبره از میانگین به اطلاع او رسانده می‌شود سپس برای مرتبه دوم از ایشان اعداد فازی مثلثی برای شدت و احتمال اخذشده و ملاک عمل قرار خواهد گرفت.

۲-۵- برآورد قطعی هزینه‌های مستقیم حوادث و هزینه کنترل‌ها

هزینه‌های اقتصادی ناشی از حوادث می‌توانند هزینه‌های مستقیم (از قبیل صدمه به مواد، هزینه‌های بیمه‌ای و درمانی) و یا غیرمستقیم (پنهان) (از قبیل اختلال در کار و فعالیت، بازآموزی کارگران جایگزین، کاهش کیفیت و بهره‌وری محصول) باشند. برخی از مؤلفان هزینه‌های غیرمستقیم را چندین برابر هزینه‌های مستقیم برآورد کرده‌اند. حوادث شغلی تأثیر مهمی بر جوامع انسانی دارند و هزینه‌های بالایی را بر سیستم اجتماعی یک کشور وارد می‌نمایند و منجر به غیبت از کار و بهره‌وری پایین می‌شوند.

خسارت‌های بالقوه مالی و جانی یک جزء مهم و اثرگذار در تصمیم‌گیری در مسائل ایمنی است. [18] سرمایه‌گذاری در این امر مهم می‌تواند با کاهش ریسک‌های بالقوه اقتصادی ناشی از سرمایه‌گذاری مقایسه شود. به‌عبارت‌دیگر، ارزش‌گذاری اقتصادی به تصمیم‌گیری در سطوح مختلف کمک نموده و سبب می‌شود تا توجیه اقتصادی برنامه‌ها، سیاست‌ها و همچنین سرمایه‌گذاری‌های مربوط به بهداشت و ایمنی شغلی، بخویی تبیین شود؛ چراکه داشتن درکی صریح و روشن از هزینه‌های حوادث ناشی از کار، سبب افزایش انگیزه‌ها برای ارتقای ایمنی توسط مدیران پروژه‌ها می‌شود.

۲-۶- استفاده از متغیرهای زبانی[1] در تعیین هزینه‌های غیرقابل‌اندازه‌گیری حادثه، کاهش شدت، احتمال و قصور توسط اجرای کنترل

در این گام برخی اعداد فازی مشخص می‌شوند. هزینه‌های غیرقابل‌اندازه‌گیری حادثه، همچنین تأثیر اجرای هر کنترل بر کاهش شدت، بر کاهش احتمال وقوع و همچنین قصور شرکت در صورت بروز حادثه در این گام مشخص می‌شوند.

۲-۶-۱- متغیرهای زبانی

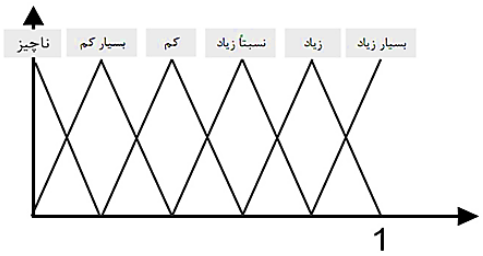
متغیرهای زبانی به متغیرهایی گفته می‌شود که مقادیر موردقبول برای آنها به‌جای اعداد، زبان قابل‌فهم انسانی و یا ماشینی می‌باشند.

همان‌گونه که در محاسبات ریاضی از متغیرهای عددی استفاده می‌شود، در منطق فازی نیز از متغیرهای زبانی (گفتاری یا غیر عددی) استفاده می‌شود. متغیرهای زبانی بر اساس ارزش‌های زبانی (گفتاری) که در مجموعه عبارت (کلمات/اصطلاحات) قرار دارند بیان می‌شود. عبارت زبانی صفاتی برای متغیرهای زبانی هستند.

در این تحقیق متغیرهای زبانی به‌صورت جدول ۲ و ارزش فازی آنها نیز به‌صورت شکل ۴ تعریف‌شده‌اند.

جدول ۲: ارزش فازی متغیرهای زبانی

حالت	اعداد مثلثی	معادل زبانی
۱	$(0,0,0.2)$	ناچیز
۲	$(0,0.2,0.4)$	بسیار کم
۳	$(0.2,0.4,0.6)$	کم
۴	$(0.4,0.6,0.8)$	نسبتاً زیاد
۵	$(0.6,0.8,1)$	زیاد
۶	$(0.8,1,1)$	بسیار زیاد



شکل ۴: ارزش فازی متغیرهای زبانی

۲-۶-۲- تعیین هزینه‌های غیرقابل‌اندازه‌گیری حادثه

هزینه‌های غیرمستقیم یک حادثه که به‌صورت عادی قابل‌اندازه‌گیری نمی‌باشند عبارت‌اند از:

- صدمه به اعتبار و حسن شهرت سازمان
- تألمات روحی ناشی از حادثه برای سایر همکاران

برای تعیین این‌گونه هزینه‌ها از جدول متغیرهای زبانی استفاده می‌شود.

سپس اعداد مثلثی متناظر با هر یک از متغیرهای زبانی متناسب با سطح فعالیت و عملکرد سازمان (میزان بزرگی سازمان) در عدد مناسب که از نظرسنجی خبرگان قابل استحصال است ضرب می‌شود به‌طور مثال با توجه به میزان

[1] Linguistic terms

سرمایه سازمان و با توجه به شرکا و رقبای سازمان و همچنین مناقصات و پروژه‌های سازمان میزان حداکثر آسیب به اعتبار و حسن شهرت سازمان در صورت وقوع حادثه مشخص و برای هر ریسک با استفاده از جدول متغیرهای زبانی فوق هزینه‌های غیرمستقیم تخمین زده می‌شود.

۲-۶-۳- تأثیر اجرای کنترل‌ها بر کاهش شدت، احتمال و ضریب کشف

ارزش فازی متغیرهای زبانی با نظر خبرگان در عددی ضرب شده و به‌عنوان میزان درصد تغییر در کاهش شدت، احتمال و ضریب کشف به ازای اجرای کنترل در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق متغیرهای زبانی در عدد ثابت ۲ ضرب شده و برای هرکدام از موارد شدت احتمال و ضریب کشف و قصور شرکت در نظر گرفته می‌شود.

۲-۷- مدل‌سازی و مطالعات هزینه فایده

به‌منظور دستیابی به نقطه بهینه سرمایه‌گذاری از مدل‌سازی توابع چندهدفه استفاده می‌شود. بدیهی است در این مدل هزینه حادثه با توجه به‌شدت حادثه و درصد میزان تغییر شدت حادثه در ازای اجرای یک کنترل، میزان قصور شرکت در هر ریسک، درصد کاهش قصور شرکت به ازای اجرای یک کنترل، احتمال وقوع یک حادثه و درصد کاهش احتمال به ازای اجرای یک کنترل و ضریب کشف و درصد کاهش ضریب کشف به ازای اجرای یک کنترل تأثیرگذار می‌باشند.

۲-۷-۱- در نظر گرفتن تأثیر شدت حادثه بر هزینه حادثه

فرض می‌کنیم اگر شدت حادثه بین ۰-۳ باشد هزینه حادثه برابر است با ACOST1

فرض می‌کنیم اگر شدت حادثه بین ۳-۶ باشد هزینه حادثه برابر است با $ACOST1+ACOST2$

فرض می‌کنیم اگر شدت حادثه بین ۶-۹ باشد هزینه حادثه برابر است با $ACOST1+ACOST2+ACOST3$

فرض می‌کنیم اگر شدت حادثه ۹-۱۰ باشد هزینه حادثه برابر است با $ACOST1+ACOST2+ACOST3+ACOST4$

اگر S_i^0 شدت در نظر گرفته‌شده برای ریسک i ام بدون اعمال هیچ‌گونه کنترل بوده و dS_{ij} درصد میزان تغییر شدت ریسک i ام در ازای اجرای کنترل j ام باشد لذا متغیر S_i که شدت ریسک i ام است برابر است با:

$$S_i = \prod_j \left(1 - dS_{ij} X_{ij}\right) S_i^0 \qquad (۵)$$

بنابراین با توجه به مفروضات بالا و مدل‌سازی خطی تکه‌ای، در نظر گرفتن تأثیر شدت اثر بر هزینه حادثه در تابع هدف به این صورت فرموله می‌شود (۶)

(۶)

$$ACCIDENT\ COST = ACOST_1 + Z_1 ACOST_2 + Z_2 ACOST_3 + Z_3 ACOST_4$$

$$St.$$

$$S_i = \prod_j \left(1 - dS_{ij} X_{ij}\right) S_i^0 = K_1 + K_2 + K_3 + K_4$$

$$3Z_1 \le K_1 < 3$$

$$3Z_2 \le K_2 < 3Z_1$$

$$3Z_3 \le K_3 < 3Z_2$$

$$0 \le K_4 \le Z_3$$

$$Z_1, Z_2, Z_3 \in \{0,1\}$$

۲-۷-۲- مدل‌سازی کلی مسئله با فرض محدودیت بودجه

مدل‌سازی کلی مسئله با فرض اینکه G_i^0 میزان قصور شرکت بدون هیچ‌گونه کنترل و dG_{ij} میزان کاهش قصور شرکت با اجرای کنترل j در ریسک

i باشد همچنین O_i^0 احتمال وقوع ریسک i بدون هیچ‌گونه کنترل و dO_{ij} کاهش احتمال ناشی از اجرای کنترل jام از ریسک i ام و $Ccost$ بودجه در نظر گرفته‌شده برای ایمنی و C_{ij} هزینه اجرای کنترل j در ریسک i ام باشد، داریم.

(۷)

$$\min .RPN_i = S_i.O_i.D_i \quad \forall i$$

$$Min.\ ACCIDENT\ COST_i =$$

$$\begin{pmatrix} ACOST_1 + Z_1 ACOST_2 + \\ Z_2 ACOST_3 + Z_3 ACOST_4 \end{pmatrix}.G_i.O_i.D_i$$

$$St.$$

$$\sum_i \sum_j C_{ij}.X_{ij} \le CCOST$$

$$S_i = \prod_j \left(1 - dS_{ij}X_{ij}\right) S_i^0 = K_1 + K_2 + K_3 + K_4$$

$$3Z_1 \le K_1 < 3$$

$$3Z_2 \le K_2 < 3Z_1$$

$$3Z_3 \le K_3 < 3Z_2$$

$$0 \le K_4 \le Z_3$$

$$Z_1, Z_2, Z_3, X_{ij} \in \{0,1\}$$

که در آن:

$$G_i = \prod_j \left(1 - dG_{ij}X_{ij}\right) G_i^0$$

$$S_i = \prod_j \left(1 - dS_{ij}X_{ij}\right) S_i^0$$

$$O_i = \prod_j \left(1 - dO_{ij}X_{ij}\right) O_i^0$$

$$D_i = \prod_j \left(1 - dD_{ij}X_{ij}\right) D_i^0$$

۲-۷-۳- مدل‌سازی کلی مسئله با فرض عدم محدودیت بودجه

درصورتی‌که با محدودیت بودجه برای هزینه کنترل‌های ایمنی مواجه نبوده و در نظر باشد که میزان سرمایه‌گذاری بهینه ایمنی را محاسبه نماییم با تغییری در تابع هدف مسئله به این مهم پرداخته می‌شود؛ یعنی در رابطه ۷ به‌جای تابع هدف مسئله تابع هدف رابطه ۸ را جایگزین نماییم.

$$Min \sum_i Accident\ cost_i + \sum_i \sum_j C_{ij} X_{ij} \qquad (۸)$$

۲-۸- حل مدل و یافتن نقطه بهینه

در این گام به‌عنوان گام نهایی مدل توسط نرم‌افزار اجرا می‌شود و حل بهینه حاصل می‌شود. همچنین با تغییر برخی متغیرها مانند بودجه و یا هزینه اجرای یک کنترل و یا هزینه حادثه یک ریسک به تحلیل حساسیت مدل پرداخته می‌شود.

۳- تئوری و محاسبات

۳-۱- معرفی شرکت موردمطالعه

شرکت موردمطالعه یکی از شرکت‌های زیرمجموعه حوزه نفت بوده و وظیفه بهره‌برداری از میادین گازی و نفتی و تأمین خوراک پالایشگاه‌های گازی و همچنین تأمین بخش عمده گاز موردنیاز، برای تزریق در مخازن نفتی را عهده‌دار است.

۳-۱-۱- شرح فعالیت ارزیابی‌شده

رطوبت‌زدایی یا نم‌زدایی یکی از مراحل مهم در فرآیند پالایش گاز طبیعی محسوب می‌شود. پس از استخراج گاز، مقداری آب آزاد همراه با گاز طبیعی وجود دارد که بخش عمده آن از طریق روش های ساده جداسازی در چاه یا نزدیکی آن از گاز جدا می‌شود. بااین‌حال، بخارآب موجود در گاز که به صورت محلول است، باید طی فرآیندی پیچیده‌تر تحت عنوان عملیات رطوبت‌زدایی یا نم‌زدایی از گاز طبیعی جدا شود.

در این فرایند بخارآب متراکم و موجود در سطح توسط ماده نم‌زدا جذب و جمع‌آوری

می‌شود.

نوع متداول نم‌زدایی جذب[1] با عنوان نم‌زدایی گلایکول که ماده اصلی این فرایند است شناخته می‌شود. در این فرایند، از مایع نم‌زدای خشک‌کننده حاوی گلایکول برای جذب بخارآب از جریان گاز استفاده می‌شود. در این نوع فرایند در منطقه دالان از تری اتیل گلایکول[2] استفاده می‌شود.

خواص مولکولی ماده گلایکول شباهت بسیاری با آب دارد بنابراین چنانچه در تماس با جریانی از گاز طبیعی قرار گیرد، رطوبت آب موجود در جریان گاز را جذب و جمع‌آوری می‌نماید. مولکول‌های سنگین شده گلایکول در انتهای تماس دهنده برای خروج از نم زدا جمع و خارج می‌شوند سپس گاز طبیعی خشک نیز از جانب دیگر به بیرون از نم‌زدا انتقال می‌یابد. محلول گلایکول را از میان دیگ بخار به‌منظور تبخیر نمودن آب محلول در آن و آزاد کردن گلایکول به‌منظور استفاده مجدد آن در فرایندهای بعدی نم‌زدایی عبور می‌دهند. این عمل با بهره‌گیری از پدیده فیزیکی یعنی وجود اختلاف در نقطه‌جوش آب تا ۲۱۲ درجه فارنهایت (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) و گلایکول تا ۴۰۰ درجه فارنهایت صورت می‌گیرد. این عملیات در کوره‌ای واقع در پالایشگاه انجام می‌شود که نیاز به تعمیرات و اورهال سالانه دارد. با توجه به وزن و حجم قابل توجه استک، فرآیند جداسازی و نصب آن با ریسک بالایی همراه است؛ بنابراین، فعالیت موردنظر به عنوان یک پروژه پایلوت برای ارزیابی فرآیند جداسازی و نصب استک در نظر گرفته‌شده است.

۳-۲- تشکیل تیم خبره (معرفی تیم ارزیابی)

تیم ارزیابی متشکل از ۷ کارشناس و مدیر از ادارات مختلف به شرح ذیل می‌باشند:

- ✓ مدیر ایمنی منطقه
- ✓ سرپرست اداره مکانیک
- ✓ کارشناس ایمنی
- ✓ کارشناس عملیات
- ✓ افسر ایمنی
- ✓ اپراتور مکانیک
- ✓ اپراتور عملیات

وزن‌دهی به اعضا

همان‌گونه که در گام دوم اشاره شد اعضای تیم توسط ۳ معیار تجربه، سمت سازمانی و تحصیلات مطابق جدول ذیل امتیازدهی و نتیجه به‌صورت جدول ۳ مشخص شد.

۳-۳- ارزیابی ریسک اولیه به روش FMEA

همان‌گونه که در فصل سوم بیان شد ارزیابی ریسک اولیه توسط تیم خبره و با استناد به دستورالعمل ارزیابی ریسک شرکت ملی نفت ایران انجام شد.

۳-۴- تعریف کنترل‌های پیشنهادی با روش طوفان فکری

همان‌گونه که در بند ۳ به‌تفصیل بیان شد در این گام از تحقیق کنترل‌های پیشنهادی برای ایمن‌سازی هر چه بیشتر فرایند مطابق نظر خبرگان و با روش طوفان فکری جمع‌آوری شد که مطابق جدول ۴ برای هر یک از فعالیت‌ها و هر خطر بالقوه قابل‌ارائه است.

۳-۵- فازی سازی ارزیابی ریسک با استفاده از روش دلفی فازی

همان‌گونه که در بخش قبل بیان شد در روش دلفی ابتدا از افراد واجد شرایط اشاره‌شده در قسمت قبلی خواسته می‌شود تا نظر خود را به‌طور جداگانه بدون هیچ‌گونه تعامل با یکدیگر ارائه نمایند. سپس یک تحلیل آماری همانند

[1] Absorption
[2] TEG

جدول ۳: جدول وزن‌دهی به خبرگان

نام و نام خانوادگی	تحصیلات	تجربه	سمت سازمانی	امتیاز	امتیاز موزون
خبره ۱	۳	۴	۵	۱۲	۰,۱۹۶
خبره ۲	۵	۲	۳	۱۰	۰,۱۶۳
خبره ۳	۲	۲	۱	۵	۰,۰۸۲
خبره ۴	۳	۲	۲	۷	۰,۱۱۴
خبره ۵	۳	۴	۳	۱۰	۰,۱۶۳
خبره ۶	۱	۵	۴	۱۰	۰,۱۶۳
خبره ۷	۳	۳	۱	۷	۰,۱۱۴

جدول ۴: کنترل‌های پیشنهادی ریسک

شرح فعالیت	خطرات بالقوه	کنترل و اقدام پیشنهادی
بارگیری و تخلیه قطعات	مهار ناایمن قطعات روی کفی	بازرسی وضعیت مهار قطعات
		مستقر نمودن افسر ایمنی در محل
		آموزش اصول باربرداری به انباردار
		آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل
		استخدام ریگر
		تهیه نقشه کامل مسیر
		استفاده از ماشین راهنما سیگنال دار
		تسطیح کامل مسیر
		مهار بار در مرکز ثقل و پیشگیری از ایجاد گشتاور
بارگیری و تخلیه قطعات	خطای اپراتور جرثقیل	استفاده از افراد باتجربه
		عدم استفاده از پیمانکار جرثقیل
		مستقر نمودن افسر ایمنی در محل
		آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل
		استخدام ریگر
		استفاده از جرثقیل کمکی
		تأمین پرسنل جرثقیل توسط شرکت
		تدوین دستورالعمل کار با جرثقیل
پیش مونتاژ پایه استک	فعالیت در ارتفاع ۴ متری بدون حفاظ	نظارت مستمر افسر ایمنی
		تجهیز محل به استند پیش مونتاژ
		داربست بندی
		نصب لایف لاین
		استفاده از جرثقیل و سبد
		آموزش ایمنی کار در ارتفاع به کارگران

شرح فعالیت	خطرات بالقوه	کنترل و اقدام پیشنهادی
		استفاده از کمربند در حالت فاکتور ۳
پیش مونتاژ پایه استک	استفاده از سیم‌بکسل معیوب	بازرسی دوره‌ای جرثقیل و متعلقات
		بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط افسر
		بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط ریگر یا راننده
		عدم اجازه به کار تا اخذ گواهی سلامت
		تعویض سیم‌بکسل پس از هر بار استفاده
		استفاده از تست کشش قبل از هر بار استفاده
		آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل
		نصب توری در زیر محوطه باربرداری
نصب استک با استفاده از جرثقیل	عدم استفاده از طناب مهار	استفاده از ریگر
		استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری
		عدم اجازه عبور و مرور به افراد
		استفاده از دو نفر ریگر
		استفاده از دو جرثقیل هم‌زمان
		آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل
		تعطیلی سایر فعالیت‌ها
نصب استک با استفاده از جرثقیل	عدم استفاده از شاهین	عدم اجازه کار تا زمان استفاده از شاهین
		استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری
		عدم اجازه عبور و مرور به افراد
		آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل
		تعطیلی سایر فعالیت‌ها
		استفاده از اپراتور باتجربه
		عدم استفاده از جرثقیل‌های اجاره‌ای
		استخدام ریگر
نصب استک با استفاده از جرثقیل	لیز خوردن ابزار از دست	نصب علائم در تمامی محل‌های خطر
		استفاده از بند حمایل ابزار
		نصب تورهای ایمنی زیر کار
		استفاده از کیسه ابزار
		محدود کردن عبور افراد با استفاده از نوار خطر
		تخته‌بندی کامل محدوده فعالیت
		آموزش پرسنل
نصب ریل Cleaning system	عدم استفاده از ماسک	استفاده از ماسک جوشکاری باکیفیت مطلوب
		آموزش به‌منظور قرار ندادن منطقه تنفسی در مسیر جریان دود و دم
		استفاده از ماسک‌های جوشکاری هواساز
		تعویض متناوب پرسنل جوشکار
		استفاده از سیستم تهویه موضعی

میانگین از این داده‌های ذهنی آماده و فاصله داده هر نفر با میانگین به آنها اعلام شد و اجازه داده شد نتایج را مرور نموده و تخمین جدیدی ارائه نمایند.

۳-۵-۱- تعیین شدت حادثه با استفاده از اعداد مثلثی فازی

گونه‌های مختلف از اعداد فازی را می‌توان برای اخذ نظرات خبرگان مورداستفاده قرار داد اما در تحقیق حاضر به دلیل سهولت انجام محاسبات از اعداد فازی مثلثی TFN استفاده‌شده است.

پس از توضیح دادن روش کار از افراد خبره خواسته شد شدت حادثه را در قالب کمترین شدت حادثه ممکن، محتمل‌ترین شدت حادثه و حداکثر شدت حادثه ممکن ارائه دهند. در انتها با توجه به وزن خبرگان میانگین موزون به شرح جدول ۵ محاسبه شد:

جدول ۵: اعداد فازی اختصاص داده‌شده به شدت اثر

ردیف	شدت اثر		
۱	۹.۲۳	۷.۰۷	۴.۷۵
۲	۹.۱۶	۷.۴۴	۴.۷۷
۳	۸.۶۹	۷.۰۸	۴.۵۷
۴	۱۰	۹.۴۱	۶.۴۱
۵	۹.۲	۶.۸۴	۴.۲۵
۶	۹.۳۳	۷.۴۹	۴.۶۹
۷	۹.۴۴	۶.۹۷	۳.۷۵
۸	۵.۶۹	۴.۶۱	۳.۳

۳-۵-۲- تعیین احتمال وقوع با استفاده از اعداد مثلثی فازی

پس از توضیح دادن روش کار از افراد خبره خواسته شد همانند شدت حادثه احتمال وقوع را نیز در قالب کمترین احتمال ممکن، محتمل‌ترین عدد و حداکثر احتمال ممکن ارائه دهند. اعداد مرتبه اول نظرخواهی و میانگین در ادامه ارائه‌شده است. سپس از نتایج مرحله دوم نظرخواهی میانگین موزون گرفته شد و در انتها با توجه به وزن خبرگان میانگین موزون به شرح جدول ۶ محاسبه شد:

جدول ۶: اعداد فازی اختصاص داده‌شده به‌احتمال وقوع

ردیف	احتمال وقوع		
۱	۸	۶.۴۴	۴.۶۷
۲	۸.۶۱	۶.۸۵	۴.۴۹
۳	۹.۴۶	۷.۸۷	۵.۸۴
۴	۹.۳۶	۷.۳۴	۵.۵۷
۵	۱۰	۸.۹۲	۷.۶۷
۶	۶.۸۹	۵.۴۸	۳.۵۹
۷	۷.۱۵	۵.۴۱	۴.۲۱
۸	۶.۱۸	۳.۵۷	۲.۱

۳-۶- برآورد هزینه‌ها

در برآورد هزینه‌ها دو نوع هزینه مطرح است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد هزینه‌های موردبحث هزینه حادثه و هزینه کنترل‌های ایمنی می‌باشند که به ترتیب محاسبه شده است.

۳-۶-۱- برآورد هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم حوادث

هزینه حوادث در نظر گرفته در پژوهش حاضر شامل هزینه‌های ذیل است:

- ✓ هزینه دیه
- ✓ ازکارافتادگی
- ✓ هزینه بررسی حادثه
- ✓ هزینه آموزش نفر جدید
- ✓ هزینه دستمزد وقت تلف‌شده سایرین
- ✓ هزینه پزشکی
- ✓ هزینه جذب و استخدام نفر جدید
- ✓ هزینه تأخیر در کار
- ✓ هزینه تمیز کردن محوطه
- ✓ هزینه تجهیز و آماده‌سازی مجدد

۳-۶-۲- برآورد هزینه‌های کنترل‌ها

هزینه‌های کنترل‌ها به دو بخش قابل تقسیم هستند: ۱- هزینه کنترل‌های جاری که در حال حاضر و به‌عنوان حداقل کنترل‌های ممکن وجود دارند ۲- هزینه کنترل‌های پیشنهادی که از فرایند طوفان فکری حاصل‌شده‌اند.

هزینه کنترل‌ها با مفروضات جدول ۷ محاسبه می‌شوند:

جدول ۷: مفروضات هزینه‌ای برای محاسبه هزینه کنترل

هزینه	عنوان (ارقام به تومان)
۴۰۰۰۰	کلاه ایمنی (دوساله)
۵۰۰۰۰	کفش ایمنی (دو بار در سال)
۵۰۰۰۰	لباس ایمنی (دو بار در سال)
۵۰۰۰	دستکش (ماهیانه)
۵۰۰۰۰۰	کمربند (دوساله)
۲۰۰۰۰۰	علائم ایمنی هر محوطه کاری شش‌ماهه
۱۶۶۶.۶۶۷	علائم ایمنی هر محوطه کاری روزانه
۱۵۰۰۰	نوار خطر هر محوطه
۳۰۰۰۰	بند حمایل ابزار سه‌ماهه هر نفر
۵۰۰	بند حمایل ابزار یک‌روزه هر نفر
۸۰۰۰۰	کفی
۴۰۰۰۰۰	جرثقیل ۱۰ تن
۱۵۰۰۰۰۰	جرثقیل ۱۰۰ تن

با انجام محاسبات هزینه‌های کنترل‌های موجود و کنترل‌های پیشنهادی محاسبه می‌شوند.

۳-۷- تخمین تأثیرات اجرای کنترل‌ها با استفاده از نظر خبرگان

همان‌گونه که در فصل قبل بیان شد میزان تأثیر اجرای یک کنترل بر کاهش احتمال وقوع، شدت حادثه، ضریب کشف و کاهش قصور شرکت در یک ریسک با استفاده از متغیرهای زبانی به درصد به شرح جدول ۸ بیان می‌شوند:

جدول ۸: معادل فازی متغیرهای زبانی اجرای کنترل بر کاهش شدت و احتمال و ضریب کشف

حالت	اعداد مثلثی	معادل زبانی
۱	$(0,0,4)$	ناچیز
۲	$(0,4,8)$	بسیار کم
۳	$(4,8,12)$	کم
۴	$(8,12,16)$	نسبتاً زیاد
۵	$(12,16,20)$	زیاد
۶	$(16,20,20)$	بسیار زیاد

سپس با اخذ نظرات خبرگان میانگین موزون نظرات محاسبه و تأثیر اجرای هر کنترل بر هر متغیر مشخص می‌شود.

۳-۷-۱- تأثیر کنترل بر کاهش شدت حادثه

نظرات خبرگان در خصوص تأثیر هر کنترل بر کاهش شدت اثر اخذ شد. سپس با توجه به وزن خبرگان میانگین محاسبه و عدد فازی مربوطه مطابق جدول ۹ استخراج شد:

۳-۷-۲- تأثیر کنترل بر کاهش احتمال وقوع

نظرات خبرگان در خصوص تأثیر هر کنترل بر کاهش احتمال وقوع اخذ شد. سپس با توجه به وزن خبرگان میانگین محاسبه و عدد فازی مربوطه مطابق جدول ۱۰ استخراج شد:

۳-۷-۳- تأثیر کنترل بر کاهش ضریب کشف

نظرات خبرگان در خصوص تأثیر هر کنترل بر کاهش ضریب کشف اخذ شد. سپس با توجه به وزن خبرگان میانگین محاسبه و عدد فازی مربوطه مطابق جدول ۱۱ استخراج شد:

جدول ۹: درصد تأثیر هر کنترل بر کاهش شدت تأثیر

عنوان کنترل	عدد فازی مربوطه		
بازرسی وضعیت مهار قطعات	۴.۷۸۶۸	۰.۷۸۶۸	۰
مستقر نمودن افسر ایمنی در محل	۴.۷۸۷۲	۰.۷۸۷۲	۰
آموزش اصول باربرداری به انباردار	۴	۰	۰
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۵.۶۳۹۲	۱.۶۳۹۲	۰
استخدام ریگر	۷.۵۴۰۸	۳.۵۴۰۸	۰
تهیه نقشه کامل مسیر	۵.۲۴۶	۱.۲۴۶	۰
استفاده از ماشین راهنما سیگنال‌دار	۴.۴۵۹۲	۰.۴۵۹۲	۰
تسطیح کامل مسیر	۵.۳۱۱۲	۱.۳۱۱۲	۰
مهار بار در مرکز ثقل و پیشگیری از ایجاد گشتاور	۵.۵۷۴	۱.۵۷۴	۰
استفاده از افراد باتجربه	۶.۲۹۴۸	۲.۲۹۴۸	۰
عدم استفاده از پیمانکار جرثقیل	۹.۵۷۴	۵.۵۷۴	۲.۲۲۹۶
مستقر نمودن افسر ایمنی در محل	۵.۱۱۴۸	۱.۱۱۴۸	۰
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۵.۵۷۴	۱.۵۷۴	۰
استخدام ریگر	۸.۲۶۲۸	۴.۲۶۲۸	۰.۹۱۸۴
استفاده از جرثقیل کمکی	۱۲.۳۲۷۶	۸.۳۲۷۶	۴.۳۲۷۶
تأمین پرسنل جرثقیل توسط شرکت	۵.۴۴۲۸	۱.۴۴۲۸	۰
تدوین دستورالعمل کار با جرثقیل	۶.۵۵۷۲	۲.۵۵۷۲	۰
نظارت مستمر افسر ایمنی	۴.۷۸۷۲	۰.۷۸۷۲	۰
تجهیز محل به استند پیش مونتاژ	۱۲.۷۸۶۸	۸.۷۸۶۸	۴.۷۸۶۸
داربست بندی	۵.۵۷۴	۱.۵۷۴	۰
نصب لایف لاین	۴.۶۵۵۶	۰.۶۵۵۶	۰
استفاده از جرثقیل و سبد	۷.۲۱۲۸	۳.۲۱۲۸	۰.۶۵۵۶
آموزش ایمنی کار در ارتفاع به کارگران	۶.۲۲۹۶	۲.۲۲۹۶	۰
استفاده از کمربند در حالت فاکتور ۳	۱۰.۳۶۰۸	۶.۳۶۰۸	۲.۳۶۰۸
بازرسی دوره‌ای جرثقیل و متعلقات	۴	۰	۰
بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط افسر	۴	۰	۰
بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط ریگر یا راننده	۴.۶۵۵۶	۰.۶۵۵۶	۰
عدم اجازه به کار تا اخذ گواهی سلامت	۵.۹۰۲	۱.۹۰۲	۰
تعویض سیم‌بکسل پس از هر بار استفاده	۶.۳۶۰۸	۲.۳۶۰۸	۰
استفاده از تست کشش قبل از هر بار استفاده	۶.۴۲۶	۲.۴۲۶	۰

عنوان کنترل	عدد فازی مربوطه		
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۵.۴۴۲۸	۱.۴۴۲۸	۰
نصب توری در زیر محوطه باربرداری	۹.۹۰۱۶	۵.۹۰۱۶	۱.۹۰۱۶
استفاده از ریگر	۴.۶۵۵۶	۰.۶۵۵۶	۰
استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری	۴.۴۵۹۲	۰.۴۵۹۲	۰
عدم اجازه عبور و مرور به افراد	۶.۳۶۰۸	۲.۳۶۰۸	۰.۴۵۹۲
استفاده از دو نفر ریگر	۵.۹۰۱۶	۱.۹۰۱۶	۰
استفاده از دو جرثقیل هم‌زمان	۴.۹۸۳۶	۰.۹۸۳۶	۰
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۶.۵۵۷۶	۲.۵۵۷۶	۰
تعطیلی سایر فعالیت‌ها	۷.۶۷۲	۳.۶۷۲	۰.۷۸۶۸
عدم اجازه کار تا زمان استفاده از شاهین	۵.۹۰۱۶	۱.۹۰۱۶	۰
استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری	۵.۷۷۰۴	۱.۷۷۰۴	۰
عدم اجازه عبور و مرور به افراد	۸.۰۰۰۴	۴.۰۰۰۴	۱.۴۴۲۸
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۵.۴۴۲۸	۱.۴۴۲۸	۰
تعطیلی سایر فعالیت‌ها	۱۱.۸۰۳۶	۷.۸۰۳۶	۳.۸۰۳۶
استفاده از اپراتور باتجربه	۵.۷۷۰۴	۱.۷۷۰۴	۰
عدم استفاده از جرثقیل‌های اجاره‌ای	۵.۲۴۶۴	۱.۲۴۶۴	۰
استخدام ریگر	۵.۹۰۱۶	۱.۹۰۱۶	۰
نصب علائم در تمامی محل‌های خطر	۵.۱۱۴۸	۱.۱۱۴۸	۰
استفاده از بند حمایل ابزار	۴.۶۵۵۶	۰.۶۵۵۶	۰
نصب تورهای ایمنی زیر کار	۶.۲۲۹۶	۲.۲۲۹۶	۰
استفاده از کیسه ابزار	۵.۱۱۴۸	۱.۱۱۴۸	۰
محدود کردن عبور افراد با استفاده از نوار خطر	۹.۵۰۸	۵.۵۰۸	۲.۷۵۴
تخته‌بندی کامل محدوده فعالیت	۷.۰۸۱۶	۳.۰۸۱۶	۰
آموزش پرسنل	۶.۴۲۶	۲.۴۲۶	۰
استفاده از ماسک جوشکاری باکیفیت مطلوب	۱۶.۰۶۵۲	۱۲.۰۶۵۲	۸.۰۶۵۲
آموزش به‌منظور قرار ندادن منطقه تنفسی در مسیر جریان دود و دم	۶.۴۲۶	۲.۴۲۶	۰.۶۵۵۶
استفاده از ماسک‌های جوشکاری هواساز	۱۰.۴۲۶۴	۶.۴۲۶۴	۲.۴۲۶۴
تعویض متناوب پرسنل جوشکار	۱۰.۵۵۷۲	۶.۵۵۷۲	۲.۵۵۷۲
استفاده از سیستم تهویه موضعی	۷.۵۴۰۸	۳.۵۴۰۸	۱.۳۱۱۲

جدول ۱۰: درصد تأثیر هر کنترل بر کاهش احتمال وقوع

عنوان کنترل	عدد فازی مربوطه		
بازرسی وضعیت مهار قطعات	12.9832	8.9832	4.9832
مستقر نمودن افسر ایمنی در محل	16.3276	12.3276	8.3276
آموزش اصول باربرداری به انباردار	5.7708	1.7708	0.328
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	13.8356	9.8356	5.8356
استخدام ریگر	17.9016	14.5572	10.5572
تهیه نقشه کامل مسیر	9.7052	5.7052	2.3608
استفاده از ماشین راهنما سیگنال‌دار	12.852	8.852	4.852
تسطیح کامل مسیر	15.8032	11.8032	7.8032
مهار بار در مرکز ثقل و پیشگیری از ایجاد گشتاور	8.2628	4.2628	1.574
استفاده از افراد باتجربه	15.0164	11.0164	7.0164
عدم استفاده از پیمانکار جرثقیل	7.0816	3.0816	0.6556
مستقر نمودن افسر ایمنی در محل	17.0496	13.0496	9.0496
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	13.77	9.77	5.77
استخدام ریگر	17.7052	13.7052	9.7052
استفاده از جرثقیل کمکی	18.2296	15.3444	11.3444
تأمین پرسنل جرثقیل توسط شرکت	8.9184	4.9184	1.574
تدوین دستورالعمل کار با جرثقیل	15.3444	11.3444	7.3444
نظارت مستمر افسر ایمنی	16.5904	12.5904	8.5904
تجهیز محل به استند پیش مونتاژ	16.9184	13.2464	9.2464
داربست بندی	18.098	14.098	10.098
نصب لایف لاین	12.2628	8.2628	4.2628
استفاده از جرثقیل و سبد	12.9836	8.9836	4.9836
آموزش ایمنی کار در ارتفاع به کارگران	12.7868	8.7868	4.7868
استفاده از کمربند در حالت فاکتور ۳	6.4264	2.4264	0.9836
بازرسی دوره‌ای جرثقیل و متعلقات	13.6392	9.6392	5.6392
بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط افسر	9.3112	5.3112	1.7704
بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط ریگر یا راننده	14.8852	10.8852	6.8852
عدم اجازه به کار تا اخذ گواهی سلامت	19.3444	15.6724	11.6724
تعویض سیم‌بکسل پس از هر بار استفاده	20	18.5572	14.5572

عنوان کنترل	عدد فازی مربوطه		
استفاده از تست کشش قبل از هر بار استفاده	20	18.426	14.426
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	11.3444	7.3444	3.3444
نصب توری در زیر محوطه باربرداری	17.574	13.574	9.574
استفاده از ریگر	16.5904	12.5904	8.5904
استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری	15.5404	11.5404	7.5404
عدم اجازه عبور و مرور به افراد	8.328	4.328	1.7704
استفاده از دو نفر ریگر	17.7052	13.7052	9.7052
استفاده از دو جرثقیل هم‌زمان	14.426	10.426	6.426
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	8.852	4.852	1.9668
تعطیلی سایر فعالیت‌ها	13.7704	9.7704	5.7704
عدم اجازه کار تا زمان استفاده از شاهین	12.6552	8.6552	4.6552
استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری	16.3276	12.3276	8.3276
عدم اجازه عبور و مرور به افراد	6.426	2.426	0.6556
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	9.4428	5.4428	1.4428
تعطیلی سایر فعالیت‌ها	10.2296	6.2296	2.2296
استفاده از اپراتور باتجربه	10.0328	6.0328	2.0328
عدم استفاده از جرثقیل‌های اجاره‌ای	7.8688	3.8688	1.1148
استخدام ریگر	17.4424	13.4424	9.4424
نصب علائم در تمامی محل‌های خطر	11.6724	7.6724	3.6724
استفاده از بند حمایل ابزار	8	4	1.7704
نصب تورهای ایمنی زیر کار	17.4428	13.4428	9.4428
استفاده از کیسه ابزار	10.8852	6.8852	2.8852
محدود کردن عبور افراد با استفاده از نوار خطر	7.9348	3.9348	1.246
تخته‌بندی کامل محدوده فعالیت	19.3444	16.5904	12.5904
آموزش پرسنل	7.4096	3.4096	0.328
استفاده از ماسک جوشکاری باکیفیت مطلوب	11.8032	7.8032	3.8032
آموزش به‌منظور قرار ندادن منطقه تنفسی در مسیر جریان دود و دم	6.0984	2.0984	0
استفاده از ماسک‌های جوشکاری هواساز	10.6888	6.6888	2.6888
تعویض متناوب پرسنل جوشکار	15.8688	11.8688	7.8688
استفاده از سیستم تهویه موضعی	15.5404	11.5404	7.5404

جدول ۱۱: درصد تأثیر هر کنترل بر کاهش ضریب کشف

عنوان کنترل	عدد فازی مربوطه		
بازرسی وضعیت مهار قطعات	۱۶.۱۳۱۶	۱۲.۱۳۱۶	۸.۱۳۱۶
مستقر نمودن افسر ایمنی در محل	۱۰.۴۲۶	۶.۴۲۶	۲.۸۸۵۲
آموزش اصول باربرداری به انباردار	۵.۹۰۱۶	۱.۹۰۱۶	۰
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۵.۹۰۲	۱.۹۰۲	۰
استخدام ریگر	۸.۴۵۹۶	۴.۴۵۹۶	۱.۹۰۲
تهیه نقشه کامل مسیر	۴.۶۵۵۶	۰.۶۵۵۶	۰
استفاده از ماشین راهنما سیگنال‌دار	۴.۳۲۸	۰.۳۲۸	۰
تسطیح کامل مسیر	۴.۷۸۷۲	۰.۷۸۷۲	۰
مهار بار در مرکز ثقل و پیشگیری از ایجاد گشتاور	۵.۷۷۰۴	۱.۷۷۰۴	۰
استفاده از افراد باتجربه	۵.۷۷۰۴	۱.۷۷۰۴	۰
عدم استفاده از پیمانکار جرثقیل	۴.۹۱۸۴	۰.۹۱۸۴	۰
مستقر نمودن افسر ایمنی در محل	۹.۴۴۲۴	۵.۴۴۲۴	۱.۷۷۰۴
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۶.۲۲۹۶	۲.۲۲۹۶	۰
استخدام ریگر	۶.۶۸۸۸	۲.۶۸۸۸	۰.۴۵۹۲
استفاده از جرثقیل کمکی	۶.۰۹۸۴	۲.۰۹۸۴	۰
تأمین پرسنل جرثقیل توسط شرکت	۸.۱۳۱۲	۴.۱۳۱۲	۰.۴۵۹۲
تدوین دستورالعمل کار با جرثقیل	۱۲.۲۶۲۴	۸.۲۶۲۴	۴.۲۶۲۴
نظارت مستمر افسر ایمنی	۴.۴۵۹۲	۰.۴۵۹۲	۰
تجهیز محل به استند پیش مونتاژ	۵.۹۰۱۶	۱.۹۰۱۶	۰
داربست بندی	۵.۴۴۲۴	۱.۴۴۲۴	۰
نصب لایف لاین	۱۱.۵۴۰۸	۷.۵۴۰۸	۳.۵۴۰۸
استفاده از جرثقیل و سبد	۴.۴۵۹۲	۰.۴۵۹۲	۰
آموزش ایمنی کار در ارتفاع به کارگران	۴	۰	۰
استفاده از کمربند در حالت فاکتور ۳	۵.۴۴۲۸	۱.۴۴۲۸	۰
بازرسی دوره‌ای جرثقیل و متعلقات	۱۵.۶۷۲	۱۱.۶۷۲	۷.۶۷۲
بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط افسر	۱۱.۹۹۹۶	۷.۹۹۹۶	۳.۹۹۹۶
بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط ریگر یا راننده	۱۷.۵۷۴	۱۳.۵۷۴	۹.۵۷۴
عدم اجازه به کار تا اخذ گواهی سلامت	۶.۵۵۷۲	۲.۵۵۷۲	۰

عنوان کنترل	عدد فازی مربوطه		
تعویض سیم‌بکسل پس از هر بار استفاده	۱۰.۲۲۹۶	۶.۲۲۹۶	۲.۲۲۹۶
استفاده از تست کشش قبل از هر بار استفاده	۱۷.۲۴۶	۱۴.۰۳۲۸	۱۰.۰۳۲۸
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۵.۶۳۹۲	۱.۶۳۹۲	۰
نصب توری در زیر محوطه باربرداری	۵.۶۳۹۲	۱.۶۳۹۲	۰
استفاده از ریگر	۵.۴۴۲۴	۱.۴۴۲۴	۰
استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری	۸	۴	۱.۷۷۰۴
عدم اجازه عبور و مرور به افراد	۵.۲۴۶	۱.۲۴۶	۰
استفاده از دو نفر ریگر	۸.۹۱۸۴	۴.۹۱۸۴	۱.۵۷۴
استفاده از دو جرثقیل هم‌زمان	۵.۴۴۲۸	۱.۴۴۲۸	۰
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۴.۶۵۵۶	۰.۶۵۵۶	۰
تعطیلی سایر فعالیت‌ها	۶.۷۵۳۶	۲.۷۵۳۶	۰
عدم اجازه کار تا زمان استفاده از شاهین	۵.۶۳۹۲	۱.۶۳۹۲	۰
استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری	۶.۰۹۸۴	۲.۰۹۸۴	۰
عدم اجازه عبور و مرور به افراد	۵.۷۷۰۴	۱.۷۷۰۴	۰
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۴.۳۲۸	۰.۳۲۸	۰
تعطیلی سایر فعالیت‌ها	۴.۶۵۵۶	۰.۶۵۵۶	۰
استفاده از اپراتور باتجربه	۴.۴۵۹۲	۰.۴۵۹۲	۰
عدم استفاده از جرثقیل‌های اجاره‌ای	۷.۳۴۴	۳.۳۴۴	۰.۷۸۶۸
استخدام ریگر	۶.۸۲۰۴	۲.۸۲۰۴	۰.۹۱۸۴
نصب علائم در تمامی محل‌های خطر	۵.۴۴۲۴	۱.۴۴۲۴	۰
استفاده از بند حمایل ابزار	۱۴.۸۸۵۲	۱۰.۸۸۵۲	۶.۸۸۵۲
نصب تورهای ایمنی زیر کار	۱۹.۳۴۴۴	۱۸.۰۳۳۲	۱۴.۰۳۳۲
استفاده از کیسه ابزار	۱۰.۶۸۸۴	۶.۶۸۸۴	۳.۰۱۶۴
محدود کردن عبور افراد با استفاده از نوار خطر	۵.۵۷۴	۱.۵۷۴	۰
تخته‌بندی کامل محدوده فعالیت	۱۶.۴۵۸۸	۱۲.۴۵۸۸	۸.۴۵۸۸
آموزش پرسنل	۵.۹۰۱۶	۱.۹۰۱۶	۰
استفاده از ماسک جوشکاری باکیفیت مطلوب	۶.۵۵۷۲	۲.۵۵۷۲	۰
آموزش به‌منظور قرار ندادن منطقه تنفسی در مسیر جریان دود و دم	۵.۴۴۲۴	۱.۴۴۲۴	۰
استفاده از ماسک‌های جوشکاری هواساز	۵.۱۱۴۸	۱.۱۱۴۸	۰
تعویض متناوب پرسنل جوشکار	۱۲.۱۹۶۸	۸.۱۹۶۸	۴.۱۹۶۸
استفاده از سیستم تهویه موضعی	۴.۹۸۳۶	۰.۹۸۳۶	۰

۳-۷-۴- تأثیر کنترل بر کاهش قصور شرکت

نظرات خبرگان در خصوص تأثیر هر کنترل بر کاهش قصور شرکت اخذ شد. سپس با توجه به وزن خبرگان میانگین محاسبه و عدد فازی مربوطه مطابق جدول ۱۲ استخراج شد:

۳-۸- دی‌فازی سازی و مدل‌سازی

برای حل ساده‌تر مدل، مدل‌سازی مسئله با اعداد قطعی انجام می‌گیرد. لذا بدین منظور اعداد مثلثی به‌دست‌آمده در مراحل قبلی از قبیل RPN، احتمال وقوع، شدت اثر، تأثیر اجرای کنترل بر کاهش شدت، تأثیر اجرای کنترل بر کاهش احتمال، تأثیر اجرای کنترل بر کاهش ضریب کشف و تأثیر اجرای کنترل بر کاهش قصور شرکت با روش میانگین وزنی معرفی‌شده توسط چن و هسیه غیر فازی در جدول ۱۳ و جدول ۱۴ می‌شوند.

جدول ۱۲: درصد تأثیر هر کنترل بر کاهش قصور

عنوان کنترل	عدد فازی مربوطه		
بازرسی وضعیت مهار قطعات	۴.۷۸۶۸	۰.۷۸۶۸	۰
مستقر نمودن افسر ایمنی در محل	۱۳.۱۱۴۴	۹.۱۱۴۴	۵.۱۱۴۴
آموزش اصول باربرداری به انباردار	۹.۱۱۴۴	۵.۱۱۴۴	۲.۵۵۷۲
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۶.۵۵۷۶	۲.۵۵۷۶	۰.۴۵۹۲
استخدام ریگر	۸.۹۱۸۴	۴.۹۱۸۴	۰.۹۱۸۴
تهیه نقشه کامل مسیر	۵.۲۴۶	۱.۲۴۶	۰
استفاده از ماشین راهنما سیگنال‌دار	۸.۶۵۵۲	۴.۶۵۵۲	۲.۰۹۸
تسطیح کامل مسیر	۵.۳۱۱۲	۱.۳۱۱۲	۰
مهار بار در مرکز ثقل و پیشگیری از ایجاد گشتاور	۵.۵۷۴	۱.۵۷۴	۰
استفاده از افراد باتجربه	۱۰.۱۶۴۴	۶.۱۶۴۴	۲.۱۶۴۴
عدم استفاده از پیمانکار جرثقیل	۵.۱۱۴۸	۱.۱۱۴۸	۰
مستقر نمودن افسر ایمنی در محل	۱۲.۴۵۹۲	۸.۴۵۹۲	۴.۴۵۹۲
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۷.۸۰۳۶	۳.۸۰۳۶	۱.۱۱۴۸
استخدام ریگر	۱۰.۲۲۹۶	۶.۲۲۹۶	۲.۲۲۹۶
استفاده از جرثقیل کمکی	۵.۴۴۲۸	۱.۴۴۲۸	۰
تأمین پرسنل جرثقیل توسط شرکت	۵.۴۴۲۸	۱.۴۴۲۸	۰
تدوین دستورالعمل کار با جرثقیل	۱۷.۴۴۲۸	۱۳.۴۴۲۸	۹.۴۴۲۸
نظارت مستمر افسر ایمنی	۱۲.۳۲۷۶	۸.۳۲۷۶	۴.۳۲۷۶
تجهیز محل به استند پیش مونتاژ	۹.۰۴۸۸	۵.۰۴۸۸	۲.۲۹۴۸
داربست بندی	۱۰.۷۵۴	۶.۷۵۴	۲.۷۵۴
نصب لایف لاین	۱۷.۳۷۷۲	۱۳.۳۷۷۲	۹.۳۷۷۲
استفاده از جرثقیل و سبد	۵.۹۰۱۶	۱.۹۰۱۶	۰
آموزش ایمنی کار در ارتفاع به کارگران	۷.۵۴۰۸	۳.۵۴۰۸	۰.۶۵۵۶
استفاده از کمربند در حالت فاکتور ۳	۱۰.۳۶۰۸	۶.۳۶۰۸	۲.۳۶۰۸
بازرسی دوره‌ای جرثقیل و متعلقات	۴	۰	۰

عنوان کنترل	عدد فازی مربوطه		
بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط افسر	۴	۰	۰
بازرسی تجهیزات قبل از هر باربرداری توسط ریگر یا راننده	۴.۶۵۵۶	۰.۶۵۵۶	۰
عدم اجازه به کار تا اخذ گواهی سلامت	۱۶.۵۲۴۴	۱۲.۵۲۴۴	۸.۵۲۴۴
تعویض سیم‌بکسل پس از هر بار استفاده	۶.۳۶۰۸	۲.۳۶۰۸	۰
استفاده از تست کشش قبل از هر بار استفاده	۶.۴۲۶	۲.۴۲۶	۰
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۷.۹۳۴۸	۳.۹۳۴۸	۱.۲۴۶
نصب توری در زیر محوطه باربرداری	۱۷.۹۰۱۶	۱۳.۹۰۱۶	۹.۹۰۱۶
استفاده از ریگر	۱۴.۲۲۹۶	۱۰.۲۲۹۶	۶.۲۲۹۶
استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری	۱۳.۹۶۶۸	۹.۹۶۶۸	۵.۹۶۶۸
عدم اجازه عبور و مرور به افراد	۵.۴۴۲۴	۱.۴۴۲۴	۰
استفاده از دو نفر ریگر	۱۵.۲۱۲۸	۱۱.۲۱۲۸	۷.۲۱۲۸
استفاده از دو جرثقیل هم‌زمان	۱۱.۸۰۳۲	۷.۸۰۳۲	۳.۸۰۳۲
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۶.۵۵۷۶	۲.۵۵۷۶	۰
تعطیلی سایر فعالیت‌ها	۶.۰۹۸۴	۲.۰۹۸۴	۰
عدم اجازه کار تا زمان استفاده از شاهین	۱۱.۷۳۷۶	۷.۷۳۷۶	۳.۷۳۷۶
استقرار دائم افسر ایمنی در طول باربرداری	۱۱.۵۴۰۸	۷.۵۴۰۸	۳.۵۴۰۸
عدم اجازه عبور و مرور به افراد	۵.۱۱۴۸	۱.۱۱۴۸	۰
آموزش اصول باربرداری به اپراتور جرثقیل	۹.۲۴۶	۵.۲۴۶	۱.۹۰۱۶
تعطیلی سایر فعالیت‌ها	۵.۷۷۰۴	۱.۷۷۰۴	۰
استفاده از اپراتور باتجربه	۱۱.۸۰۳۶	۷.۸۰۳۶	۳.۸۰۳۶
عدم استفاده از جرثقیل‌های اجاره‌ای	۵.۲۴۶۴	۱.۲۴۶۴	۰
استخدام ریگر	۱۲.۱۹۶۸	۸.۱۹۶۸	۴.۱۹۶۸
نصب علائم در تمامی محل‌های خطر	۱۲.۷۸۶۸	۸.۷۸۶۸	۴.۷۸۶۸
استفاده از بند حمایل ابزار	۴.۶۵۵۶	۰.۶۵۵۶	۰
نصب تورهای ایمنی زیر کار	۱۷.۷۷۰۴	۱۴.۴۲۶	۱۰.۴۲۶
استفاده از کیسه ابزار	۹.۵۷۴	۵.۵۷۴	۲.۲۲۹۶
محدود کردن عبور افراد با استفاده از نوار خطر	۹.۵۰۸	۵.۵۰۸	۲.۷۵۴
تخته‌بندی کامل محدوده فعالیت	۱۶	۱۲	۸
آموزش پرسنل	۶.۴۲۶	۲.۴۲۶	۰
استفاده از ماسک جوشکاری باکیفیت مطلوب	۱۱.۸۶۸۴	۷.۸۶۸۴	۳.۸۶۸۴
آموزش به‌منظور قرار ندادن منطقه تنفسی در مسیر جریان دود و دم	۶.۴۲۶	۲.۴۲۶	۰.۶۵۵۶
استفاده از ماسک‌های جوشکاری هواساز	۱۴.۵۵۷۶	۱۰.۵۵۷۶	۶.۵۵۷۶
تعویض متناوب پرسنل جوشکار	۶.۲۲۹۶	۲.۲۲۹۶	۰
استفاده از سیستم تهویه موضعی	۱۶.۴۵۹۲	۱۲.۴۵۹۲	۸.۴۵۹۲

جدول ۱۳: اعداد دی فازی شده شدت، احتمال و ضریب کشف

D_i^0	O_i^0	S_i^0	*i*
۷	۶.۴۱	۷.۰۴	۱
۷	۶.۷۵	۷.۲۸	۲
۴	۷.۸	۶.۹۳	۳
۷	۷.۳۹	۹.۰۱	۴
۸	۸.۸۹	۶.۸	۵
۴	۵.۴	۷.۳۳	۶
۶	۵.۵	۶.۸۴	۷
۵	۳.۷۶	۴.۵۷	۸

جدول ۱۴: اعداد دی فازی شده تأثیر هر کنترل بر شدت، احتمال، ضریب کشف و قصور و هزینه هر کنترل

C_{ij}	dG_{ij}	dD_{ij}	dO_{ij}	ds_{ij}	*j*	*i*
۴۳۷۵۰	۱.۳۲	۱۲.۱۳	۸.۹۸	۱.۳۲	۱	۱
۳۵۰۰۰۰	۹.۱۱	۶.۵	۱۲.۳۳	۱.۳۲	۲	
۶۶۶۶۶۶.۷	۵.۳۵	۲.۲۵	۲.۲	۰.۶۷	۳	
۲۰۳۷.۵	۲.۸۷	۲.۲۵	۹.۸۴	۲.۰۳	۴	
۳۵۰۰۰۰	۴.۹۲	۴.۷	۱۴.۴۵	۳.۶۲	۵	
۵۰۰۰۰	۱.۷۱	۱.۲۱	۵.۸۱	۱.۷۱	۶	
۵۰۰۰۰۰	۴.۹	۰.۹۴	۸.۸۵	۱.۰۵	۷	
۱۰۰۰۰۰۰	۱.۷۶	۱.۳۲	۱۱.۸	۱.۷۶	۸	
۲۰۰۰۰	۱.۹۸	۲.۱۴	۴.۴۸	۱.۹۸	۹	
۱۰۰۰۰۰	۶.۱۶	۲.۱۴	۱۱.۰۲	۲.۵۸	۱	۲
۴۰۰۰۰۰	۱.۶	۱.۴۳	۳.۳۴	۵.۶۸	۲	
۳۵۰۰۰۰	۸.۴۶	۵.۵	۱۳.۰۵	۱.۶	۳	
۲۰۳۷۵۰	۴.۰۲	۲.۵۲	۹.۷۷	۱.۹۸	۴	
۳۵۰۰۰۰	۶.۲۳	۲.۹۸	۱۳.۷۱	۴.۳۷	۵	
۸۰۰۰۰۰	۱.۸۷	۲.۴۲	۱۵.۱۶	۸.۳۳	۶	
۳۵۰۰۰۰	۱.۸۷	۴.۱۹	۵.۰۳	۱.۸۷	۷	
۳۰۰۰۰۰	۱۳.۴۴	۸.۲۶	۱۱.۳۴	۲.۸	۸	
۳۵۰۰۰۰	۸.۳۳	۱.۰۵	۱۲.۵۹	۱.۳۲	۱	۳
۱۰۰۰۰۰۰	۵.۲۶	۲.۲۵	۱۳.۱۹	۸.۷۹	۲	
۳۰۰۰۰۰	۶.۷۵	۱.۸۷	۱۴.۱	۱.۹۸	۳	
۱۵۰۰۰۰	۱۳.۳۸	۷.۵۴	۸.۲۶	۱.۲۱	۴	
۴۰۰۰۰۰	۲.۲۵	۱.۰۵	۸.۹۸	۳.۴۵	۵	
۱۷۰۰۰۰	۳.۷۳	۰.۶۷	۸.۷۹	۲.۵۲	۶	
۵۰۰۰۰	۶.۳۶	۱.۸۷	۲.۸۵	۶.۳۶	۷	
۲۰۰۰۰	۰.۶۷	۱۱.۶۷	۹.۶۴	۰.۶۷	۱	۴
۴۳۷۵۰	۰.۶۷	۸	۵.۳۹	۰.۶۷	۲	
۴۳۷۵۰	۱.۲۱	۱۳.۵۷	۱۰.۸۹	۱.۲۱	۳	
۱۰۰۰۰۰۰	۱۲.۵۲	۲.۸	۱۵.۶۲	۲.۲۵	۴	
۱۰۰۰۰۰۰	۲.۶۳	۶.۲۳	۱۸.۱۳	۲.۶۳	۵	

C_{ij}	dG_{ij}	dD_{ij}	dO_{ij}	ds_{ij}	j	i
۱۰۰۰۰۰۰۰	۲.۶۹	۱۳.۹	۱۸.۰۲	۲.۶۹	۶	
۲۰۳۷۵۰	۴.۱۵	۲.۰۳	۷.۳۴	۱.۸۷	۷	
۵۰۰۰۰۰	۱۳.۹	۲.۰۳	۱۳.۵۷	۵.۹	۸	
۷۰۰۰۰۰	۱۰.۲۳	۱.۸۷	۱۲.۵۹	۱.۲۱	۱	۵
۲۰۰۰۰۰	۹.۹۷	۴.۳	۱۱.۵۴	۱.۰۵	۲	
۳۰۰۰۰۰	۱.۸۷	۱.۷۱	۴.۵۷	۲.۷۱	۳	
۷۰۰۰۰۰	۱۱.۲۱	۵.۰۳	۱۳.۷۱	۲.۲۵	۴	
۸۰۰۰۰۰	۷.۸	۱.۸۷	۱۰.۴۳	۱.۴۹	۵	
۲۰۳۷۵۰	۲.۸	۱.۲۱	۵.۰۴	۲.۸	۶	
۱۰۰۰۰۰۰۰	۲.۴۲	۲.۹۶	۹.۷۷	۳.۸۶	۷	
۵۰۰۰۰۰	۷.۷۴	۲.۰۳	۸.۶۶	۲.۲۵	۱	۶
۳۵۰۰۰۰	۷.۵۴	۲.۴۲	۱۲.۳۳	۲.۱۴	۲	
۳۰۰۰۰۰	۱.۶	۲.۱۴	۲.۸	۴.۲۴	۳	
۲۰۳۷۵۰	۵.۳۶	۰.۹۴	۵.۴۴	۱.۸۷	۴	
۱۰۰۰۰۰۰۰	۲.۱۴	۱.۲۱	۶.۲۳	۷.۸	۵	
۷۰۰۰۰۰	۷.۸	۱.۰۵	۶.۰۳	۲.۱۴	۶	
۳۵۰۰۰۰	۱.۷۱	۳.۵۸	۴.۰۸	۱.۷۱	۷	
۳۵۰۰۰۰	۸.۲	۳.۱۷	۱۳.۴۴	۲.۲۵	۸	
۶۶۶۶۶۶	۸.۷۹	۱.۸۷	۷.۶۷	۱.۶	۱	۷
۱۰۰۰۰	۱.۲۱	۱۰.۸۹	۴.۳	۱.۲۱	۲	
۵۰۰۰۰۰۰	۱۴.۳۲	۱۷.۵۹	۱۳.۴۴	۲.۵۲	۳	
۲۰۰۰۰	۵.۶۸	۶.۷۴	۶.۸۹	۱.۶	۴	
۱۵۰۰۰	۵.۷۲	۱.۹۸	۴.۱۵	۵.۷۲	۵	
۴۰۰۰۰۰	۱۲	۱۲.۴۶	۱۶.۳۸	۳.۲۳	۶	
۱۷۰۰۰۰	۲.۶۹	۲.۲۵	۳.۵۶	۲.۶۹	۷	
۱۰۰۰۰۰	۷.۸۷	۲.۸	۷.۸	۱۲.۰۷	۱	۸
۵۰۰۰۰	۲.۸	۱.۸۷	۲.۴۲	۲.۸	۲	
۳۰۰۰۰۰	۱۰.۵۶	۱.۶	۶.۶۹	۶.۴۳	۳	
۲۰۰۰۰۰	۲.۵۲	۸.۲	۱۱.۸۷	۶.۵۶	۴	
۵۰۰۰۰۰۰	۱۲.۴۶	۱.۴۹	۱۱.۵۴	۳.۸۴	۵	

(ارقام به تومان می‌باشند و خانه‌های پررنگ کنترل‌های مشترک بین دو یا چند ریسک می‌باشند.)

هزینه حادثه در ارتباط با شدت حادثه نیز مطابق مطالب بیان‌شده در فصل قبل به ۴ بخش تقسیم شد:

- **شدت حادثه ۰ تا ۳:**

هزینه دیه دامیه (جراحت سطحی با خونریزی) معادل یک‌صدم دیه کامل ۲۳۰۰۰۰۰ تومان و سایر هزینه‌های حادثه از قبیل استخدام نفر جدید، بررسی حادثه، ازکارافتادگی و ... صفر و یا قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند. لذا

Acost1= 2300000

- **شدت حادثه ۳ تا ۶:**

هزینه دیه شکستگی‌ها یک‌پنجم دیه آن عضو و به‌طور مثال برای پا یک‌دهم دیه کامل است. (۲۳۰۰۰۰۰۰ تومان) و برخی از هزینه‌ها از قبیل ازکارافتادگی در شکستگی‌ها ۱ ماه در نظر گرفته می‌شود و به‌طور متوسط ۲۰۰۰۰۰۰ تومان و هزینه پزشکی نیز ۱۰۰۰۰۰۰ تومان در نظر گرفته می‌شود. لذا،

Acost2= 26000000-2300000=23700000

• شدت حادثه ۶ تا ۹:

در این سطح مطابق جدول شدت حادثه نقص عضو کامل یک عضو در نظر گرفته می‌شود که به‌طور متوسط برای اعضای بدن جفتی نصف دیه کامل و هزینه‌های ازکارافتادگی ۱۵ ماه متوسط ۳۰۰۰۰۰۰۰ تومان، هزینه بررسی حادثه ۴۶۸۰۰۰ تومان، هزینه پزشکی ۵۰۰۰۰۰۰۰ تومان. لذا،

Acost3=195968000-26000000=16996800

• و در انتها شدت حادثه ۹ تا ۱۰:

هزینه دیه کامل و ازکارافتادگی ۳۰ ماه و سایر هزینه‌ها از قبیل دستمزد وقت تلف‌شده سایرین، جذب و استخدام نیروی جدید، آموزش، بررسی حادثه که محاسبه شده و در مجموع ۶۵۰۶۰۰۰ بالغ شده است. لذا،

Acost4=297506000-195968000=101538000

همچنین با توجه به بودجه ۲۰۰ میلیون تومانی در نظر گرفته‌شده برای ایمنی تعمیرات اساسی سالیانه که در ۴ ماه برنامه‌ریزی‌شده است لذا فرایند موردمطالعه که ۲ روز از این چهار ماه را شامل می‌شود حدوداً ۱/۶۰ بودجه یعنی ۳۳۳۳۳۳۳ تومان را می‌بایست مصرف کند.

۴- یافته‌ها

به‌منظور حل مسئله با در نظر گرفتن محدودیت بودجه و همچنین بدون در نظر گرفتن محدودیت بودجه از نرم‌افزار لینگو استفاده‌شده است.

۴-۱- حل مسئله با در نظر گرفتن محدودیت بودجه

همان‌گونه که در فصل گذشته مطرح شد مسئله ابتدا با در نظر گرفتن بودجه به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته شد. لذا جدول بهینه خروجی از نرم‌افزار که با محدودیت‌های تعریف‌شده کنترل‌های منتخب برای اجرا را مشخص نموده است به شرح جدول ۱۵ است:

۴-۲- حل مسئله بدون در نظر گرفتن بودجه

مسئله با فرض اینکه در بودجه محدودیت نباشد، حل شده است. به‌این‌ترتیب که تابع هدف به‌صورت جمع هزینه حادثه و هزینه کنترل‌ها نوشته شده و سعی در حداقل کردن این تابع هدف است. لذا جدول بهینه خروجی از نرم‌افزار که با محدودیت‌های تعریف‌شده و بدون محدودیت بودجه کنترل‌های منتخب برای اجرا را مشخص نموده است به شرح جدول ۱۶ است: (ارقام به تومان)

از حل مدل بدون محدودیت میزان بهینه سرمایه‌گذاری ایمنی حاصل می‌شود که در نمونه مذکور میزان سرمایه‌گذاری بهینه ۲۱۰۳۰۴۱۶ به‌دست‌آمده است و همان‌گونه که مشاهده می‌شود برخی کنترل‌ها بکار گرفته نشده‌اند.

۵- بحث و نتایج

در صنایع، تعارضاتی میان دیدگاه مدیران و مسئولان HSE (ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست) وجود دارد که عمدتاً ناشی از نگرش مدیران به ایمنی به‌عنوان یک هزینه و نگرش مسئولان HSEبه ایمنی به‌عنوان یک سرمایه‌گذاری است. این تحقیق با هدف یافتن نقطه بهینه ای برای سرمایه گذاری در حوزه ایمنی انجام شده است تا تعادل مناسبی بین این دو دیدگاه ایجاد کند.

به‌عبارت‌دیگر، میزان سرمایه‌گذاری در کنترل‌های ایمنی نباید آن‌قدر زیاد باشد که فرآیند تولید را غیراقتصادی کند و نه آن‌قدر کم که در صورت وقوع حادثه، هزینه‌های سنگینی به سازمان تحمیل شود؛ بنابراین، هدف اصلی این مقاله ارائه مکانیسمی به صنعت برای یافتن این

جدول ۱۵: نتیجه نهایی حل مدل با محدودیت بودجه

i	j	وضعیت انتخاب	*RPN* اولیه	*RPN* ثانویه	هزینه کنترل	هزینه حادثه
۱	1	1	315.88	145.91	667500	18544791
	2	1				
	3	0				
	4	1				
	5	0				
	6	1				
	7	0				
	8	0				
	9	1				
۲	1	1	343.98	162.84	100000	11314595
	2	0				
	3	1				
	4	1				
	5	1				
	6	0				
	7	0				
	8	0				
۳	1	1	216.22	106.02	770000	3239307
	2	0				
	3	0				
	4	1				
	5	1				
	6	1				
	7	1				
۴	1	1	466.09	172.53	607500	33538225
	2	1				
	3	1				
	4	0				
	5	0				
	6	0				
	7	1				
	8	1				
۵	1	0	483.62	295.91	1103750	35239031
	2	1				
	3	0				
	4	1				
	5	0				
	6	1				
	7	0				
۶	1	0	158.33	99.82	0	6851352
	2	1				
	3	0				
	4	1				
	5	0				
	6	0				
	7	0				
	8	1				
۷	1	0	225.72	143.92	45000	11857514
	2	1				
	3	0				
	4	1				
	5	1				
	6	0				
	7	0				
۸	1	0	85.92	85.92	0	4888000
	2	0				
	3	0				
	4	0				
	5	0				

جدول ۱۶: نتیجه نهایی حل مدل بدون محدودیت بودجه

i	j	وضعیت انتخاب	RPN اولیه	RPN ثانویه	هزینه کنترل	هزینه حادثه
۱	1	1	315.88	83.17	3184167	9550407
	2	1				
	3	1				
	4	1				
	5	1				
	6	1				
	7	1				
	8	1				
	9	1				
۲	1	1	343.98	115.7	800000	990872
	2	1				
	3	1				
	4	1				
	5	1				
	6	0				
	7	0				
	8	1				
۳	1	1	216.22	87.59	1070000	2546220
	2	0				
	3	1				
	4	1				
	5	1				
	6	1				
	7	1				
۴	1	1	466.09	103.4	2607500	17987405
	2	1				
	3	1				
	4	1				
	5	1				
	6	0				
	7	1				
	8	1				
۵	1	1	483.62	192.62	12103750	2831163
	2	1				
	3	1				
	4	1				
	5	0				
	6	1				
	7	1				
۶	1	0	158.33	70.6	0	701130.3
	2	1				
	3	1				
	4	1				
	5	1				
	6	0				
	7	1				
	8	1				
۷	1	0	225.72	93.52	615000	929635.4
	2	1				
	3	0				
	4	1				
	5	1				
	6	1				
	7	1				
۸	1	1	85.92	40.93	650000	2432738
	2	1				
	3	1				
	4	1				
	5	0				

نقطه بهینه و کاهش تعارضات بین مدیران و مسئولان ایمنی است.

به‌عنوان‌مثال، نتایج اجرای مدل در جدول ۱۶ نشان می دهد که با تخصیص بودجه‌ای معادل ۲۰۰ میلیون تومان برای اجرای اقدامات ایمنی در فرآیند تعمیرات اساسی یک منطقه و با تخصیص بهینه این بودجه به کنترل‌های پیشنهادی، به‌گونه‌ای که کمترین هزینه حادثه ایجاد شود، هنوز تفاوت معناداری بین هزینه حوادث و هزینه اجرای ایمنی مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که هزینه اختصاص‌یافته به اجرای کنترل ها باید افزایش یابد تا به نقطه بهینه نزدیک‌تر شویم.

همچنین، اجرای مدل بدون محدودیت بودجه نشان داد که برخلاف انتظار عمومی که افزایش سرمایه‌گذاری در ایمنی همواره منجر به کاهش هزینه حوادث می شود، افزایش سرمایه گذاری تنها تا یک حد مشخصی باعث کاهش هزینه‌های کلی شرکت می‌شود و پس‌ازآن، افزایش بیشتر سرمایه‌گذاری تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش هزینه حوادث نخواهد داشت. این یافته نشان می دهد که سرمایه گذاری در ایمنی باید بهینه و متناسب با شرایط سازمان باشد.

از سوی دیگر، نتایج نشان داد که کنترل‌های مشترک تعریف‌شده برای ریسک‌های مختلف معمولاً در اولویت پایه قرار دارند و مقدار یک را به خود اختصاص می دهند. این موضوع بیانگر این است که در سازمان‌ها باید تا حد امکان کنترل‌هایی تعریف شوند که بتوانند به‌صورت اشتراکی در کاهش چندین ریسک نقش‌آفرینی کنند؛ بنابراین، تخصیص بودجه به کنترل‌ها به‌گونه‌ای انجام می‌شود که سیستم به سمتی حرکت کند که همه اعداد اولویت ریسک ها به طور هم‌زمان کاهش یابند. به‌عبارت‌دیگر، کاهش یک درجه‌ای همه اعداد اولویت ریسک‌ها مطلوب‌تر از کاهش چند درجه‌ای تنها یکی از اعداد اولویت ریسک است.

در این تحقیق، به دلیل مواجهه با خطاهای انسانی در ارزیابی ریسک‌های ایمنی، محاسبه احتمال خطر و شدت خطر با دشواری همراه بود. به همین دلیل، از روش دلفی فازی و اعداد فازی استفاده شد. با بهره‌گیری از متغیرهای زبانی و نظرات خبرگان، هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم حوادث و همچنین ارزش‌گذاری هزینه‌های ناشی از یک حادثه با توجه به پیامدهای جانی و اعتباری برای سازمان‌ها محاسبه شد. ازآنجاکه محاسبه عدد ریسک تا حد زیادی به نظرات شخص ارزیاب وابسته است و با عدم قطعیت و واریانس خطای بالایی همراه است، از متغیرهای زبانی برای ارزیابی تأثیرات اجرای هر کنترل بر شدت اثر، احتمال وقوع و ضریب کشف در هر ریسک استفاده شد. در نهایت، با بهینه یابی و تخصیص بودجه به هر کنترل، کنترل‌های اجرایی مشخص و عدد اولویت ریسک محاسبه شد.

این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های فازی و بهینه یابی می‌تواند به سازمان‌ها کمک کند تا با تخصیص بهینه بودجه به کنترل‌های ایمنی، هم هزینه‌های حوادث را کاهش دهند و هم تعارضات بین مدیران و مسئولان ایمنی را به حداقل برسانند.

۶- قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از تمامی خبرگان، مدیران صنعت پالایشگاهی و استادان دانشگاهی که در فرآیند انجام این پژوهش همکاری و همراهی نمودند، ابراز می‌دارند.

۸- منابع

1. Halvani G.H. Occupational of safety, Tehran, Asare Sobhan publication. (2007). (In Persian)

2. Lupez-Alonso, M., Ibarrondo-Dovila, M.P., Rubio-Gumez, M.C., Munoz, T.G., The impact of health and safety investment on Construction Company costs. Saf. Sci. 60, 151-159.(2013) https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.06.013
3. Teo, A.L., Feng, Y., The indirect effect of safety investment on safety performance for building projects. Archit. Sci. Rev. 54 (1), 65-80.(2011) https://doi.org/10.3763/asre.2009.0090
4. Hallowell, M.R. Risk-based framework for safety investment in construction organizations. J. Constr. Eng. Manage. 137 (8), 592-599.(2010) https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000339
5. Tang, S.L., Lee, H.K., Wong, K.,. Safety cost optimization of building projects in Hong Kong. Constr. Manage. Econ. 15 (2), 177-186.(1997) https://doi.org/10.1080/01446199700000005
6. Lu, M., Cheung, C., Heng, L., Shu-Chien, H. (2016) Understanding the relationship between safety investment and safety performance of construction projects through agent-based modeling. Accident Analysis and Prevention, 94, 8–17 (2016). https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.05.014
7. Hu-Chen Liu, Long Liu, Nan Liu, Ling-Xiang Mao. Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment, Expert Systems with Applications 39, 12926-12934.(2012) https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.031
8. Jamshidi, A and Baradaran Kazemzadeh, R. A Fuzzy Cost-based FMEA Model. Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dhaka, Bangladesh. (2010).
9. Sandip Roy, Ankit Gupta, Safety investment optimization in process industry: A risk-based approach, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 63, (2020). https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104022
10. Jiansong Wu, Linlin Zhang, Yiping Bai, Genserik Reniers, A safety investment optimization model for power grid enterprises based on System Dynamics and Bayesian network theory, Reliability Engineering & System Safety, 22, (2022). https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108331
11. Xiaoxue Guo, Long Ding, Jie Ji, Valerio Cozzani, A cost-effective optimization model of safety investment allocation for risk reduction of domino effects, Reliability Engineering & System Safety, 225, (2022). https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108584
12. Nieto-Morotea A, Ruz-Vila F. A fuzzy approach to construction project risk assessment, International Journal of Project Management, 29: 220–231 (2011). https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.02.002
13. Zadeh, L. A. Fuzzy sets. Information and control, 8(3), 338-353.(1965)
14. Xu Z, Khoshgoftar T.M, Allen E.B. Application of fuzzy expert system in assessing operational risk of software, Information and Software Technology, 45(7): 373-388(2003). https://doi.org/10.1016/S0950-5849(03)00010-7
15. Mirsepassi, N., Toloie Eshlaghy, A., Memarzadeh, G.H., and Peidaie, M. Designing a of Human Resource Excellence Model in Iranian Public Sectors using the Fuzzy Delphi Technique, The Journal of Management and Economics, 21 (87), 1-22 (2010). (In Persian).
16. H. -C. Liu, X. -Q. Chen, J. -X. You and Z. Li, "A New Integrated Approach for Risk Evaluation and Classification With Dynamic Expert Weights" in IEEE Transactions on Reliability, vol. 70, no. 1, pp. 163-174, March 2021, https://doi.org/10.1109/TR.2020.2973403.
17. Rahimi, S., Nabibidhandi, Gh. R., Hoveidi, H., Amiri, M. J., 2025. Analyzing the causes of safety and environmental risks in petrochemical industries and providing human resources management solutions to adjust potential risks. *Emergency Management*, 14(3), 102-130. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.3.6.8.
18. Khodabandehlou, E. A., Hemmasi, A. H., Lahijanian, A., Hassani., A. H. and Mohammadi, A. 2025. Identification, Analysis and Ranking of Risks in Firemen's Occupational Accidents Using JSA and ANP Methods, Emergency Management, 14(1), 53-75, https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.1.3.1