ارزیابی ریسک با استفاده از روش FMEA مبتنی بر اصول تصمیم گیری چند معیاره (MCDM)، منطق فازی و تئوری خاکستری– مطالعه موردی جرثقیل‌های سقفی

محسن امیدوار*[۱] ، فرشته نیرومند[۲]

omidvar@razi.tums.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۲۴ *تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۱۶*

چکیده

مقدمه: روش FMEA یکی از روش‌های پر کاربرد در ارزیابی و اولویت بندی ریسک می‌باشد؛ لیکن به چندین دلیل، کاربرد آن در عمل دچار محدودیت می‌باشد. این مطالعه با هدف حذف این محدودیت‌ها، با استفاده از اصول منطق فازی و تئوری خاکستری در قالب اعداد z و روش تصویر خاکستری (GRP) انجام شد.

روش کار: مطالعه حاضر از نوع تحلیلی-مقطعی بوده که به منظور اولویت بندی ریسک‌های جرثقیل سقفی انجام گردید. ابتدا یک تیم FMEA متشکل از ۴ متخصص تشکیل گردید. سپس، نظرات تیم در قالب اعداد z جمع آوری شده و وزن هر یک از ریسک فاکتورها (S، O و D) با استفاده از روش فازی AHP تعیین شد. در نهایت، حالت‌های شکست با استفاده از روش GRP اولویت‌بندی گردیدند.

یافته ها: از ۱۳ مورد حالت شکست شناسایی شده، روش FMEA سنتی به ۷ مورد، اولویت یکسان داده و در نتیجه ۹ سطح ریسک تعیین شد. اما در روش پیشنهادی، محدودیت‌های FMEA حذف شده و در نتیجه ۱۳ اولویت به حالت‌های شکست اختصاص یافت.

نتیجه گیری: روش ارایه شده با اتکابه روش‌های AHP فازی،اعداد Z و GRP به ترتیب مشکل یکسان بودن وزن‌های مربوط به ریسک فاکتورها، عدم قطعیت موجود در داده‌ها (نظرات متخصصین) و اولویت بندی حالت‌های شکست را حذف نموده و نسبت به روش FMEA سنتی از توانایی بالاتری در اولویت بندی ریسک‌ها برخوردار می‌باشد.

کلمات کلیدی: *FMEA، عدد Z، روش AHP، روش GRP، منطق فازی*

۱- دکتری، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
۲- کارشناسی ارشد، محیط زیست، گرایش کنترل آلاینده ها، دانشگاه جامع علمی کاربردی، تهران، ایران

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

مقدمه

طی سالیان اخیر، روش‌های مختلفی برای ارزیابی ریسک توسعه یافته اند. یکی از این روش‌ها، شیوه حالت‌های شکست و تجزیه و تحلیل پیامد (FMEA) می‌باشد. این روش اولین بار، برای تجزیه و تحلیل سیستماتیک حالت‌های شکست و پیامدهای متعاقب آن‌ها در محصولات نظامی، به ویژه در صنعت هوانوردی مورد استفاده قرار گرفت (۱). مهم‌ترین هدف کاربرد روش FMEA، شناسایی حالت‌های شکست بالقوه در اجزای سیستم، تعیین علل، ارزیابی اثرات آن‌ها بر روی عمل‌کرد سیستم و نهایتا تعیین راه‌هایی است که بتوان شانس وقوع و پیامدها را کاهش و قابلیت تشخیص حالت‌های شکست را افزایش داد (۲). در روش سنتی (متداول) FMEA، از عدد اولویت ریسک (RPN) برای محاسبه ریسک حالات مختلف شکست سیستم استفاده می‌شود که خود RPN حاصل‌ضرب سه ریسک فاکتور احتمال وقوع (O)، شدت پیامد (S) و قابلیت تشخیص (D) می‌باشد (۳). بدیهی است هر چه مقدار RPN بالاتر باشد، میزان ریسک مرتبط با حالت شکست مد نظر نیز بیش‌تر می‌گردد. هدف از محاسبه RPN اولویت بندی حالت‌های شکست می‌باشد. علیرغم کاربرد وسیع، روش FMEA دارای نقص‌های عمده ای می‌باشد که کاربرد این روش را به خصوص زمانی که این روش به منظورآنالیز بحرانیت در محاسبه RPNs استفاده شود، محدود می‌کند. از جمله محدودیت‌های FMEA سنتی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

۱- اهمیت نسبی پارامترهای O، S و D در محاسبه RPN منظور نشده و وزن آن‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در کاربردهای واقعی،این موضوع می‌تواند محدودیت ایجاد کند (۴).

۲- ترکیب ریسک فاکتورهای مختلف می‌تواند منجر به RPN های یکسان شود، در حالی‌که ماهیت ریسک‌های ایجاد شده متفاوت می‌باشد (۵).

۳- تعیین دقیق ریسک فاکتورها (O، S و D) اغلب مشکل می‌باشد. اعضای تیم FMEA ممکن است برای ریسک فاکتورهای مشابه، ارزیابی‌های متفاوتی داشته باشند که برخی از آن‌ها ممکن است غیر دقیق، نامطمئن و ناقص باشند که به دلیل محدودیت زمانی، فقدان تجربه و داده‌های کافی ایجاد می‌شوند (۶).

۴- فرمول محاسباتی RPN مورد تردید بوده و دارای یک بنیه علمی قوی نمی‌باشد. به عبارتی دیگر، منطق خاصی در مورد علت ضرب نمودن O، S و D برای محاسبه RPN وجود ندارد (۶, ۷).

۵- ریسک فاکتورهای O، S و D بر اساس مقیاس‌های ترتیبی گسسته ارزیابی می‌شوند. این در حالی است که استفاده از عملیات ضرب برای مقیاسهای ترتیبی بی معنی می‌باشد. بنابراین نتایج به‌دست آمده، نه تنها بی معنی، بلکه گمراه کننده نیز می‌باشند(۸).

۶- RPNهای به‌دست آمده پیوسته نبوده و دارای فواصل خالی زیادی در مقیاس ۱ تا ۱۰۰۰ می‌باشند. علاوه بر این، میزان توزیع آن‌ها در قسمت‌های پایینی مقیاس ۱ تا ۱۰۰۰ شدیدتر می‌باشد. این موضوع می‌تواند باعث ایجاد مشکل در تفسیر نمودن اختلافهای بین RPNهای متفاوت گردد (۶).

۷- FMEA یک روش ارزیابی ریسک گروهی می‌باشد که تنها بر پایه نظرات شخصی یک نفر ارزیابی نمی‌شود. بنابراین گزارش استخراج مقدار واقعی هر یک از ریسک فاکتورها بر اساس نظر

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

گروهی مشکل می‌باشد (۹).

به منظور حل محدودیت‌های فوق الذکر، روش‌های مختلف ارزیابی نظیر روش اولویت بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل (TOPSIS)، تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، تجزیه و تحلیل پوششی داده‌ها (DEA)، روش آزمایشگاه سنجش و آزمون تصمیم‌گیری (DEMATEL) و روش‌های ترکیبی بر اساس FMEA در مقالات مختلف گزارش شده اند. Braglia، وهمکاران ازروش فازی تاپسیس برای رتبه بندی حالت‌های شکست استفاده نمودند. در این مطالعه، حالت‌های شکست به عنوان گزینه‌های مورد ارزیابی و ریسک فاکتورها به عنوان معیار انتخاب گردیدند. حالت‌های شکست بر اساس اندازه گیری فاصله اقلیدسی یک حالت شکست از هدف ایده آل اندازه گیری می‌شوند (۱۰). Chang و Sun از روش DEA به منظور بهبود ارزیابی روش FMEA بهره گرفتند، لیکن در این مدل از اعداد قطعی برای درجه بندی ریسک فاکتورها (بین ۱ تا ۱۰) استفاده شده است که یک محدودیت این روش می‌باشد (۱۱). هم چنین Liu و همکاران با استفاده از روش VIKOR، به اولویت بندی حالت‌های شکست اقدام نمودند. در واقع روش VIKOR اولویت بندی توافقی بین حالت‌های شکست را پیشنهاد می‌دهد (۶).

هر چند که روش‌های مختلفی جهت ارزیابی ریسک با استفاده از FMEA توسعه یافته اند، لیکن این واقعیت وجود دارد که نظرات هر یک از اعضای تیم FMEA با توجه به نوع تخصص و مهارت و پیشینه ذهنی، انواع مختلفی از عدم قطعیتها نظیر غیر دقیق بودن، مبهم بودن و نا کامل بودن نظرات در ارزیابی‌های ذهنی و کیفی افراد تیم وارد می‌شود. لذا یک نکته مهم در استفاده از FMEA، حل کردن مشکل انواع مختلف عدم قطعیت‌ها در ارزیابی حالت‌های خطا در مقابل ریسک فاکتورها می‌باشد. به همین جهت در این مطالعه، از عدد Z جهت حل این مشکل استفاده گردید. مفهوم عدد Z که توسط پروفسور زاده معرفی شد، مفهوم مناسب تری نسبت به اعداد فازی معمولی برای بیان اطلاعات دنیای واقعی می‌باشد. عدد Z یک زوج مرتب از اعداد فازی A وB می‌باشد که به صورت Z = (A,B) بیان می‌شود. A (بخش محدودیت) یک تخمین تقریبی از مقدار X و B (بخش قابلیت اطمینان) و یک تخمین تقریبی از عدم قطعیت A می‌باشد. به عنوان مثال در صورتی که نظر یکی از اعضای تیم FMEA در مورد پیامد یکی از حالت‌های شکست "خیلی زیاد" باشد، اما در مورد میزان اطمینان به نظر خود تردید داشته باشد و میزان اطمینان در مورد آن را "تا حدودی قطعی" بداند، می‌توان آن را به صورت ("تا حدودی قطعی"،"خیلی زیاد")Z= نشان داده و از روابط مربوطه به منظور کمی سازی نظر وی استفاده نمود (۱۲).

از آن‌جایی که در FMEA، اهمیت همه معیارها (ریسک فاکتورها) یکسان نمی‌باشد، لذا در این مطالعه از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی FAHP برای تعیین وزن معیارها (O، S و D) استفاده شد. AHP یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم گیری چند معیاره (MCDM) است که اولین بار توسط توماس ال. ساعتی، در دهه ۱۹۷۰ ابداع گردید. AHP، منعکس کننده رفتار طبیعی و تفکر انسانی است. این روش، هنگامی که عمل تصمیم گیری با چند گزینه و معیار تصمیم گیری روبهروست، می‌تواند استفاده گردد. معیارهای مطرح شده می‌تواند کمی و کیفی باشند. اساس این روش تصمیم گیری بر مقایسات زوجی نهفته

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

است. تصمیم گیرنده با فراهم ساختن درخت سلسله مراتب تصمیم گیری کار تحلیل را شروع می‌کند (۱۳).

یکی دیگر از مشکلات در زمینه ارزیابی ریسک، اطلاعات کم و ناقص می‌باشد. تئوری خاکستری که توسط دنگ مطرح گردید (۱۴)، یک ابزار ریاضیاتی مفید در برخورد با سیستم‌های حاوی اطلاعات ضعیف، ناقص و غیرقطعی می‌باشد. تجزیه و تحلیل ارتباط خاکستری (GRA) نوعی آنالیز کمی جهت ارزیابی متغیرهای موجود در یک مدل می‌باشد که می‌تواند ویژگی‌های مختلف یک مدل با مقادیر و واحدهای اندازه گیری فیزیکی متفاوت را پردازش نماید. GRA، اختلاف نسبت بین یک توالی مرجع و هر گونه توالی مقایسه ای را تعیین می‌کند. بنابراین با استفاده از GRA می‌توان متغیرهای مختلف را رتبه بندی نمود. با توجه به این ویژگی‌ها می‌توان از GRA جهت رتبه بندی حالت‌های نقص در FMEA استفاده نمود (۹, ۱۰). روش تصویر ارتباط خاکستری(GRP)که بر اساس GRA و تصویر ُبرداری، پایه گذاری شده است، به عنوان یکی از شاخه‌های تئوری ارتباط خاکستری، یکی از ابزارهای مفید جهت آنالیز ارتباط بین توالی‌های با اطلاعات خاکستری بوده و در بسیاری از حوزه‌های علمی کاربرد پیدا کرده است (۵, ۱۵). اما تلاش‌ها جهت ارزیابی ریسک حالت‌های شکست استفاده از این روش محدود می‌باشد. علاوه بر این روش GRA مورد استفاده جهت ارزیابی در FMEA، بر مبنای یک نقطه مرجع می‌باشد (گزینه ایده آل) در حالی که باید نسبت به دو نقطه مرجع (گزینه ایده آل مثبت و منفی) ارزیابی شوند (یکی برای معیارهای مثبت (D) و دیگری برای معیارهای منفی (O،S) (۵). به همین دلیل در این مطالعه، به جای روش GRA از شیوه GRP جهت اولویت‌بندی ریسک‌ها استفاده شد.

با توجه به مطالب فوق می‌توان هدف از این مطالعه را معرفی روشی به منظور ارزیابی ریسک بر مبنای روش FMEA در شرایط عدم قطعیت، در محیط فازی و خاکستری بیان نمود. به منظور نشان دادن کاربردی بودن روش ارایه شده، در این مطالعه از روش پیشنهادی جهت ارزیابی ریسک جرثقیل سقفی استفاده شد.

روش کار

این مطالعه از نوع مقطعی- تحلیلی بوده که جهت ارزیابی ریسک جرثقیل‌های سقفی بر مبنای روش FMEA در فضای فازی و خاکستری صورت گرفت. فرایند ارزیابی ریسک بر پایه روش پیشنهادی به شرح زیر می‌باشد:

۱. تشکیل تیم ارزیابی و شناسایی حالت‌های شکست

در این تحقیق، جامعه آماری شامل متخصصین شاغل در فرآیند بودد و به علت غیر تصادفی بودن انتخاب متخصصین، افراد مورد نظر به صورت غیر موردی و براساس تخصص و شرایط تعریف شده از متخصص (خبره) در این تحقیق و مطالعات قبلی در این حوزه انتخاب شدند (۱۶-۱۸). بر اساس توصیه‌های موجود درDyadem (۱۶)، تعداد مطلوب افراد تیم FMEA بین ۴ تا ۶ نفر می‌باشد. ملاک اصلی انتخاب خبره در این تحقیق سابقه کار (سابقه کار بیش از ۱۰ سال) و آشنایی با مفهوم ایمنی و ارزیابی ریسک می‌باشد، که بر این اساس چهار نفر از افراد فعال در فرآیند شامل یک کارشناس مکانیک، یک کارشناس مواد،

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

جدول ۱. متغیرهای مورد استفاده جهت وزن دهی تیم ارزیابی

متغیر	طبقه بندی	امتیاز
عنوان شغلی	سطح عالی آکادمیک (پروفسور)	۵
	سطح متوسط آکادمیک (استادیار)	۴
	مهندس	۳
	تکنسین	۲
	اپراتور (کارگر)	۱
تجربه (سال)	≥ ۳۰	۵
	۳۰-۲۰	۴
	۲۰-۱۰	۳
	۱۰-۵	۲
	≤ ۵	۱
سطح تحصیلات	دکترا	۵
	کارشناس ارشد	۴
	کارشناس	۳
	دیپلم	۲
	دبیرستان	۱
سن (سال)	۵۰<	۴
	۵۰-۴۰	۳
	۴۰-۳۰	۲
	۳۰>	۱

یک کارشناس ایمنی و یک اپراتور انتخاب شدند (۱۷). کارشناس مکانیک و مواد (متالوژی)در مورد علل نقص اجزای جرثقیل، اطلاعات تخصصی را ارایه داد، کارشناس ایمنی این اطلاعات را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و از نظر اپراتور، با توجه به تجربه کاری وی در زمینه حوادث اتفادق افتاده در محیط کار استفاده شد.سپس اعضای تیم، ۱۳ حالت شکست در مورد جرثقیل مورد ارزیابی را شناسایی نموده و علل و پیامد هر یک را تعیین کردند. به علت غیر همگن بودن افراد خبره در این تحقیق، چهار شاخص عنوان شغلی، تجربه، مدرک تحصیلی و سن، به عنوان متغیر وزن افراد خبره در ارزیابی دخیل گردیده (۱۸-۲۲) و به هریک از این افراد یک وزن اختصاص یافت (جدول ۱).

مشخصات افراد تیم ارزیابی در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲. مشخصات متخصصین تیم ارزیابی ریسک

متخصص	عنوان شغلی	تجربه(سال)	سطح تحصیلات	سن
E1	مهندس مکانیک	۱۲	فوق لیسانس	۳۶
E2	مهندس متالوژی	۱۶	فوق لیسانس	۳۸
E3	مهندس ایمنی	۱۱	لیسانس	۳۳
E4	اپراتور	۲۲	دیپلم	۴۵

۲. تعیین مقیاس ارزیابی ریسک فاکتورها برای روش سنتی

از آن‌جایی که هدف این مطالعه نشان دادن توانایی روش ترکیبی FMEA، GRP در محیط فازی نسبت به روش‌های GRA و سنتی می‌باشد،

جدول ۳. امتیاز دهی ریسک فاکتورها در روش سنتی (۳)

امتیاز	احتمال	شدت	قابلیت کشف
۱۰	فوق العاده زیاد (≤ ۱ در ۲)	خطرناک بدون هشدار	تقریبا غیر قطعی
۹	خیلی زیاد (۱ در ۳)	خطرناک با هشدار	خیلی بعید
۸	نقص‌های تکراری (۱ در ۸)	شدید	بعید
۷	زیاد (۱ در ۲۰)	زیاد	خیلی کم
۶	نسبتا زیاد (۱ در ۸۰)	قابل توجه	کم
۵	متوسط (۱ در ۴۰۰)	متوسط	متوسط
۴	نسبتا کم (۱ در ۲۰۰۰)	کم	نسبتا زیاد
۳	کم (۱ در ۱۵۰۰۰)	ناچیز	زیاد
۲	بعید (۱ در ۱۵۰۰۰۰)	خیلی ناچیز	خیلی زیاد
۱	تقریبا غیر ممکن (≤۱ در ۱۵۰۰۰۰)	هیچ	تقریبا قطعی

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

لذا ابتدا از اعضای تیم خواسته شد تا نظرات خود را در مورد هر یک از حالت‌های شکست در مقابل ریسک فاکتورها به صورت سنتی (استفاده از مقیاس ۱۰ واحدی ارزیابی برای متغیرهای O, S و D) (۳) بیان کنند (جدول ۳).

۳. *محاسبه مقدار R.P.N برای ارزیابی به روش سنتی FMEA*

در این مرحله جهت تعیین میزان ریسک هر یک از حالات شکست، از عدد اولویت ریسک (R.P.N) استفاده گردید. عدد R.P.N حاصل‌ضرب سه ریسک فاکتور احتمال (O)، شدت (S) و قابلیت کشف (D) می‌باشد (R.P.N=O×S×D).

۴. *تعریف اعداد Z برای ارزیابی به روش پیشنهادی و روش GRA*

در این مرحله، از اعداد فازی مثلثی (TFN) جهت بیان نظرات اعضای تیم متخصصین (DMs) در مورد اهمیت معیارها (ریسک فاکتورها) و ارزیابی گزینه‌ها (حالت‌های شکست) در مقابل معیارها و در قالب عدد Z = (A,B) استفاده شد (جدول ۴).

نظرات هر یک از اعضای تیم که در این مرحله در قالب اعداد فازی Z استخراج شده اند و در نهایت به عنوان ورودی ماتریس‌های W (ماتریس اوزان) و D (ماتریس ارزیابی گروهی حالت‌های شکست) قرار گرفتند.

۵. *تبدیل عدد Z به عدد فازی معمولی*

قبل از انجام محاسبات بر روی عدد Z نیاز است تا به عدد فازی معمولی تبدیل شود. برای این منظور، ابتدا قسمت دوم عدد Z (قابلیت اطمینان) با استفاده از رابطه (۱) غیرفازی شده و به قسمت اول (محدودیت) اضافه شده و در نهایت از رابطه (۲) جهت تبدیل عدد نامنظم Z (محدودیت وزن دهی شده) به عدد فازی معمولی استفاده می‌شود (۱۸).

$$\tilde{x}_0(\tilde{A}) = \frac{w,R_L^{O,S,D} + w,R_M^{O,S,D} + w,R_U^{O,S,D}}{3} \qquad (۱)$$

$$\tilde{\mu}'_z(x) = \tilde{\mu}'_A\left(\frac{x}{\sqrt{\alpha}}\right), x \in \sqrt{\alpha}X \qquad (۲)$$

۶. *تعیین وزن ریسک فاکتورها*

در این مرحله، با استفاده از روش آنالیز توسعه ای چانگ، وزن ریسک فاکتورها، محاسبه شد (۲۳). اوزان ریسک فاکتورهای به‌دست آمده

جدول ۴. اعداد Z مورد استفاده در ارزیابی حالت‌های شکست در مقابل ریسک فاکتورها

بخش محدودیت (A)												بخش قابلیت اطمینان (R)				
احتمال وقوع			شدت			قابلیت تشخیص										
متغیر زبانی	نماد		متغیر زبانی	نماد		متغیر زبانی	نماد		عدد فازی			متغیر زبانی	نماد		عدد فازی	
فوق العاده	EH		خطرناک، بدون	HNW		کاملا غیر قابل	AU		1	1	0	خیلی کم	VL	0	0.1	0.1
خیلی زیاد	VH		خطرناک،	HWW		خیلی بعید	VR		3	2	1	کم	L	0.1	0.2	0.3
نقص‌های	RF		شدید	E		بعید	R		4	3	2	کم تا	ML	0.2	0.4	0.5
زیاد	H		زیاد	MA		خیلی کم	VL		5	4	3	متوسط	M	0.4	0.5	0.7
نسبتا زیاد	MH		مهم	S		کم	L		6	5	4	متوسط تا	MH	0.5	0.7	0.8
متوسط	M		متوسط	MO		متوسط	MO		7	6	5	زیاد	H	0.7	0.8	1
نسبتا کم	RL		کم	L		نسبتا زیاد	MH		8	7	6	خیلی زیاد	VH	0.8	1	1
کم	L		جزئی	MIN		زیاد	H		9	8	7					
بعید	R		خیلی جزئی	VM		خیلی زیاد	VH		10	9	8					
تقریبا	NI		بدون اثر	N		تقریبا قطعی	AC		10	10	9					

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

در این مرحله جهت محاسبه وکتورهای ماتریس ارتباط خاکستری وزن دار (WGRM) در بخش ۵-۸ مورد استفاده قرار گرفتند.

۷. تبدیل امکان فازی به احتمال فازی

به‌دلیل این‌که نظرات ارایه شده توسط خبرگان در قالب اعداد فازی امکانی می‌باشند، جهت حصول اطمینان از سازگاری بین اعداد واقعی و امتیاز امکان فازی، نیاز است که ابتدا امکان فازی به احتمال فازی تبدیل گردد. بدین منظور از رابطه (۳) که توسط Onisawa (۲۴) ارایه شده است، استفاده گردید. در رابطه (۳)، FPs، امکان فازی و pr، احتمال فازی می‌باشد.

$$\mathrm{pr}=\begin{cases}\dfrac{1}{10^{\mathrm{k}}}, & \mathrm{FP_s}\neq 0\\ 0, & \mathrm{FPs}=0\\ \mathrm{K}=\left[\dfrac{1-\mathrm{FPs}}{\mathrm{FPs}}\right]^{1/3}*2.301\end{cases} \quad (۳)$$

۸. استفاده از روش تصویر ارتباط خاکستری (GRP) جهت اولویت بندی گزینه‌ها (حالت‌های شکست)

۸،۱. *تشکیل توالی مقایسه*: توالی مقایسه در ارزیابی به روش FMEA در واقع همان ماتریس ارزیابی گروهی حالت‌های شکست می‌باشد که مجموع نظرات اعضای تیم در مورد حالت‌های شکست در مقابل ریسک فاکتورها می‌باشد.

۸،۲. *تشکیل توالی مرجع*: همان‌گونه که قبلا بیان شد، در این مطالعه بر خلاف GRA که از یک نقطه مرجع استفاده می‌کند، دو نقطه مرجع (گزینه ایده آل مثبت و گزینه ایده آل منفی) به‌کار گرفته شد. طبیعی است که توالی‌های مرجع دو نقطه‌ای برای ریسک فاکتورهای O، S و D به ترتیب برابر با $X_0^+=(1,1,\dots,1)$ و $X_0^-=(10,10,\dots,10)$ می‌باشند.

۸،۳. *تعیین ماتریس‌های ارتباط خاکستری*: ابتدا ضریب ارتباط خاکستری مثبت $\left(\gamma_{ij}^{+}\right)$بین X_{ij} و X_0^+ و ضریب ارتباط خاکستری منفی $\left(\gamma_{ij}^{-}\right)$ بین X_{ij} و X_0^- به ترتیب،از طریق روابط (۴) و (۵) زیر محاسبه شدند:

$$\gamma_{ij}^{+}=\frac{\begin{matrix}min_{1\le i\le m}min_{1\le j\le n}|x_{0j}^{+}-x_{ij}|\\ +\xi max_{1\le i\le m}max_{1\le j\le n}|x_{0j}^{+}-x_{ij}|\end{matrix}}{|x_{0j}^{+}-x_{ij}|+\xi max_{1\le i\le m}max_{1\le j\le n}|x_{0j}^{+}-x_{ij}|} \quad (۴)$$

$$\gamma_{ij}^{-}=\frac{\begin{matrix}min_{1\le i\le m}min_{1\le j\le n}|x_{0j}^{-}-x_{ij}|\\ +\xi max_{1\le i\le m}max_{1\le j\le n}|x_{0j}^{-}-x_{ij}|\end{matrix}}{|x_{0j}^{-}-x_{ij}|+\xi max_{1\le i\le m}max_{1\le j\le n}|x_{0j}^{-}-x_{ij}|} \quad (۵)$$

که در رابطه فوق ζ ضریب تمایز خاکستری بوده و برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از γ_{ij}^{+} و γ_{ij}^{-} ماتریس‌های ارتباط خاکستری به صورت زیر ترسیم شدند (رابطه (۶)):

$$Y^{+}=\begin{bmatrix}\gamma_{11}^{+} & \gamma_{12}^{+} & \cdots & \gamma_{1n}^{+}\\ \gamma_{21}^{+} & \gamma_{22}^{+} & \cdots & \gamma_{2n}^{+}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \gamma_{m1}^{+} & \gamma_{m2}^{+} & \cdots & \gamma_{mn}^{+}\end{bmatrix}$$
$$Y^{-}=\begin{bmatrix}\gamma_{11}^{-} & \gamma_{12}^{-} & \cdots & \gamma_{1n}^{-}\\ \gamma_{21}^{-} & \gamma_{22}^{-} & \cdots & \gamma_{2n}^{-}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \gamma_{m1}^{-} & \gamma_{m2}^{-} & \cdots & \gamma_{mn}^{-}\end{bmatrix} \quad (۶)$$

که در رابطه (۶)، Y^{+} و Y^{-} به ترتیب ماتریس های ارتباط خاکستری بین هر یک از حالات شکست و توالی‌های مرجع مثبت و منفی می‌باشند.

۸،۴. *تشکیل ماتریس‌های ارتباط خاکستری وزن دار(WGRM)*: در این مرحله با استفاده از وزن‌های به‌دست آمده از هر یک از ریسک فاکتورها و ماتریس‌های ارتباط خاکستری، WGRM به صورت زیر به‌دست آمد (رابطه (۷)):

$$Y'^{+}=\begin{bmatrix}\overline{w}_1\gamma_{11}^{+} & \overline{w}_2\gamma_{12}^{+} & \cdots & \overline{w}_n\gamma_{1n}^{+}\\ \overline{w}_1\gamma_{21}^{+} & \overline{w}_2\gamma_{22}^{+} & \cdots & \overline{w}_n\gamma_{2n}^{+}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \overline{w}_1\gamma_{m1}^{+} & \overline{w}_2\gamma_{m2}^{+} & \cdots & \overline{w}_n\gamma_{mn}^{+}\end{bmatrix}$$
$$Y'^{-}=\begin{bmatrix}\overline{w}_1\gamma_{11}^{-} & \overline{w}_2\gamma_{12}^{-} & \cdots & \overline{w}_n\gamma_{1n}^{-}\\ \overline{w}_1\gamma_{21}^{-} & \overline{w}_2\gamma_{22}^{-} & \cdots & \overline{w}_n\gamma_{2n}^{-}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \overline{w}_1\gamma_{m1}^{-} & \overline{w}_2\gamma_{m2}^{-} & \cdots & \overline{w}_n\gamma_{mn}^{-}\end{bmatrix} \quad (۷)$$

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

که در رابطه فوق $\overline{w}_j$ وزن نرمال j اُمین ریسک فاکتور می‌باشد.

۸،۵. *محاسبه تصاویر ارتباط خاکستری (GRP):* در این مرحله GRPi اُمین حالت شکست بر روی توالی مرجع مثبت x_0^+ و منفی x_0^- از رابطه زیر تعیین شد (رابطه (۸)).

$$P_i^+ = \sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\overline{w}_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\overline{w}_j^2}} \times \gamma_{ij}^+\right)$$
$$P_i^- = \sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\overline{w}_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\overline{w}_j^2}} \times \gamma_{ij}^-\right) \quad (۸)$$

۸،۶. محاسبه تصویر خاکستری نسبی و اولویت بندی حالت‌های شکست: در مرحله نهایی نیز محاسبه تصویر نسبی(RP) از رابطه زیر صورت گرفته و حالت‌های شکست بر اساس آن اولویت بندی شدند(رابطه (۹)).

$$RP_i = \frac{P_i^+}{P_i^+ + P_i^-} \quad (۹)$$

یافته ها

پس از تشکیل تیم تصمیم گیری و تعیین ریسک فاکتورها و حالت‌های شکست توسط اعضای تیم، ازآنها خواسته شد تا نظرات خود را در مورد اهمیت ریسک فاکتورها و حالت‌های شکست به دو صورت، یکی به صورت ارزیابی سنتی FMEA (استفاده از مقیاس ۱۰ واحدی) و دیگری در قالب عدد Z بیان کنند. در جدول ۵ حالت‌های شکست مربوط به جرثقیل‌های سقفی، به همراه علل و پیامد آن‌ها مشاهده می‌شود.

حالت‌های شکست و علل و پیامد مربوط به

جدول ۵ . حالت‌های شکست و علل و پیامد مربوط به آن‌ها در ارزیابی ریسک جرثقیل سقفی

اجزاء جرثقیل	عنوان	علت نقص	پیامد
قسمت بالا کشنده (الکتروموتور)	FM1	جرثقیل توان کافی برای رساندن بار به سطح قابل قبول و یا بالا و پایین بردن بار به طورکامل را ندارد	آزاد شدن ناگهانی بار و سقوط
	FM2	سرعت بالا (باعث نوسان بار می‌شود)	نوسان بار و احتمال برخورد با افراد و تجهیزات مجاور
زنجیرها	FM3	استرس بیش ازحد	پاره شدن زنجیر و سقوط بار و آسیب رسیدن به تجهیزات و اپراتور
	FM4	پوسیدگی زنجیر	پاره شدن زنجیر و سقوط بار و آسیب رسیدن به تجهیزات و اپراتور
	FM5	پیچ و مهره‌های شل	باز شدن تدریجی و رها شدن زنجیر از داخل هوک
چرخ و یا پولی ها	FM6	خمیدگی پولی ها	ممانعت از حرکت جرثقیل به صورت طولی و رها شدن مجموعه جرثقیل از داخل ریل
مجموعه قلاب	FM7	زنگ زدگی قلاب‌ها	شکستن قلاب ها و رها شدن بار
	FM8	شکستن مهره ها	رها شدن و سقوط بار
بخشهای گردان	FM9	عدم تحمل وزن بار	رها شدن و سقوط بار
چرخ دنده ها	FM10	حرکت سخت در نتیجه پوسیدگی مواد	کاهش راندمان تولید و احتمال دست‌کاری توسط اپراتور فاقد صلاحیت
کشنده جرثقیل و موتور	FM11	در هم پیچیدگی کابل‌های برق	زخمی شدن کابل‌ها و سرایت جریان به داخل جرثقیل و احتمال برق گرفتگی
	FM12	نقص در ترمز	برخورد با پد انتهایی و خارج شدن جرثقیل از داخل ریل
منبع تامین برق	FM13	آسیب عایق ها	سرایت جریان به داخل جرثقیل و احتمال برق گرفتگی

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

جدول ۶. ارزیابی حالتهای شکست در مقابل ریسک فاکتورها

حالت شکست	اعضا تیم	احتمال (O)			شدت (S)			قابلیت کشف (D)			حالت شکست	احتمال (O)			شدت (S)			قابلیت کشف (D)		
		عدد قطع	عدد Z		عدد قطعی	عدد Z		عدد قطعی	عدد Z			عدد قطعی	عدد Z		عدد قطعی	عدد Z		عدد قطعی	عدد Z	
		نرخ	R	A	نرخ	R	A	نرخ	R	A		نرخ	R	A	نرخ	R	A	نرخ	R	A
FM1	DM1	۸	H	RF	۸	VH	MIN	۸	H	R	FM8	۳	VH	L	۵	H	S	۵	VH	MO
	DM2	۷	VH	H	۹	H	VM	۷	H	VL		۳	VH	L	۵	VH	S	۵	VH	MO
	DM3	۷	H	H	۸	VH	MIN	۸	VH	R		۳	VH	R	۴	VH	MA	۴	VH	MH
	DM4	۸	VH	RF	۷	VH	L	۸	H	R		۳	VH	L	۵	H	S	۵	H	MO
FM2	DM1	۲	VH	R	۸	H	MIN	۱	VH	AC	FM9	۳	H	L	۵	VH	S	۵	VH	H
	DM2	۲	H	R	۹	VH	VM	۱	H	AC		۲	VH	R	۵	VH	S	۵	MH	VH
	DM3	۱	VH	NI	۹	VH	VM	۱	MH	AC		۲	VH	R	۴	H	MA	۳	VH	H
	DM4	۲	VH	R	۸	VH	MIN	۱	VH	AC		۳	VH	L	۵	VH	S	۲	H	VH
FM3	DM1	۹	H	VH	۹	VH	VM	۸	VH	R	FM10	۲	VH	R	۳	H	E	۳	H	H
	DM2	۹	VH	VH	۹	VH	VM	۶	VH	L		۱	VH	NI	۲	M	HWW	۲	H	VH
	DM3	۸	VH	RF	۱۰	H	N	۷	VH	VL		۱	H	NI	۲	VH	HWW	۲	VH	VH
	DM4	۸	VH	RF	۸	VH	MIN	۶	H	L		۱	VH	NI	۳	VH	E	۱	VH	AC
FM4	DM1	۸	VH	RF	۱۰	VH	N	۸	VH	R	FM11	۴	H	RL	۵	VH	S	۱	MH	AC
	DM2	۸	VH	RF	۹	VH	VM	۷	H	VL		۳	VH	L	۴	VH	MA	۲	VH	VH
	DM3	۹	MH	VH	۸	H	MIN	۸	H	R		۳	VH	L	۵	VH	S	۱	VH	AC
	DM4	۸	H	RF	۹	H	VM	۸	MH	R		۳	MH	L	۵	VH	S	۱	H	AC
FM5	DM1	۵	H	M	۸	H	MIN	۱۰	VH	AU	FM12	۲	H	R	۳	VH	E	۲	VH	VH
	DM2	۶	MH	MH	۹	VH	VM	۹	VH	VR		۲	VH	R	۳	VH	E	۱	H	AC
	DM3	۵	VH	M	۹	VH	VM	۹	MH	VR		۱	VH	NI	۳	H	E	۳	VH	H
	DM4	۵	VH	M	۸	VH	MIN	۱۰	VH	AU		۲	VH	R	۲	VH	HWW	۲	H	VH
FM6	DM1	۳	MH	L	۶	VH	MO	۵	H	MO	FM13	۳	H	L	۴	H	MA	۳	VH	H
	DM2	۳	VH	L	۵	VH	S	۵	VH	MO		۳	H	L	۲	MH	HWW	۳	VH	H
	DM3	۳	VH	L	۵	H	S	۴	H	MO		۲	VH	R	۳	VH	E	۲	VH	VH
	DM4	۲	H	R	۶	VH	MO	۵	H	MO		۳	H	L	۳	VH	E	۳	VH	H
FM7	DM1	۵	VH	M	۵	VH	S	۳	VH	H										
	DM2	۵	VH	M	۴	H	MA	۳	MH	H										
	DM3	۴	MH	RL	۵	H	S	۳	VH	H										
	DM4	۴	VH	RL	۵	H	S	۲	H	VH										

آن‌ها با توجه به نظر اعضای تیم ارزیابی و منابع معتبر منتشر شده در این حوزه (۱۷) انتخاب گردیدند. هم‌چنین جدول ۶ ارزیابی اعضای تیم در مورد هر یک از حالت‌های شکست در مقابل ریسک فاکتورها را نشان می‌دهد.

جدول ۷، وزن سه ریسک فاکتور احتمال (O)، شدت (S) و قابلیت کشف (D) را نشان می‌دهد.

علاوه براین مقدار RPN و RPi برای حالت‌های شکست به صورت زیر محاسبه شد (جدول ۸).

نتایج حاصل از مقایسه ارزیابی به روش سنتی FMEA (محاسبه RPN)، روش تحلیل ارتباط خاکستری (GRA) و روش پیشنهادی در این مقاله (روش تصویر ارتباط خاکستری (GRP)) نیز در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۷. وزن ریسک فاکتورها (O، S، D)

ریسک فاکتور	احتمال (O)	شدت(S)	قابلیت تشخیص(D)
وزن	۰/۳۲۲	۰/۴۵۵	۰/۲۲۲

بحث

مطالعات متعددی گواه بر محدودیت‌های روش FMEA سنتی در ارزیابی و اولویت بندی ریسک می‌باشند (۳-۱۰). همان طور که در بخش مقدمه ذکر گردید، سه مشکل اساسی در ارزیابی ریسک به روش FMEA، به ترتیب شامل ۱- در نظر گرفتن وزن‌های یکسان برای هر یک از ریسک فاکتورها (شدت، احتمال و قابلیت شناسایی)، ۲- بیان امتیاز هر یک از حالت‌های نقص در مقابل ریسک فاکتورها به صورت عددی (بین ۱ تا ۱۰) و ۳- اولویت بندی ریسک‌ها بر اساس عدد R.P.N می‌باشد که در برخی از مواقع ممکن است این اعداد با هم یکسان بوده و یا در صورت داشتن فاصله کم از یک‌دیگر، الویت بندی ریسک‌ها با مشکل مواجه شود. بدین منظور، در این مطالعه جهت برطرف نمودن محدودیت‌های روش FMEA در ارزیابی و اولویت بندی حالت‌های شکست، از تئوری فازی و خاکستری استفاده شد. جهت حذف مشکل یکسان بودن وزن‌های مربوط به ریسک فاکتورها در روش سنتی، از روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شد. هم چنین جهت برطرف نمودن مشکل

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

جدول ۸ . نتایج ارزیابی حالتهای شکست به روش سنتی و پیشنهادی

حالت شکست	FM1	FM2	FM3	FM4	FM5	FM6	FM7	FM8	FM9	FM10	FM11	FM12	FM13
O	۸	۲	۹	۹	۶	۳	۵	۳	۳	۲	۴	۲	۳
S	۹	۹	۱۰	۱۰	۹	۶	۵	۵	۵	۳	۵	۳	۴
D	۸	۱	۸	۸	۱۰	۵	۳	۵	۳	۳	۲	۳	۳
RPN	۵۷۶	۱۸	۷۲۰	۷۲۰	۵۴۰	۹۰	۷۵	۷۵	۴۵	۱۸	۴۰	۱۸	۳۶
Rpi	۰,۳۰۵	۰,۴۳۸	۰,۲۷۵	۰,۲۸۳	۰,۳۱۴	۰,۴۸۲	۰,۴۹۱	۰,۵۰۵	۰,۵۲۶	۰,۶۱۷	۰,۵۱۳	۰,۶۰۳	۰,۵۷۷

جدول ۹. مقایسه نتایج ارزیابی ریسک جرثقیل های سقفی به روش سنتی، GRA و GRP

حالت شکست	روش سنتی (RPN)		روش تحلیل ارتباط خاکستری (GRA)		روش تصویر ارتباط خاکستری (GRP)	
	RPN	اولویت	DR	اولویت	RPi	اولویت
FM1	۵۷۶	۲	۰,۳۸۱	۲	۰,۳۰۵	۳
FM2	۱۸	۹	۰,۷۲۶	۹	۰,۴۳۶	۵
FM3	۷۲۰	۱	۰,۳۶۲	۱	۰,۲۷۶	۱
FM4	۷۲۰	۱	۰,۳۶۲	۱	۰,۲۸۳	۲
FM5	۵۴۰	۳	۰,۳۸۹	۳	۰,۳۱۲	۴
FM6	۹۰	۴	۰,۵۶۵	۴	۰,۴۸	۶
FM7	۷۵	۵	۰,۵۸۴	۵	۰,۴۹۲	۷
FM8	۷۵	۵	۰,۵۸۴	۵	۰,۵۰۴	۸
FM9	۴۵	۶	۰,۶۳۸	۶	۰,۵۲۵	۱۰
FM10	۱۸	۹	۰,۷۳۴	۱۰	۰,۶۱۷	۱۳
FM11	۴۰	۷	۰,۶۴۹	۷	۰,۵۱۳	۹
FM12	۱۸	۹	۰,۷۳۴	۱۰	۰,۶۰۳	۱۲
FM13	۳۶	۸	۰,۶۶۲	۸	۰,۵۷۷	۱۱

عدم قطعیت موجود در داده‌ها (نظرات متخصصین) از توابع عضویت فازی مثلثی در قالب اعداد Z بهره گرفته شد. علاوه بر این جهت اولویت بندی حالت‌های شکست از روش تصویر ارتباط خاکستری (GRP) استفاده شد. جهت نشان دادن برتری روش ارایه شده نسبت به روش‌های موجود، حالت‌های شکست موجود در جرثقیل‌های سقفی توسط روش پیشنهاد شده، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند.

یکی از دلایل بالا بودن مقدار اهمیت ریسک فاکتور شدت (W_S=۰/۴۵۵) نسبت به ریسک فاکتورهای احتمال و قابلیت کشف در جدول ۷، بالا بودن وخامت صدمات وارده به پا و قسمتهای پایینی بدن، در صورت سقوط بار می‌باشد. از سوی دیگر، ریسک فاکتور احتمال به دلیل شیوع زیاد حوداث ناشی از جرثقیل‌ها اهمیت دوم (W_O =۰/۳۲۲) را به خود اختصاص داده است. کمیسیون ایمنی و بهداشت انگلیس (HSC) سایتهای ساخت و ساز را با نرخ بروز دو حادثه در هفته و نرخ مرگ و میر ۶ حادثه به ازای ۱۰۰ هزار کارگر به عنوان یکی از حادثه خیزترین فعالیتهای صنعتی معرفی نموده است (۲۵). هم چنین به ازای ۴۶۲۴ حادثه گزارش شده در طی ۵ سال، ۸۶۱ حادثه در طی عملیات لیفت بار توسط جرثقیل‌ها رخ داده بودند، این در حالی است که جرثقیل‌ها تا حدود دو سوم از مرگ های ساخت و ساز و تعمیرات و نگهداری را به خود اختصاص داده‌اند (۲۶). هم چنین دلیل پایین بودن اهمیت ریسک فاکتور قابلیت

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

کشف (W_D=۰/۲۲۲) نسبت به دو ریسک فاکتور دیگر بر اساس نظر متخصصین، مجهز بودن این تجهیزات به وسایل شناسایی خطر و هم چنین بازدیدهای روزانه از وسایل لیفتینگ می‌باشد و به همین دلیل، فاکتور قابلیت کشف کمترین وزن را به خود اختصاص داده است. از طرفی دیگر، همان‌گونه که از جدول ۹ مشاهده می‌شود، رتبه بندی حالت‌های شکست با استفاده از روش سنتی و روش GRA تقریبا مشابه یکدیگر بوده و دارای اولویت‌بندی‌های یکسان برای برخی از حالت‌های شکست می‌باشند (بجز در مورد FM10 و FM12 که به ترتیب در روش سنتی اولویت نهم و در روش GRA دهم را به خود اختصاص داده اند). این در حالی است که در روش پیشنهادی در این تحقیق (GRP)، حالت‌های شکست، به دقت و با توجه به اهمیت ریسک فاکتورها و ارزیابی متخصصین از حالت‌های شکست، رتبه بندی شده اند و هر کدام دارای یک اولویت اختصاصی (بین ۱ الی ۱۳) می‌باشند. در روش پیشنهادی، تنها در صورتی دو حالت شکست رتبه بندی یکسان کسب می‌کنند که اهمیت ریسک فاکتورها با یکدیگر مساوی بوده و ارزیابی اعضای تیم از حالت‌های شکست دقیقا با یکدیگر مشابه باشد، در غیر این‌صورت رتبه بندی‌ها یکسان نخواهند بود. علاوه بر این، حالت شکست FM3 (استرس بیش از حد) بدترین سناریو را به خود اختصاص داده است که پیامد آن پاره شدن زنجیر و سقوط بار و آسیب رسیدن به تجهیزات واپراتور (مرگ) وی می‌باشد. بدیهی است که این سناریو بایستی اولین اولویت را به خود اختصاص دهد که این موضوع با نتایج به‌دست آمده در جدول ۹ مطابقت دارد. در این مورد، نتایج هر سه روش (روش سنتی، GRA و پیشنهادی) یکسان بوده و هر سه روش اولویت اول را به این حالت شکست اختصاص داده اند. دلیل آن هم این است که چهار عضو تیم ارزیابی در روش ارزیابی سنتی برای FM3 برای ریسک فاکتورهایO، S و D به ترتیب اعداد (۹، ۹، ۸، ۸) برای احتمال وقوع، (۹، ۹، ۱۰، ۸) برای شدت و (۸، ۶، ۷، ۶) برای قابلیت شناسایی را بیان کرده اند و در نهایت عدد اولویت ریسک برابر ۷۲۰ ارزیابی شده است، نتایج ارزیابی به روش پیشنهادی نیز از این الگو تبعیت می‌کند، ولی در مورد سایر حالت‌های شکست نتایج ارزیابی با یکدیگر متفاوت می‌باشد. یک مورد جالب توجه در حالت‌های شکست، FM7 و FM8 می‌باشد. در این مورد اگر چه اعداد ارزیابی مربوط به ریسک فاکتورها برای FM7 و FM8 در روش سنتی به ترتیب برابر با (O=3 , S=5 , D=5) و (O=5 , S=5 , D=3) می‌باشد، لیکن اعداد RPN به‌دست آمده برای هر دو حالت شکست برابر با ۷۵ می‌باشد. این در حالی است که با توجه به نظر تیم متخصصین اهمیت هر سه ریسک فاکتور (O، S و D) یکسان نمی‌باشد. با توجه به این موضوع در روش پیشنهادی FM7 اولویت ۷ و FM8 اولویت ۸ را تعیین نموده است. علت این موضوع نیز بالا بودن نسبت اهمیت ریسک فاکتور احتمال (W_O =۰/۳۲۲) نسبت به قابلیت کشف (W_D =۰/۲۲۲) می‌باشد. مورد قابل توجه بعدی حالت‌های شکست، FM10، FM2 و FM12 می‌باشند. اگر چه RPN به‌دست آمده برای هر سه حالت شکست یکسان می‌باشد، لیکن عدد اختصاص داده شده به ریسک فاکتورها در هر سه مورد متفاوت می‌باشد. از آنجایی که این حالت‌های شکست در اولویت‌های آخر واقع شده اند و از اهمیت کمی برخوردار هستند، اگر این حالت برای اولویت‌های اول بهوجود آید، روش سنتی FMEA قادر به تفکیک و اولویت‌بندی این‌گونه ریسک‌ها نمی‌باشد. همان‌گونه که در جدول ۹ مشاهده می‌شود FM10 و FM12 دارای اعداد ریسک فاکتور مشابه (O=2 , S=3 , D=3)

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

می‌باشند، این در حالی است که FM2 که دارای عدد شدت ۹ (S=9) می‌باشد، نیز در روش سنتی دارای اولویتی مشابه با ریسک فاکتورهای FM10 و FM12 هستند، در حالی که دارای شدت بالایی می‌باشد. روش پیشنهادی، این مشکل را با در نظر گرفتن وزن‌های اختصاص داده شده به ریسک فاکتورها حل نموده و اولویت ۵ را به FM2 اختصاص داده است. در مورد FM10 و FM12 نیز با در نظر گرفتن مجموع فازی نظرات و هم چنین اختصاص عدد Z برای بیان نظرات، این دو حالت شکست از یک‌دیگر تفکیک داده شده و FM10 و FM12 به ترتیب اولویت‌های ۱۳ و ۱۲ را کسب کرده اند.

یکی دیگر از مزایای روش پیشنهادی در این مطالعه، استفاده از مجموعه‌های فازی برای حل مشکل عدم قطعیت موجود در نظرات می‌باشد. این مشکل توسط اعداد Z برطرف گردید. فرد ارزیاب بر اساس این اعداد، نظر خود را در مورد اهمیت ریسک فاکتورها و هم چنین مقایسه حالت‌های شکست در مقابل ریسک فاکتورها با استفاده از اصطلاحات کلامی (و نه به صورت اعداد قطعی) بیان می‌کند. از آنجایی که افراد، استفاده از این اصطلاحات را نسبت به اعداد قطعی ترجیح می‌دهند، لذا استفاده از عدد Z ، ضمن ایجاد سهولت در استخراج نظر متخصصین، با استفاده از توابع عضویت فازی، خطای موجود در بیان نظرات را به حداقل رسانده و میانگین فازی نظرات را مبنای ارزیابی قرار می‌دهد. به عنوان مثال در مورد FM11 (در هم پیچیدگی کابل‌های برق)، عضو پنجم تیم ارزیابی (DM5) برای ریسک فاکتورهای O، S و D به ترتیب $Z_O = (L, MH)$، $Z_S = (S, VH)$ و $Z_D = (AC, H)$ را ارایه داده است، به این معنا که احتمال بروز FM۱۱ از نظر وی پایین می‌باشد ولی از لحاظ اطمینان به این اظهار نظر، نظر خود را تا "حدود متوسط" می‌داند، و این در حالی است که به نظر خود زیاد هم مطمئن نمی‌باشد. ولی در مورد ریسک فاکتور شدت نظر خود را "شدید" اعلام نموده و اطمینان وی نسبت به این پاسخ بسیار بالاست. هم چنین در مورد ریسک فاکتور قابلیت کشف نیز نظر خود را "تقریبا قطعی" اعلام نموده و اطمینان خود را به این پاسخ بالا اظهار کرده است. پس از ارایه نظر فرد ارزیاب، با استفاده از روابط ۷ و ۸، عدد Z، به عدد فازی معمولی تبدیل شده و در نهایت غیرفازی می‌شود. بنابراین، بر خلاف سایر روش‌های ارزیابی FMEA که توان مداخله عدم قطعیت نظرات در مورد ریسک فاکتورها و حالت‌های شکست را ندارند، استفاده از اعداد Z در این مطالعه، این مشکل را برطرف نموده است.

نتیجه گیری

در این مطالعه روشی پیشنهاد داده شد تا بتواند مشکلات موجود در FMEA سنتی را مرتفع نموده و یک توالی منطقی برای اولویت بندی ریسک ارایه نماید. از روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی فازی جهت حذف مشکل یکسان بودن وزن‌های مربوط به ریسک فاکتورها در روش سنتی استفاده شد. جهت برطرف نمودن مشکل عدم قطعیت موجود در داده‌ها (نظرات متخصصین) از توابع عضویت فازی مثلثی در قالب اعداد Z استفاده شد. هم چنین، جهت اولویت بندی حالت‌های شکست از روش تصویر ارتباط خاکستری (GRP) استفاده گردید. به منظور نشان دادن برتری روش ارایه شده نسبت به روش‌های موجود، حالت‌های شکست موجود در جرثقیل‌های سقفی توسط روش پیشنهاد شده، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان دادند، روش پیشنهادی توانایی اولویت بندی ریسک‌ها و حذف محدودیت‌های ذکر شده در روش FMEA سنتی را دارا می‌باشد. به طور

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

کلی، نقاط قوت این مطالعه در مقابل سایر روش‌های ارایه شده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- اختصاص وزن‌های مختلف به ریسک فاکتورها (O،S،D) از طریق روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی فازی
- لحاظ نمودن مشکل عدم قطعیت در داده‌ها از طریق تئوری فازی (استفاده از عدد Z)
- در نظر گرفتن گزینه‌های ایده ال برای معیارهای مثبت (D) و منفی (O وS)

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله کمال تشکر و قدردانی را از راهنمایی‌های اساتید گروه بهداشت حرفه‌ای دانشگاه علوم پزشکی تهران دارند.

REFERENCES

1. Bowles JB, Peláez CE. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. Reliability Engineering & System Safety. 1995;50(2):203-13.
2. Stamatis DH. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution: ASQ Quality Press; 2003.
3. Liu H-C, Liu L, Liu N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. Expert systems with applications. 2013;40(2):828-38.
4. Chanamool N, Naenna T. Fuzzy FMEA application to improve decision-making process in an emergency department. Applied Soft Computing. 2016;43:441-53.
5. Zhang X, Jin F, Liu P. A grey relational projection method for multi-attribute decision making based on intuitionistic trapezoidal fuzzy number. Applied Mathematical Modelling. 2013;37(5):3467-77.
6. Liu H-C, Liu L, Liu N, Mao L-X. Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. Expert Systems with Applications. 2012;39(17):12926-34.
7. Kutlu AC, Ekmekçioğlu M. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. Expert Systems with Applications. 2012;39(1):61-7.
8. Yang J, Huang H-Z, He L-P, Zhu S-P, Wen D. Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using Dempster–Shafer evidence theory under uncertainty. Engineering Failure Analysis. 2011;18(8):2084-92.
9. Wang Y-M, Chin K-S, Poon GKK, Yang J-B. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. Expert systems with applications. 2009;36(2):1195-207.
10. Braglia M, Frosolini M, Montanari R. Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis. International Journal of Quality & Reliability Management. 2003;20(4):503-24.
11. Chang D-S, Paul Sun K-L. Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA. International Journal of Quality & Reliability Management. 2009;26(6):629-43.
12. Zadeh LA. A note on Z-numbers. Information Sciences. 2011;181(14):2923-32.
13. Tavana M, Zareinejad M, Di Caprio D, Kaviani MA. An integrated intuitionistic fuzzy AHP and SWOT method for outsourcing reverse logistics. Applied Soft Computing. 2016;40:544-57.
14. Julong D. Introduction to grey system theory. The Journal of grey system. 1989;1(1):1-24.
15. Zheng G, Jing Y, Huang H, Gao Y. Application of improved grey relational projection method to evaluate sustainable building envelope performance. Applied Energy. 2010;87(2):710-20.
16. Press D. Guidelines for Failure Mode and Effects

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

Analysis (FMEA), for Automotive, Aerospace, and General Manufacturing Industries: CRC Press; 2003.
17. Mandal S, Maiti J. Risk analysis using FMEA: Fuzzy similarity value and possibility theory based approach. Expert Systems with Applications. 2014;41(7):3527-37.
18. Mirza S, Omidvari M, Lavasani SMRM. The application of Fuzzy logic to determine the failure probability in Fault Tree Risk Analysis. Safety promotion and injury prevention (Tehran). 2014;2(2):113-23.
19. Renjith V, Madhu G, Nayagam VLG, Bhasi A. Two-dimensional fuzzy fault tree analysis for chlorine release from a chlor-alkali industry using expert elicitation. Journal of hazardous materials. 2010;183(1):103-10.
20. Ramzali N, Lavasani MRM, Ghodousi J. Safety barriers analysis of offshore drilling system by employing Fuzzy Event Tree Analysis. Safety science. 2015;78:49-59.
21. Lavasani SM, Ramzali N, Sabzalipour F, Akyuz E. Utilisation of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) for quantified risk analysis of leakage in abandoned oil and natural-gas wells. Ocean Engineering. 2015;108:729-37.
22. Shi L, Shuai J, Xu K. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks. Journal of hazardous materials. 2014;278:529-38.
23. Keprate A, Ratnayake RC. Enhancing offshore process safety by selecting fatigue critical piping locations for inspection using Fuzzy-AHP based approach. Process Safety and Environmental Protection. 2016;102:71-84.
24. Onisawa T. An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. Fuzzy sets and Systems. 1988;27(2):87-103.
25. Sertyesilisik B, Tunstall A, McLouglin J. An investigation of lifting operations on UK construction sites. Safety science. 2010;48(1):72-9.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]

Risk assessment using FMEA method and on the basis of MCDM, fuzzy logic and grey theory: A case study of overhead cranes

Mohsen Omidvar [1]*, Fereshteh Nirumand [2]

[1] Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[2] M.Sc., Department of Pollution Control, School of Environmental Engineering , Ghalat Ghaem Branch, Applied Sciences and Technology University, Tehran, Iran

Abstract

Introduction: FMEA method is one of the most used techniques in risk assessment and prioritization. But, due to several reasons, its application has been limited to the real-world settings. The aim of this study was to deal with these restrictions using the combined fuzzy (in terms of the Z-numbers) and grey (in terms of the grey relational analysis) theories.

Material and Method: The current study is an analytical cross-sectional survey that was performed to prioritize the failure modes of the overhead cranes. Initially, an FMEA team including 4 specialists was established. Then, the opinions of the team members were gathered in terms of the Z-numbers and the weights of the risk factors (O، S, and D) were determined using the fuzzy AHP method. Finally, the failure modes were prioritized using the GRP method.

Result: From 13 cases of the identified failure modes, the conventional FMEA was assigned equal priority to the 7 cases and as a result 9 risk priorities were determined. But, in the proposed method, because of the elimination of the restrictions of conventional FMEA, 13 risk priorities were assigned to the failure modes.

Conclusion: Relying upon the fuzzy AHP, Z-numbers and GRP method, the proposed method dealt with the equal weights of the risk factors, fuzziness of the data (expert's judgments) and the prioritization of the failure modes. The proposed method has more capabilities in relation to the conventional FMEA for prioritization of the failure modes.

Key words: *FMEA, Z Numbers, AHP, GRP, Fuzzy Theory*

* Corresponding Author Email: *m-omidvar@razi.tums.ac.ir*

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-04-03]