

پیش‌بینی و تحلیل حالات خرابی و شکست با استفاده از اعداد راف و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری

زهره طهماسبی آبدر¹، علیرضا شهرکی^{2*}

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
- 2- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

پذیرش: 98/3/12

دریافت: 97/5/15

چکیده

یکی از ابزارهای پرکاربرد برای شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های موجود در محیط‌های صنعتی، تولیدی و خدماتی روش تجزیه و تحلیل حالات‌های شکست و آثار آن، تجزیه و تحلیل حالات‌های شکست و آثار آن، است. تجزیه و تحلیل حالات‌های شکست و آثار آن سنتی کاستی‌های بسیاری دارد؛ از این رو، پژوهش‌های بسیاری در راستای افزایش عملکرد تجزیه و تحلیل حالات‌های شکست و آثار آن انجام شده است. در این پژوهش برای مقابله با کمبودهای تجزیه و تحلیل حالات‌های شکست و آثار آن سنتی، روش جدیدی برای بیان اطلاعات مبهم و ذهنی از اعداد راف و یک روش توسعه‌یافته تحلیل رابطه خاکستری (GRA) با عنوان روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری (GRP) برای اولویت‌بندی حالات‌های بالقوه شکست استفاده شده است. در روش پیشنهادی، ارزیابی عوامل ریسک توسط اعضای تیم تجزیه و تحلیل حالات‌های شکست و آثار آن با استفاده از اعداد راف مدل‌سازی شده است و سپس روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری، اولویت‌های حالات شکست را تعیین می‌کند. برای نشان دادن کارکرد روش پیشنهادی، مثالی برای رتبه‌بندی حالات‌های شکست و مقایسه مدل پیشنهادی استفاده شده است. رویکرد جدید با در نظر گرفتن وزن عوامل ریسک و استفاده از

یک روش اولویت‌بندی با استفاده از روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری، بر کاستی‌های روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی مثل ضرب عوامل ریسک و مقادیر ناپیوسته حاصل از آن و بی‌توجهی به وزن عوامل ریسک غلبه کرده است. روش پیشنهادی با پوشش دادن ابهام و عدم قطعیت در قضاوت‌های متخصصان به اولویت‌بندی مؤثرتر و دقیق‌تر ریسک دست می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که رتبه‌بندی معقول‌تر و دقیق‌تری با استفاده از ترکیب اعداد راف و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری برای تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن در مقایسه با تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی حاصل شده است.

واژگان کلیدی: ارزیابی ریسک؛ تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن (FMEA)؛ نظریه مجموعه راف؛ روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری (GRP).

1- مقدمه

مفهوم ریسک و ارزیابی ریسک دارای تاریخچه‌ای طولانی است. بیش از 2400 سال پیش، آنتی‌ها توانایی‌های خود در ارزیابی ریسک قبل از تصمیم‌گیری را نشان دادند [1]. با این حال، ارزیابی ریسک و مدیریت ریسک به عنوان یک رشته علمی جوان به حساب آمده و بیش از 30-40 سال سن ندارد. از این دوره می‌بینیم که برای اولین بار مجلات علمی، مقالات و کنفرانس‌ها، ایده‌ها و اصول اساسی در مورد نحوه مناسب ارزیابی و مدیریت ریسک را پوشش می‌دهند [2، ص 1].

ارزیابی ریسک یکی از ارکان مدیریت ریسک بوده و با توجه به ماهیت نامطمئن پروژه‌ها و لزوم صرف بهینه منابع دارای اهمیت زیاد است. هدف از ارزیابی ریسک، اندازه‌گیری ریسک‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف از قبیل میزان تأثیر و احتمال وقوع است. رتبه‌بندی ریسک‌ها، قسمت کلیدی این فرآیند محسوب می‌شود؛ زیرا با انجام عملیات رتبه‌بندی، ارجحیت هر ریسک در مقایسه با سایر ریسک‌ها مشخص و در نتیجه، امکان برنامه‌ریزی میزان تخصیص منابع موجود برای مقابله با هر ریسک فراهم می‌شود [3].

ارزیابی ریسک روش‌های مختلفی دارد. روش‌های متداول آن عبارت‌اند از: تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات ناشی از (FMEA)، تجزیه و تحلیل حالات بحرانی خطا و اثرات ناشی آن FMECA، تجزیه و تحلیل خطرات مرتبط با فرآیند (قابلیت

عملیات خطر¹) و تجزیه و تحلیل درختی خطرات (FTA) که معتبرترین آن‌ها تکنیک تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن است که توسط ارتش آمریکا جهت مدیریت ریسک و کاهش اثرات بلایای طبیعی و غیرطبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد [4، صص 32-36]

تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن برای اولین بار به‌عنوان یک روش طراحی رسمی در سال 1960 توسط صنعت هوافضا، قابلیت اطمینان و ایمنی مورد نیاز خود را توسعه داده است [5، صص 203-213]. هدف اصلی تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن شناسایی حالت‌های بالقوه، ارزیابی دلایل و اثرات حالت‌های شکست مختلف و آنچه می‌تواند شانس شکست را حذف کرده یا کاهش دهد، است. نتایج تجزیه و تحلیل می‌تواند به تحلیل‌گر برای شناسایی و تصحیح حالت‌های شکست، که تأثیر زیان‌آوری در سیستم دارد، کمک کند و عملکرد آن را در طول مراحل طراحی و تولید بهبود بخشد. از آن جهت که تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن تحت عنوان یک ابزار حمایتی برای طراحان معرفی می‌شود، در طیف گسترده‌ای از صنایع شامل صنایع فناوری پزشکی، مکانیکی، شیمیایی، الکترونیکی، هسته‌ای، خودرو، هوافضا مورد استفاده قرار گرفته است [6، صص 113-129]

به‌طور رایج، ارزیابی و ریسک‌پذیری در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن به روش اولویت ریسک RPN² انجام می‌شود. تقریباً اکثر تحقیقات انجام‌شده در این حوزه، با استفاده از این روش و مشتقات و ترکیبات آن انجام گرفته است؛ بدین معنی که به دلیل پیچیدگی و نقص‌های فراوان این روش، محققان سعی در اصلاح و بهبود آن با انواع روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره داشته‌اند. لیو و همکارانش در مطالعات خود مروری بر تحقیقات گذشته در زمینه تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن داشته‌اند. آن‌ها 75 مقاله تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن چاپ شده بین سال‌های 1992 تا 2012 را در مجله‌های بین‌المللی بررسی و مرور کرده و مقالات را بر اساس روش‌های جایگزین مورد استفاده در جهت غلبه بر محدودیت‌های روش RPN سنتی طبقه‌بندی می‌کنند [7، صص 828-838]. روش‌های معرفی‌شده در این راستا

1. HAZOP

2. Risk Priority Number

شامل تصمیم‌گیری چند معیاره مثل تاپسیس¹ [8]، فرایند تحلیل سلسله مراتبی² [9]، راه حل توافقی و بهینه سازی چند معیاره³ [10]، تحلیل پوششی داده‌ها⁴ [11]، دیمتل⁵ (dematel) [12]، برنامه‌ریزی ریاضی، هوش مصنوعی و ترکیباتی از آن‌ها است. یانگ و همکارانش در مطالعه خود تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن را با استفاده از نظریه گواه دمپستر شافر⁶ تحت شرایط عدم قطعیت مورد بررسی قرار داده‌اند [13، صص 2084-2092]. ژانگ و چو نیز در مطالعه خود، اولویت‌بندی ریسک در تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی و شکست تحت شرایط عدم قطعیت، نظریه مجموعه‌های فازی را برای نشان دادن RPN مورد استفاده قرار می‌دهند [14، صص 206-214]. چانگ و همکاران نیز به مطالعه تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن با استفاده از نظریه خاکستری می‌پردازند [15، صص 211-216]. لیو و همکارانش در پژوهش خود تحت عنوان پیش‌بینی و تحلیل حالات خرابی و شکست با استفاده از اعداد پویا و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری روش ارزیابی ریسک تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن را با استفاده از اعداد پویا و روش اولویت‌بندی طرح‌ریزی رابطه خاکستری به بوته آزمون گذاشته‌اند [16، صص 4670-4679]. بعلاوه در منابع داخلی بسیاری نیز مشاهده می‌شود که راهکارهای جدید بسیاری برای روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن مورد استفاده قرار گرفته است؛ از این موارد می‌توان به رتبه‌بندی حالات بالقوه زیان‌آور با استفاده از تحلیل خوشه‌ای فازی [17، صص 68-93]، تجزیه و تحلیل حالات و اثرات خرابی و شکست با استفاده از عملگرهای ترکیبی تعمیم‌یافته [18، صص 1-10]، بررسی روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن با استفاده از تحلیل پوششی داده‌های فازی [19] و به‌کارگیری مدل تلفیقی از تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی برای تکنیک تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن [20] اشاره کرد.

همان‌طور که در منابع مختلف مشاهده می‌شود، یک مسئله کلیدی در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن رسیدگی به انواع مختلفی از عدم قطعیت‌ها

1. The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
 2. The analytic hierarchy process
 3. Vikor
 4. Data envelopment analysis
 5. Decision making trial and evaluation laboratory technique
 6. Dempster-Shafer

در ارزیابی حالت‌های شکست با توجه به عوامل ریسک است. یکی از کاستی‌های قابل توجه در روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن این است که عوامل ریسک معمولاً به‌سختی به‌طور دقیق تعیین می‌شوند. نظرات اعضای تیم تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن در برخی شرایط ممکن است به دلیل محدودیت زمانی و کمبود تجربه و داده، اطلاعاتی مبهم، ناقص و نامطمئن را فراهم کند [16، ص 4671].

ارزیابی حالت‌های شکست در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن با استفاده از نظریه رابطه خاکستری¹ در منابع مختلف انجام شده است [21، صص 4403-4415]. روش بهبودیافته‌ای از نظریه رابطه خاکستری، روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری² به‌عنوان یک ابزار تجزیه و تحلیل رابطه بین دنباله‌ها و اطلاعات خاکستری در بسیاری از زمینه‌ها استفاده شده است. علاوه بر این، روش رابطه خاکستری بر پایه یک نقطه مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ در حالی که روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری بر اساس دو نقطه‌ایده آل مثبت و ایده آل منفی به تجزیه و تحلیل نتایج می‌پردازد [22، صص 3467-3477؛ 23، صص 710-720].

از این رو، در این پژوهش برای مقابله با کاستی‌های روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی و عدم قطعیت‌های موجود در تصمیم‌گیری، از یک روش گروهی مجموعه اعداد راف و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری برای ارزیابی حالت‌های بالقوه شکست بر اساس عوامل ریسک استفاده می‌شود. نظریه مجموعه‌های راف، یک روش تحلیل داده‌کاوی است که توسط محقق لهستانی به نام پاولاک در سال 1982 معرفی شده است [24]. روش بهبودیافته رابطه خاکستری، یعنی طرح‌ریزی رابطه نیز برای اولویت‌بندی حالت‌های بالقوه شکست استفاده می‌شود. مدل پیشنهادی بر کمبودهای روش RPN سنتی غلبه کرده و چارچوب جدیدی برای اولویت‌بندی حالت‌های شکست در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن ارائه می‌کند.

در نهایت، یک مطالعه موردی سیستم سوپاپ بخار در نیروگاه تولید نوع A برای نشان دادن عملی بودن مدل پیشنهادی تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن ارائه شده است. بخش‌های دیگر مقاله بدین شرح است: در قسمت دوم، مروری کوتاه

1. Grey relational analysis
2. GRP

بر تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی و کمبودهای اصلی آن انجام شده است. مفاهیم اساسی مجموعه اعداد راف در قسمت سوم و در بخش چهارم رویکرد جدید پیشنهادی تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن براساس تلفیق اعداد راف و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری، در قسمت پنجم ارائه شده است. سپس در قسمت ششم با ارائه یک مثال و اعمال روش پیشنهادی بر آن، عملی بودن رویکرد پیشنهادی نشان داده شده است. در بخش هفتم، برخی از نتایج حاصل و نمونه‌های از پیشنهادها برای تحقیقات آینده در بخش هشتم ارائه شده است.

2- تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن

2-1- تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی

تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن یک روش تجزیه و تحلیل برای تعریف، شناسایی و حذف شکست‌های شناخته شده و یا شکست‌های بالقوه، مشکلات، خطاها و غیره از سیستم، طراحی، فرآیند یا خدمات قبل از رسیدن به دست مشتریان است [25]. تکنیک تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن به تحلیل گران ریسک کمک می‌کند تا هر حالت شکست احتمالی را شناسایی کرده و اثر هر شکست را تعیین کند. این روش به آن‌ها کمک می‌کند تا ریسک حالات شکست شناسایی شده را به ترتیب اهمیت، رتبه‌بندی کنند و همچنین به آنان کمک می‌کند تا اقدامات اصلاحی مناسب برای کاهش احتمال شکست را در نظر بگیرند، احتمال نرخ شکست را کاهش دهند و از حوادث خطرناک جلوگیری نمایند. جزئیات روش‌ها برای انجام تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن و برنامه‌های مختلف در [25؛ 26، صص 69-85] مستند شده است.

به منظور رتبه‌بندی ریسک حالات شکست بالقوه، تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی عدد اولویت ریسک (RPN) را برای تعیین اولویت‌های ریسک حالات شکست استفاده می‌کند. RPN یک رابطه ریاضی از عوامل ریسک، شدت (S)، وقوع (O) و تشخیص (D) از یک حالت شکست است که به صورت معادله زیر است:

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

در معادله (1)، S و O نشان‌دهنده فراوانی و جدیت اثر حالت شکست است و D احتمال کشف شکست قبل از آن که به دست مشتری برسد، را نشان می‌دهد. هر یک از این سه عامل ریسک توسط اعضای تیم تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن با استفاده از مقیاس‌های عددی 1 تا 10 ارزیابی می‌شوند که به صورت جدول‌های 1 تا 3 [13]، صص 2084-2092؛ 27، صص 1768-1779] بیان شده است. حالت‌های شکست با مقدار RPN بیشتر مهم‌تر از دیگر حالت‌های شکست تشخیص داده می‌شوند و باید با اولویت بالاتری نسبت به دیگر حالت‌های شکست مورد توجه قرار گیرند و اصلاح شوند.

جدول 1 شدت اثر ریسک در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن (Severity) [7، صص 829-830]

رتبه	اثر	شدت اثر
10	خطرناک بدون هشدار	شدت اثر تأسف بار است، مانند مرگ یا تخریب کامل
9	خطرناک با هشدار	شدت اثر تأسف بار است، اما همراه با هشدار
8	شدید	شدت اثر بسیار شدید است و غیرقابل جبران، مثل نقص عضو
7	زیاد	شدت اثر زیاد است، مانند سوختگی بدن
6	قابل توجه	شدت اثر قابل توجه است
5	در حد متوسط	شدت اثر در حد متوسط است، مانند ضرب‌دیدگی
4	کم	شدت اثر کم است، ولی بیشتر افراد آن را احساس می‌کنند، مانند نشت جزئی گاز
3	جزئی	ریسک، اثری جزئی برجای می‌گذارد، مانند خراش دست
2	خیلی جزئی	اثر خیلی جزئی دارد
1	هیچ	بدون اثر

جدول 2 احتمال وقوع ریسک در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن (Occurrence) [7، صص 829-830]

رتبه	احتمال وقوع ریسک	نرخ‌های احتمالی ریسک
10	بسیار زیاد: ریسک تقریباً اجتناب‌ناپذیر است	1 در 2 یا بیشتر از آن
9	خیلی زیاد	1 در 3
8	ریسک‌های تکراری	1 در 8
7	زیاد	1 در 20
6	به‌طور متوسط زیاد	1 در 80
5	در حد متوسط	1 در 400
4	نسبتاً کم	1 در 2000
3	کم	1 در 15000
2	بعید	1 در 150000
1	تقریباً غیرممکن	کمتر از 1 در 1500000

جدول 3 احتمال کشف ریسک در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن
(Detection) [7، صص 829-830]

رتبه	قابلیت کشف	معیار: احتمال کشف ریسک
10	عدم قطعیت مطلق	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت پس‌از آن غیرممکن است
9	بسیار بعید	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت‌های پس‌از آن بسیار بعید است
8	بعید	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت‌های پس‌از آن بعید است
7	خیلی کم	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت‌های پس‌از آن خیلی کم است
6	کم	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت‌های پس‌از آن کم است
5	متوسط	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت‌های پس‌از آن متوسط است
4	در حد متوسط	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت‌های پس‌از آن در حد متوسط است
3	زیاد	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت‌های پس‌از آن زیاد است
2	خیلی زیاد	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت‌های پس‌از آن خیلی زیاد است
1	تقریباً مطمئن	احتمال کشف و شناسایی ریسک و حالت‌های پس‌از آن قطعی است

2-2- کاستی‌های روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن

روش RPN سنتی به‌طور قابل‌توجهی در تحقیقات گذشته موردانتقاد قرار گرفته است [28، صص 61-67؛ 29، صص 2012-2030؛ 30، صص 986-1004؛ 31، صص 1047-1066] که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر است:

- اهمیت نسبی میان عوامل ریسک O، S و D در نظر گرفته نمی‌شود و وزن آن‌ها به‌صورت یکسان در محاسبات مدنظر قرار می‌گیرد؛
- ترکیب‌های مختلفی از عوامل ریسک ممکن است یک مقدار یکسان از RPN را تولید کنند؛ درحالی‌که ممکن است پیامدهای ریسک هرکدام به‌صورت پنهان کاملاً متفاوت باشد. این حالت ممکن است موجب هدر رفت منابع و زمان گردد یا در برخی موارد ممکن است حالات شکست پرخطر نادیده گرفته شود؛
- عوامل ریسک معمولاً به‌سختی به‌طور دقیق تعیین می‌شوند. نظرات اعضای تیم تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن در برخی شرایط ممکن است به دلیل

محدودیت زمانی و کمبود تجربه و داده موجب فراهم آمدن اطلاعاتی مبهم، ناقص و نامطمئن شود؛

▪ فرمول ریاضی برای محاسبه مقدار RPN قابل‌بحث است و مبنای کامل علمی ندارد. در واقع، هیچ منطقی که چرا O، S و D باید برای تولید RPN ضرب شوند، وجود ندارد؛

▪ سه عامل ریسک O، S و D با توجه به مقیاس‌های ترتیبی گسسته ارزیابی می‌شوند، اما این محاسبه ضرب در مقیاس ترتیبی بی‌معنی است؛

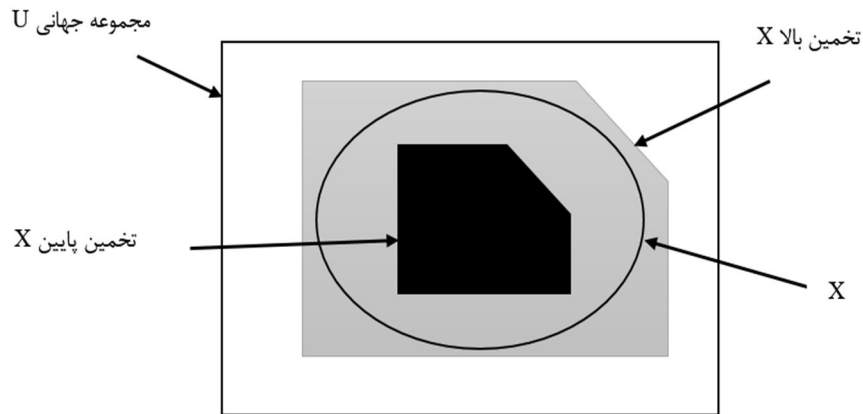
▪ RPN ها پیوسته نیستند. این امر عامل ایجاد مشکلاتی در تفسیر معنای تفاوت میان RPN ها است.

3- نظریه مجموعه راف و اعداد راف

نظریه مجموعه اعداد راف یک ابزار ریاضی هوشمند است که توسط محقق لهستانی به نام پاوالاک در سال 1982 برای محیط‌های مبهم و نادقیق معرفی شد [32]. نظریه مجموعه راف به بررسی اطلاعات مبهم و ذهنی بدون هیچ پیش فرضی می‌پردازد. در نظریه مجموعه راف هر مفهوم مبهم می‌تواند به شکل یک جفت از مفاهیم دقیق بر پایه تخمین بالا و تخمین پایین ارائه شود که در شکل 1 نشان داده شده است [33].

مزیت اصلی نظریه راف این است که به اطلاعات اضافی داده‌ها نظیر تابع احتمال و توابع عضویت در نظریه فازی نیاز ندارد. این نظریه با مجموعه‌ها و روابط بین آن‌ها سروکار دارد [34].

تخمین پایین X در شکل 1 مجموعه‌ای از همه‌ی عضوهای است که می‌توانند قطعاً متعلق به X باشند؛ درحالی‌که تخمین بالا شامل مجموعه‌ای از اعضای X است که نمی‌توان با اطمینان مشخص کرد که متعلق به X هستند یا نه [35، صص 1-47]. فرض کنید که U مجموعه جهانی شامل همه‌ی اعضا است. یک منطقه مرزی از X در U شامل اعضایی است که نمی‌توانند هم عضو مجموعه X باشند و هم عضو این مجموعه نباشند. این مفاهیم پایه‌ای از نظریه مجموعه راف می‌تواند برای اعمال نفوذ بر نظرات انسانی مبهم و ذهنی گسترش یابد [36، صص 613-624].



شکل 1 نمایش مفاهیم مربوط به نظریه مجموعه راف [32]

فرض کنید که یک مجموعه n عضوی از نظرات انسانی $R = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ ، به ترتیب به این شیوه که $C_1 < C_2 < \dots < C_n$ و Y یک مجموعه از اعضا دلخواه U است. تخمین پایین C_i ، تخمین بالای C_i و منطقه مرزی به صورت زیر تعریف شده‌اند:

تخمین پایین

$$\underline{Apr}(C_i) = U\{Y \in U/R(Y) \leq C_i\} \quad (1)$$

تخمین بالا

$$\overline{Apr}(C_i) = U\{Y \in U/R(Y) \geq C_i\} \quad (2)$$

منطقه مرزی

$$\begin{aligned} Bnd(C_i) &= U\{Y \in U/R(Y) \neq C_i\} \\ &= \{Y \in U/R(Y) > C_i\} \\ &\cup U\{Y \in U/R(Y) < C_i\} \end{aligned} \quad (3)$$

بنابراین، عضو C_i می‌تواند توسط یک عدد راف نمایش داده شود که توسط حد پایین $\underline{lim}(C_i)$ و حد بالای آن $\overline{lim}(C_i)$ به صورت زیر تعریف شده است:

$$\underline{lim}(C_i) = \frac{1}{N_L} \sum R(Y) | Y \in \underline{Apr}(C_i) \quad (4)$$

$$\overline{lim}(C_i) = \frac{1}{N_U} \sum R(Y) | Y \in \overline{Apr}(C_i) \quad (5)$$

N_L و N_U ، به ترتیب، تعداد اعضای را که در تخمین بالا و تخمین پایین C_i قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهند. اولویت‌ها و قضاوت‌های ذهنی انسان می‌تواند به صورت شکل بازه‌ای راف براساس حد پایین $\underline{lim}(C_i)$ و حد بالا $\overline{lim}(C_i)$ بیان شود. فاصله منطقه مرزی، میزان دقت را نشان می‌دهد. عدد راف با فاصله منطقه مرزی کمتر به عنوان یک عدد دقیق‌تر بیان می‌شود. قضاوت انسانی در شکل عدد راف و فاصله منطقه مرزی توسط معادلات زیر بیان شده است:

عدد راف

$$RN(C_i) = [\overline{lim}(C_i) \cdot \underline{lim}(C_i)] \quad (6)$$

فاصله منطقه مرزی

$$IBR(C_i) = \overline{lim}(C_i) - \underline{lim}(C_i) \quad (7)$$

عملیات استاندارد ریاضی در مجموعه اعداد راف نیز به صورت زیر است:

$$RN_1 + RN_2 = (L_1 \cdot U_1) + (L_2 \cdot U_2) = (L_1 + L_2 \cdot U_1 + U_2) \quad (8)$$

$$RN_1 \times K = (L_1 \cdot U_1) \times K = (KL_1 \cdot KU_1) \quad (9)$$

$$RN_1 \times RN_2 = (L_1 \cdot U_1) \times (L_2 \cdot U_2) = (L_1 \times L_2 \cdot U_1 \times U_2) \quad (10)$$

که در آن $RN_1 = (L_1 \cdot U_1)$ و $RN_2 = (L_2 \cdot U_2)$ دو عدد راف هستند و K عدد ثابت است که $K \neq 0$.

عملیات راف زدایی اعداد راف و تبدیل آن‌ها به عدد کریسپ نیز با کمک معادله زیر انجام می‌گردد:

$$RD_i = (1 - \lambda) \underline{\lim}(C_i) + \lambda \overline{\lim}(C_i) \quad (11)$$

که در آن، λ شاخص خوش‌بینی ($0 \leq \lambda \leq 1$) است. اگر تصمیم‌گیرندگان خوش‌بین باشند، شما می‌توانید یک مقدار بزرگ‌تر $\lambda \geq 0/5$ را انتخاب کنید. اگر تصمیم‌گیرندگان بدبین باشند، مقدار λ باید یک مقدار کوچک‌تر $\lambda < 0/5$ انتخاب شود. اگر تصمیم‌گیرندگان گرایشی میانه داشته باشند، به عبارت دیگر نه خوش‌بین و نه بدبین باشند، λ مقدار مشخص $0/5$ انتخاب می‌شود [37، ص 407].
نظریه مجموعه راف عدم قطعیت را با تخمین بالا و تخمین پایین بیان می‌کند و می‌تواند قضاوت‌های ذهنی و مبهم متخصصان را حتی اگر اندازه مجموعه داده‌ها کوچک باشد یا توزیع آن مشخص نباشد، بررسی کند [35، صص 1-47].

4- روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری

نظریه خاکستری توسط دنگ در سال 1982 مطرح شده است. نظریه خاکستری بر این فرض استوار است که یک سیستم نامطمئن است و اطلاعات مربوط به سیستم برای ساخت یک تجزیه و تحلیل رابطه‌ای یا برای ساخت یک مدل برای توصیف کافی نیست [38].

تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری در نظریه خاکستری به عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل کمی برای ارزیابی گزینه‌ها است. تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری تفاوت بین یک دنباله مرجع با هر دنباله نسبی از متغیرها را تعیین می‌کند. از این رو، الگوریتم

تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری می‌تواند گزینه‌های مختلف را رتبه‌بندی نماید [22]، ص 3471].

بر اساس روش تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری و طرح‌ریزی برداری، روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری (GRP) توسعه داده شده است. ارزش طرح‌ریزی بر پایه تولید نرم و کسینوس زاویه بین گزینه تصمیم‌گیری و گزینه ایده آل بیان شده است. مزیت‌های اصلی روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری آن است که نتایج به دست آمده بر اساس داده‌های اصلی است و محاسبه آن ساده و قابل اعتماد است [23، ص 712].

5- رویکرد جدید تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن بر اساس تلفیق اعداد راف و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری

با توجه به پیشینه روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی و محدودیت‌های روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن که در بخش دوم بیان شد، روش‌های انعطاف‌پذیر بسیاری برای رتبه‌بندی حالت‌های ریسک در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی جدید بر پایه اعداد راف و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری مطرح شده است. مجموعه اعداد راف برای قضاوت‌های ذهنی تصمیم‌گیرندگان و عدم قطعیت موجود در فضای ارزیابی حالت‌های شکست پیشنهاد شده است. روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری نیز برای اولویت‌بندی حالت‌های ریسک استفاده می‌شود. روش پیشنهادی، مشکلات ناشی از ضرب اعداد کریسپ در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی را حل می‌کند.

روش پیشنهادی در دو گام اصلی بیان می‌شود. گام اول، تعیین وزن عوامل ریسک S، O و D است. گام دوم، ارزیابی حالت‌های ریسک با استفاده از روش راف طرح‌ریزی رابطه خاکستری است که این فرآیند برای رتبه‌بندی همه حالت‌های شکست استفاده می‌شود.

5-1- گام اول: تعیین وزن عوامل ریسک O، S و D

تعیین بازه‌های راف و وزن عوامل ریسک در مراحل زیر بیان شده است:

1- بعد از تعیین حالت‌های شکست نیاز به تعیین اهمیت معیارهای O، S و D براساس اعداد کریسپ توسط تصمیم‌گیرندگان است. عوامل ریسک با توجه به مقیاس 1 تا 10 توسط تیم تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن وزن دهی می‌شوند. عدد 1 به معنای تقریباً بی‌اهمیت و 10 به معنای بسیار مهم است. دیگر اعداد در این فاصله به‌طور مشابه تعریف می‌شوند.

اعداد کریسپ حاصل از ارزیابی متخصصان برای وزن عوامل ریسک را جمع‌آوری می‌کنیم و به‌صورت زیر بیان می‌کنیم:

$$W_j = [W_j^1 \text{ و } W_j^2 \text{ و } \dots \text{ و } W_j^K \text{ و } \dots \text{ و } W_j^L] \quad \text{و } J = S \text{ و } D \text{ و } O \quad (12)$$

W_j^K نظر K امین متخصص درباره اهمیت معیار J ام است. L تعداد متخصصان در گروه تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

2- اعداد کریسپ جمع‌آوری شده در مرحله قبل را به شکل اعداد راف با استفاده از معادله‌های 2 تا 7 تبدیل می‌کنیم.

شکل بازه‌ای عدد راف W_j^K به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$RN(W_j^K) = [W_j^{KL} \text{ و } W_j^{KU}] \quad (13)$$

که W_j^{KL} و W_j^{KU} به ترتیب، حد پایین و حد بالای عدد راف $RN(W_j^K)$ هستند. وزن راف معیار J ام که به‌صورت $\overline{RN}(W_j)$ است، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_j^L = (W_j^{1L} + W_j^{2L} + \dots + W_j^{lL}) / l \quad (14)$$

$$W_j^U = (W_j^{1U} + W_j^{2U} + \dots + W_j^{lU}) / l \quad (15)$$

که در آن، O و D و $J = S$ و W_j^L و W_j^U به ترتیب، حد پایین و حد بالای وزن زام به شکل عدد راف $\overline{RN(W_j)}$ هستند.
 اعداد در نهایت به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\overline{RN(W_j)} = (W_j^L \text{ و } W_j^U) \quad \text{که} \quad j = O.S.D \quad (16)$$

در انتها، اعداد راف به دست آمده برای هر عامل ریسک را نرمالیزه می‌کنیم و سپس با استفاده از معادله 12 عملیات راف‌زدایی را انجام می‌دهیم و وزن‌های به دست آمده را به اعداد کریسپ تبدیل می‌کنیم.

2-5- گام دوم: ارزیابی حالت‌های شکست با استفاده از روش راف طرح‌ریزی رابطه خاکستری

بعد از تعیین وزن عوامل ریسک، یک رویکرد جدیدی از تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن بر اساس اعداد راف و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری به صورت مرحله به مرحله بیان می‌شود.

1- ماتریس ارزیابی حالت‌های شکست اعداد کریسپ را بسازید. فرض کنید m حالت شکست FM_i ($i = 1.2. \dots .m$) بر اساس عوامل ریسک C_j ($j = O.S.D$) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. متخصصان بر اساس اعداد 1، 2، 3، ...، 10 برای ارزیابی حالت‌های شکست بر اساس عوامل ریسک به آن‌ها نمره می‌دهند. فرض کنید که تیم تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن، L متخصص تصمیم‌گیری دارد. بر اساس فرضیات بیان شده ماتریس تصمیم‌گیری D به صورت زیر بیان می‌شود:
 ماتریس ارزیابی D بر اساس اعداد کریسپ

$$D = \begin{bmatrix} X_{1S}^K & X_{1O}^K & X_{1D}^K \\ X_{2S}^K & X_{2O}^K & X_{2D}^K \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{mS}^K & X_{mO}^K & X_{mD}^K \end{bmatrix} \quad (17)$$

X_{ij}^K عددی است که k امین متخصص برای i امین حالت شکست برای معیار z اختصاص داده است.

2- اعداد کریسپ X_{ij}^K در ماتریس D را با استفاده از معادله‌های 2 تا 7 به شکل بازه‌های راف به صورت $RN(X_{ij}^K)$ تبدیل کنید.

$$RN(X_{ij}^K) = [X_{ij}^{KL} \text{ و } X_{ij}^{KU}] \quad (18)$$

که X_{ij}^{KL} و X_{ij}^{KU} به ترتیب، حد پایین و حد بالای عدد راف $RN(X_{ij}^K)$ است. بازه میانگین اعداد راف $\overline{RN(X_{ij})}$ ، با توجه به عملیات استاندارد ریاضی اعداد راف معادله‌های 9 تا 11 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{RN(X_{ij})} = [X_{ij}^L \text{ و } X_{ij}^U] \quad (19)$$

$$X_{ij}^L = (X_{ij}^{1L} + X_{ij}^{2L} + \dots + X_{ij}^{IL}) / I \quad (20)$$

$$X_{ij}^U = (X_{ij}^{1U} + X_{ij}^{2U} + \dots + X_{ij}^{IU}) / I \quad (21)$$

X_{ij}^L و X_{ij}^U به ترتیب حد پایین و حد بالا عدد راف $[X_{ij}^L \text{ و } X_{ij}^U]$ هستند. 3- ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده به شکل اعداد راف را تعیین کنید. در راستای قابل‌مقایسه ساختن اعداد، آن‌ها را در بازه [0.1] بیان می‌کنیم. در اینجا، روش نرمال کردن اعداد به صورت زیر است:

$$\hat{X}_{ij}^L = \frac{X_{ij}^L}{\max_i \{ \max [X_{ij}^L \text{ و } X_{ij}^U] \}} \cdot \hat{X}_{ij}^U = \frac{X_{ij}^U}{\max_i \{ \max [X_{ij}^L \text{ و } X_{ij}^U] \}} \quad (22)$$

$[\hat{X}_{ij}^L \text{ و } \hat{X}_{ij}^U]$ به ترتیب حد پایین و حد بالای نرمال شده از بازه راف $[X_{ij}^L \text{ و } X_{ij}^U]$ را نمایش می‌دهد.

4- عملیات راف‌زدایی را با استفاده از معادله 12 انجام دهید. در این قسمت اعداد راف به‌دست‌آمده را به اعداد کریسپ تبدیل می‌کنیم. در این قسمت، فرض بر این است که تصمیم‌گیرندگان گرایشی میانه دارند؛ به عبارت دیگر، نه خوش‌بینانه و نه بدبینانه. بنابراین برای λ مقدار مشخص 0/5 در نظر گرفته می‌شود.

5- دنباله‌های مرجع را تعیین کنید. روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری بر پایه دو دنباله است (یک جایگزین ایده آل مثبت و دوم جایگزین ایده آل منفی). جایگزین ایده آل مثبت نشان‌دهنده کمترین سطح از عوامل ریسک و جایگزین ایده آل منفی نشان‌دهنده بالاترین سطح از عوامل ریسک است و به‌صورت زیر مشخص می‌شوند:

$$X_0^+ = (X_{01}^+ . X_{02}^+ . \dots . X_{0n}^+) \quad \text{و} \quad X_0^- = (X_{01}^- . X_{02}^- . \dots . X_{0n}^-) \quad (23)$$

$$X_0^+ = (1 . 1 . \dots . 1) \quad \text{و} \quad X_0^- = (10 . 10 . \dots . 10) \quad (24)$$

6- ماتریس رابطه خاکستری را مشخص کنید. ضریب رابطه خاکستری بین X_{ij} و X_{0j}^+ می‌تواند توسط معادله 26 محاسبه شود.

$$\gamma_{ij}^+ = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |X_{0j}^+ - X_{ij}| + \xi \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |X_{0j}^+ - X_{ij}|}{|X_{0j}^+ - X_{ij}| + \xi \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |X_{0j}^+ - X_{ij}|} \quad (25)$$

که در آن، γ_{ij}^+ ضریب رابطه خاکستری از X_{ij} با توجه به عامل ریسک ایده آل مثبت X_{0j}^+ بوده و ξ ضریب تمایز و داری مقدار $\xi \in [0.1]$ است. به‌طورکلی در این معادله، مقدار $\xi = 0/5$ در نظر گرفته می‌شود.

ضریب رابطه خاکستری بین X_{ij} و X_{0j}^- نیز توسط معادله (27) محاسبه می‌شود.

$$\gamma_{ij}^- = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |X_{0j}^- - X_{ij}| + \xi \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |X_{0j}^- - X_{ij}|}{|X_{0j}^- - X_{ij}| + \xi \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |X_{0j}^- - X_{ij}|} \quad (26)$$

که در آن، γ_{ij}^- ضریب رابطه خاکستری از X_{ij} با توجه به عامل ریسک ایده آل منفی X_{0j}^- است.

بر اساس γ_{ij}^+ و γ_{ij}^- ، ماتریس رابطه خاکستری به صورت زیر است:

$$Y^- = \begin{bmatrix} \gamma_{11}^- & \gamma_{12}^- & \dots & \gamma_{1n}^- \\ \gamma_{21}^- & \gamma_{22}^- & \dots & \gamma_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{m1}^- & \gamma_{m2}^- & \dots & \gamma_{mn}^- \end{bmatrix} \quad Y^+ = \begin{bmatrix} \gamma_{11}^+ & \gamma_{12}^+ & \dots & \gamma_{1n}^+ \\ \gamma_{21}^+ & \gamma_{22}^+ & \dots & \gamma_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{m1}^+ & \gamma_{m2}^+ & \dots & \gamma_{mn}^+ \end{bmatrix} \quad (27)$$

که Y^+ ماتریس رابطه خاکستری بین هر حالت شکست و دنباله مرجع مثبت است و Y^- ماتریس رابطه خاکستری بین هر حالت شکست و دنباله مرجع منفی است.
7- ماتریس رابطه خاکستری موزون را بسازید. ماتریس رابطه خاکستری وزن‌دار شده توسط معادله 29 به صورت زیر مشخص کنید:

$$\dot{Y}^- = \begin{bmatrix} \bar{W}_1 \gamma_{11}^- & \bar{W}_2 \gamma_{12}^- & \dots & \bar{W}_n \gamma_{1n}^- \\ \bar{W}_1 \gamma_{21}^- & \bar{W}_2 \gamma_{22}^- & \dots & \bar{W}_n \gamma_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{W}_1 \gamma_{m1}^- & \bar{W}_2 \gamma_{m2}^- & \dots & \bar{W}_n \gamma_{mn}^- \end{bmatrix} \quad \dot{Y}^+ = \begin{bmatrix} \bar{W}_1 \gamma_{11}^+ & \bar{W}_2 \gamma_{12}^+ & \dots & \bar{W}_n \gamma_{1n}^+ \\ \bar{W}_1 \gamma_{21}^+ & \bar{W}_2 \gamma_{22}^+ & \dots & \bar{W}_n \gamma_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{W}_1 \gamma_{m1}^+ & \bar{W}_2 \gamma_{m2}^+ & \dots & \bar{W}_n \gamma_{mn}^+ \end{bmatrix} \quad (28)$$

\bar{W}_j زمین وزن گروهی نرمال شده برای عوامل ریسک را که در گام اول به دست آمده است، نشان می‌دهد.

8- ضریب طرح‌ریزی رابطه خاکستری را محاسبه کنید. هر خط در ماتریس رابطه خاکستری موزون \dot{Y}^+ به عنوان یک بردار سطری برای هر حالت ریسک در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، طرح‌ریزی رابطه خاکستری برای i امین حالت شکست FM_i روی دنباله مرجع مثبت X_0^+ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_i^+ = \|\dot{Y}_i^+\| \cos[\dot{Y}_i^+, \dot{Y}_0^+] \quad (29)$$

$$= \sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{W}_j \gamma_{ij}^+)^2} \times \frac{\sum_{j=1}^n ((\bar{W}_j \gamma_{ij}^+) \times \bar{W}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (\bar{W}_j \gamma_{ij}^+)^2} \times \sqrt{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j^2}}$$

$$= \sum_{j=1}^n \left(\frac{\bar{W}_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j^2}} \times \gamma_{ij}^+ \right)$$

که $Y_0^+ = (\overline{W}_1 \gamma_{01}^+ \cdot \overline{W}_2 \gamma_{02}^+ \cdot \dots \cdot \overline{W}_n \gamma_{0n}^+) = (\overline{W}_1 \cdot \overline{W}_2 \cdot \dots \cdot \overline{W}_n)$ ضریب رابطه خاکستری وزندار شده بین دنباله مرجع مثبت است. به‌طور مشابه، طرح‌ریزی رابطه خاکستری برای i امین حالت شکست FM_i روی دنباله مرجع منفی X_0^- به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_i^- = \|Y_i^-\| \cos[Y_i^-, Y_0^-] \quad (30)$$

$$= \frac{\sum_{j=1}^n (\overline{W}_j \gamma_{ij}^-)^2 \times \frac{\sum_{j=1}^n ((\overline{W}_j \gamma_{ij}^-) \times \overline{W}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (\overline{W}_j \gamma_{ij}^-)^2} \times \sqrt{\sum_{j=1}^n \overline{W}_j^2}}}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{\overline{W}_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \overline{W}_j^2}} \times \gamma_{ij}^- \right)}$$

که $Y_0^- = (\overline{W}_1 \gamma_{01}^- \cdot \overline{W}_2 \gamma_{02}^- \cdot \dots \cdot \overline{W}_n \gamma_{0n}^-) = (\overline{W}_1 \cdot \overline{W}_2 \cdot \dots \cdot \overline{W}_n)$ ضریب رابطه خاکستری وزندار شده بین دنباله مرجع منفی است. پس اگر وزن طرح‌ریزی رابطه خاکستری $\hat{W}_j = \frac{\overline{W}_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \overline{W}_j^2}}$ باشد، آنگاه

$$P_i^+ = \sum_{j=1}^n (\hat{W}_j \times \gamma_{ij}^+) \quad (31)$$

$$P_i^- = \sum_{j=1}^n (\hat{W}_j \times \gamma_{ij}^-) \quad (32)$$

9- طرح‌ریزی نسبی را محاسبه کنید و حالت‌های شکست را رتبه‌بندی نمایید. طرح‌ریزی نسبی (RP) برای هر حالت شکست به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RP_i = \frac{P_i^-}{P_i^+ + P_i^-} \quad (33)$$

در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن، مقدار طرح‌ریزی نسبی به رابطه بین حالت شکست بالقوه و مقدار بهینه هر عامل ریسک اشاره می‌کند. هر چه مقدار به دست آمده از معادله (34) بزرگ‌تر باشد، اثر حالت شکست مربوط به آن کمتر است. بنابراین، تمام حالت‌های شکست در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن براساس این دستور رتبه‌بندی می‌شوند.

6- مثال حل شده

در این قسمت، مدل تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن جدید پیشنهادی برای سیستم سوپاپ بخار در نیروگاه تولید نوع A به کار برده شده است [39، ص 479]. قابلیت اطمینان سیستم سوپاپ بخار در عملیات توربین بخار در نیروگاه ضروری است؛ زیرا قسمتی کلیدی است که در شرایط پیچیده قابل حمل با درجه حرارت و فشار بالا است. سیستم سوپاپ بخار بین دستگاه تولید گرما جداکننده رطوبت (MSR) و سیلندر فشار پایین برای کنترل مقدار بخار ورودی به سیلندر فشار پایین قرار دارد. در سیستم توربین بخار، مقدار MSR برای حجم زیادی از خط لوله، و بخار آب بیش از حد در MSR ممکن است منجر به سرعت بیش از حد روتور توربین در طول فرآیند رد محموله شود؛ سرعت بیش از حد روتور باعث بروز حادثه می‌شود. بنابراین برای اطمینان از ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم توربین، سوپاپ بخار نیاز است در هر شرایط عملیاتی غیرطبیعی به سرعت برای قطع بخار ورودی به سیلندر کم فشار بسته شود. بعلاوه سوپاپ باید به موقع باز و بسته شود و به طور ثابت، در هر موقعیت از باز بودن به طور کامل، به بسته بودن به طور کامل کار کند.

حالت‌های بالقوه شکست اصلی توسط متخصصان معرفی شده‌اند که عبارت‌اند از: مدت زمان بسته شدن سوپاپ (FM1)، محکم نبستن (FM2)، نشت بخار در اطراف میله سوپاپ (FM3)، نوسانات سوپاپ (FM4)، فشردگی سوپاپ در عملیات (FM5)، شکستگی میله سوپاپ (FM6)، نقص در عملکرد یاتاقان پشتیبانی میله سوپاپ (FM7) و سروصدا بیش از حد از سیستم سوپاپ (FM8).

در این مثال، تیم تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن از چهار متخصص TM_1 ، TM_2 ، TM_3 ، TM_4 ساخته شده است. ارزیابی‌های ذهنی هشت حالت شکست شناسایی شده برای عوامل ریسک S، O و D توسط اعضای تیم تجزیه و تحلیل

پیش‌بینی و تحلیل حالات خرابی و شکست ... زهره طهماسبی آبدر و همکار

حالات‌های شکست و آثار آن در جدول 4 و ارزیابی‌های ذهنی متخصصان برای اهمیت عوامل ریسک S، O و D در جدول 5 ارائه شده است.

جدول 4 ارزیابی متخصصان برای حالت‌های شکست

احتمال تشخیص D				احتمال وقوع O				شدت S				شماره ریسک
تصمیم‌گیرنده چهارم	تصمیم‌گیرنده سوم	تصمیم‌گیرنده دوم	تصمیم‌گیرنده اول	تصمیم‌گیرنده چهارم	تصمیم‌گیرنده سوم	تصمیم‌گیرنده دوم	تصمیم‌گیرنده اول	تصمیم‌گیرنده چهارم	تصمیم‌گیرنده سوم	تصمیم‌گیرنده دوم	تصمیم‌گیرنده اول	
5	7	9	9	2	5	3	3	9	10	10	10	FM1
3	5	5	3	4	5	3	3	3	1	2	2	FM2
4	2	3	3	5	5	7	8	3	5	4	3	FM3
4	3	2	4	3	4	2	2	5	7	8	7	FM4
3	2	3	3	5	5	3	3	9	7	10	10	FM5
5	3	2	2	3	2	2	1	10	10	10	10	FM6
3	4	2	2	6	7	5	5	9	9	7	7	FM7
3	3	5	3	7	6	8	5	7	8	5	5	FM8

جدول 5 ارزیابی متخصصان برای عوامل ریسک

تصمیم‌گیرنده چهارم	تصمیم‌گیرنده سوم	تصمیم‌گیرنده دوم	تصمیم‌گیرنده اول	فاکتورهای ریسک
9	8	7	5	شدت S
7	5	5	4	احتمال وقوع O
7	6	6	5	احتمال تشخیص D

6-1- گام اول: تعیین وزن عوامل ریسک O، S و D

ابتدا اهمیت عوامل ریسک در جدول 5 را که براساس اعداد کریسپ بیان شده است، به بازه‌های اعداد راف با استفاده از معادله‌های 2 تا 7 تبدیل می‌کنیم. برای نمونه این محاسبات را برای عامل S انجام می‌دهیم. وزن‌هایی که هر یک از متخصصان به این عامل ریسک داده‌اند {5.7.8.9} است. با توجه به معادله‌های 2 تا 7:

$$\underline{\text{lim}}(5) = 5 \cdot \overline{\text{lim}}(5) = \frac{1}{4}(5 + 7 + 8 + 9) = 7/25$$

$$\underline{\text{lim}}(7) = \frac{1}{2}(5 + 7) = 6 \cdot \overline{\text{lim}}(7) = \frac{1}{3}(7 + 8 + 9) = 8$$

$$\underline{\text{lim}}(8) = \frac{1}{3}(5 + 7 + 8) = 6/67 \cdot \overline{\text{lim}}(8) = \frac{1}{2}(8 + 9) = 8/5$$

$$\underline{\text{lim}}(9) = \frac{1}{4}(5 + 7 + 8 + 9) = 7/25 \cdot \overline{\text{lim}}(9) = 9$$

بازه راف اعداد کریسپ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\text{RN}(W_S^1) = \text{RN}(5) = [5 \cdot 7/25] \\ = [6 \cdot 8]$$

$$\text{RN}(W_S^2) = \text{RN}(7)$$

$$\text{RN}(W_S^3) = \text{RN}(8) = [6/67 \cdot 8/5] \\ = [7/25 \cdot 9]$$

$$\text{RN}(W_S^4) = \text{RN}(9)$$

با توجه به معادله‌های 15 و 17 متوسط بازه راف برای عامل ریسک S برابر $\overline{\text{RN}}(W_S) = [6/229 \cdot 8/188]$ است. این کار را به طور مشابه برای عوامل ریسک O و D نیز انجام داده‌ایم و نتایج آن را به صورت جدول 6 بیان کرده‌ایم. وزن عوامل ریسک نرمال شده و راف‌زدایی بازه راف مربوط به هر عامل ریسک را با توجه به معادله 12 با در نظر گرفتن $\lambda = 0/5$ در ستون بعد جدول محاسبه شده‌اند.

جدول 6 وزن عوامل ریسک

عوامل ریسک	بازه راف	وزن عدد راف نرمال‌شده	تبدیل عدد راف به عدد کریسپ
شدت S	[6/229 , 8/188]	[0/761 , 1]	0/8805
احتمال وقوع O	[4/646 , 5/896]	[0/567 , 0/720]	0/6435
احتمال تشخیص D	[5/583 , 6/417]	[0/682 , 0/784]	0/733

6-2- گام دوم: رتبه‌بندی حالت‌های شکست با استفاده از روش راف طرح‌ریزی رابطه خاکستری
 1- ماتریس اعداد کریسپ ارائه‌شده در جدول 4 را با توجه به معادله‌های 2 تا 7 و معادله‌های 20 تا 22 به ماتریس بازه‌های اعداد راف تبدیل کرده‌ایم که نتایج آن را در جدول 7 مشاهده می‌کنید.

جدول 7 بازه‌های اعداد راف برای حالت‌های شکست

شماره ریسک	شدت S	احتمال وقوع O	احتمال تشخیص D
FM1	[9/563 . 9/938]	[2/646 . 4/063]	[6/500 . 8/458]
FM2	[1/583 . 2/417]	[3/271 . 4/250]	[3/500 . 4/500]
FM3	[3/271 . 4/250]	[5/479 . 7/000]	[2/583 . 3/417]
FM4	[6/104 . 7/354]	[2/271 . 3/250]	[2/750 . 3/729]
FM5	[8/250 . 9/667]	[3/500 . 4/500]	[2/563 . 2/938]
FM6	[10/000 . 10/000]	[1/583 . 2/417]	[2/333 . 3/750]
FM7	[7/500 . 8/500]	[5/271 . 6/250]	[2/271 . 3/250]
FM8	[5/479 . 7/000]	[5/750 . 7/250]	[3/125 . 3/875]

2- سپس بازه‌های اعداد راف را با توجه به معادله 23 نرمالیزه می‌کنیم.
 3- حال با توجه به معادله 12 عملیات راف‌زدایی را انجام می‌دهیم و بازه‌های اعداد راف به‌دست‌آمده را به اعداد کریسپ تبدیل می‌نماییم.

جدول 8 اعداد کریسپ بدست آمده حاصل از عملیات راف‌زدایی برای حالت‌های شکست

شماره ریسک	شدت S	احتمال وقوع O	احتمال تشخیص D
FM1	0/975	0/463	0/884
FM2	0/200	0/519	0/473
FM3	0/376	0/861	0/355
FM4	0/673	0/381	0/383
FM5	0/896	0/552	0/325
FM6	1/000	0/276	0/360
FM7	0/800	0/795	0/326
FM8	0/624	0/897	0/414

4- روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری بر پایه دو نقطه است، جایگزین ایده آل مثبت و جایگزین ایده آل منفی. جایگزین ایده آل مثبت کمترین سطح از عوامل ریسک و جایگزین ایده آل منفی بالاترین سطح از عوامل ریسک است که به صورت ماتریس‌های زیر در نظر گرفته شده‌اند.

$$X_0^+ = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad X_0^- = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \\ 10 & 10 & 10 \end{bmatrix}$$

5- بر اساس معادلات 26 و 27 ماتریس رابطه خاکستری Y^+ و Y^- محاسبه شده است.

$$Y^+ = \begin{bmatrix} 0/998 & 0/963 & 0/992 \\ 0/946 & 0/967 & 0/963 \\ 0/957 & 0/990 & 0/956 \\ 0/977 & 0/957 & 0/957 \\ 0/993 & 0/969 & 0/954 \\ 1/000 & 0/950 & 0/956 \\ 0/986 & 0/985 & 0/954 \\ 0/974 & 0/993 & 0/960 \end{bmatrix} \quad Y^- = \begin{bmatrix} 0/941 & 0/427 & 0/776 \\ 0/333 & 0/454 & 0/431 \\ 0/391 & 0/742 & 0/383 \\ 0/550 & 0/392 & 0/393 \\ 0/793 & 0/472 & 0/372 \\ 1/000 & 0/356 & 0/384 \\ 0/667 & 0/661 & 0/373 \\ 0/515 & 0/795 & 0/406 \end{bmatrix}$$

6- حال ماتریس رابطه خاکستری را با توجه به وزن فاکتورهای ریسک محاسبه‌شده در گام اول وزن‌دار می‌کنیم.

$$\hat{Y}^+ = \begin{bmatrix} 0/879 & 0/620 & 0/727 \\ 0/833 & 0/622 & 0/706 \\ 0/843 & 0/637 & 0/700 \\ 0/860 & 0/616 & 0/702 \\ 0/874 & 0/624 & 0/699 \\ 0/881 & 0/612 & 0/701 \\ 0/868 & 0/634 & 0/699 \\ 0/857 & 0/639 & 0/703 \end{bmatrix} \quad \hat{Y}^- = \begin{bmatrix} 0/829 & 0/275 & 0/568 \\ 0/294 & 0/292 & 0/316 \\ 0/344 & 0/477 & 0/280 \\ 0/484 & 0/253 & 0/288 \\ 0/699 & 0/304 & 0/273 \\ 0/881 & 0/229 & 0/282 \\ 0/587 & 0/425 & 0/273 \\ 0/454 & 0/511 & 0/297 \end{bmatrix}$$

7- در این مرحله طرح‌ریزی رابطه خاکستری را محاسبه کرده‌ایم. هر سطر در ماتریس رابطه خاکستری موزون \hat{Y}^+ به‌عنوان یک بردار سطری برای هر حالت ریسک در نظر گرفته می‌شود. با توجه به معادله‌های 32 و 33 می‌توان مقدار P_i^- و P_i^+ محاسبه کرد.

8- طرح‌ریزی نسبی را محاسبه می‌کنیم. با استفاده از معادله 34 مقادیر RP_i حالت‌های ریسک را محاسبه و اولویت‌بندی می‌کنیم. هر چه مقدار شاخص طرح‌ریزی نسبی کمتر باشد، اولویت ریسک آن بیشتر و هر چه مقدار شاخص طرح‌ریزی نسبی بیشتر باشد، اولویت ریسک آن کمتر است. با توجه به محاسبات انجام‌شده در جدول 9، اولویت‌های حالت‌های شکست به‌دست‌آمده به‌صورت زیر است:

$$FM1 > FM6 > FM5 > FM7 > FM8 > FM3 > FM4 > FM2$$

جدول 9 مقادیر طرح‌ریزی رابطه خاکستری برای هر حالت شکست

اولویت‌ها	RP_i	P_i^-	P_i^+	حالت شکست	شماره ریسک
1	0/563	1/298	1/007	مدت‌زمان بسته شدن سوپاپ	FM1
8	0/709	1/257	0/516	محکم نبستن	FM2
6	0/671	1/268	0/621	نشست بخار در اطراف میله سوپاپ	FM3
7	0/676	1/270	0/609	نوسانات سوپاپ	FM4
3	0/625	1/281	0/769	فشرده‌گی سوپاپ در عملیات	FM5
2	0/598	1/281	0/859	شکستگی میله سوپاپ	FM6
4	0/630	1/282	0/754	نقص در عملکرد یاطاقان پشتیبانی میله سوپاپ	FM7
5	0/640	1/280	0/721	سروصدا بیش‌ازحد از سیستم سوپاپ	FM8

7- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت برای نشان دادن ویژگی‌های روش پیشنهادی، اولویت‌بندی حالت‌های شکست براساس روش RPN سنتی نیز آورده شده است. نتایج حاصل از اولویت‌بندی هر دو روش را در جدول 10 مشاهده می‌کنید.

جدول 10 اولویت‌بندی حالت‌های شکست در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی و روش پیشنهادی Rough GRP FMEA

شماره ریسک	Rough GRP FMEA		سنتی FMEA				
	$W_S = [0/761, 1/000]$		$W_S = W_O = W_D$				
	$W_O = [0/567, 0/720]$ $W_D = [0/682, 0/784]$						
	RP_i	اولویت‌ها	S	O	D	RPN	اولویت‌ها
FM1	0/563	1	9	4	7	252	1
FM2	0/709	8	3	4	4	48	7
FM3	0/671	6	4	6	4	96	6
FM4	0/676	7	6	4	4	96	6
FM5	0/625	3	9	4	4	144	3
FM6	0/598	2	10	4	3	120	4
FM7	0/630	4	8	7	2	112	5
FM8	0/640	5	6	6	5	180	2

وزن عوامل ریسک شدت (S)، احتمال وقوع (O) و احتمال تشخیص (D) در دو روش متفاوت است. در روش پیشنهادی، وزن سه عامل ریسک W_S ، W_O و W_D به صورت بازه‌هایی از اعداد راف بیان شده است که اشاره به ذهنیت و عدم قطعیت دارد. وزن عوامل ریسک S، O و D در روش پیشنهادی به ترتیب به صورت بازه‌های $[0/761, 1/000]$ ، $[0/567, 0/720]$ و $[0/612, 0/784]$ محاسبه شده است، اما وزن سه عامل ریسک در روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی، مقدار کریسپ مساوی است. مقدار کریسپ وزن‌ها در این روش، ذهنیت ذاتی و عدم قطعیت در فرآیند تعیین وزن عوامل ریسک را نادیده می‌گیرد.

با توجه به جدول 10 مشاهده می‌کنید که وزن عوامل ریسک در روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی برابر در نظر گرفته شده است. این فرض منطقی نیست، زیرا ممکن است برخی عوامل ریسک دست بالا و یا دست پایین در نظر گرفته شوند؛ برای مثال در روش پیشنهادی، بالاترین اهمیت به عامل S با توجه به ذهنیت متخصصان در نظر گرفته شده است که بازه راف آن [0/761, 1/000] است. بنابراین، روش پیشنهادی در تعیین وزن عوامل ریسک نامطمئن و ذهنی موفق‌تر از روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی عمل کرده است.

نتایج حاصل از دو روش اولویت‌بندی در جدول 10 نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده، در هر دو روش FM1 رتبه اول، FM5 رتبه سوم و FM3 رتبه ششم را دارند. بقیه حالت‌های شکست در روش پیشنهادی متفاوت از روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی است.

در برخی مواقع، حالت‌های شکست در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی رتبه‌های یکسانی را نشان می‌دهد. این یکی از کاستی‌های روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی است، زیرا مقدار RPN‌ها در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی ناپیوسته است. این رخداد در این پژوهش نیز رخ داده است. همان‌طور که در جدول 10 مشاهده می‌کنید، FM3 و FM4 مقدار مشابه 96 برای RPN دارند (با در نظر گرفتن این که مقدار عوامل ریسک S، O و D در FM3 به ترتیب 4، 6 و 4 و در FM4 به ترتیب 6، 4 و 4 است). دلیل، این است که در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی سه عامل ریسک S، O و D با توجه به مقیاس ترتیبی گسسته ارزیابی می‌شوند و مقدار RPN از انجام دادن ضرب ساده بدون توجه به وزن عوامل ریسک و عدم قطعیت موجود به دست می‌آید.

در روش پیشنهادی، روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن براساس اعداد راف و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری، برای برطرف کردن این کمبود در روش RPN سنتی، اولویت‌بندی حالت‌های شکست با استفاده از روش تصمیم‌گیری بهبودیافته طرح‌ریزی رابطه خاکستری انجام می‌شود. طرح‌ریزی رابطه خاکستری با استفاده از دو نقطه مرجع مثبت و منفی و محاسبات ساده‌تر به یک اولویت‌بندی ریسک دقیق‌تری منجر می‌شود.

مجموعه اعداد راف، مجموعه اعداد فازی و مجموعه اعداد خاکستری همگی برای مواجهه با عدم قطعیت در نظر گرفته شده‌اند، اما اعداد راف انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به آن‌ها نشان می‌دهند. روش پیشنهادی را می‌توان به‌طور مستقیم براساس داده‌های اصلی و بدون اطلاعات و مفروضات اضافی استفاده کرد. اما اعداد فازی یا اعداد خاکستری با استفاده از توابع عضویت از پیش تعیین شده به تبدیل نظرت متخصصان می‌پردازد که منجر به فواصل بازه‌ای بزرگ‌تری می‌شود.

برای مثال مقدارهای اختصاص داده شده به عامل S توسط چهار متخصص در FM4 مجموعه اعداد $\{7,8,7,5\}$ است. این مقدارهای کریسپ ابتدا به شکل بازه‌های راف $[5/000,6/75]$ $[6/333,7/333]$ $[6/75,8]$ $[6/333,7/333]$ تبدیل می‌شوند که فاصله‌های مرزی پویا و انعطاف‌پذیر آن‌ها به ترتیب 1، $1/25$ ، 1 و $1/75$ است. این تبدیل نیازمند اطلاعات بیشین زیادی مثل تابع عضویت نبوده و متوسط بازه گروه از روش راف به صورت بازه $[6/104,7/354]$ با فاصله مرزی $1/25$ است، که نشان دهنده دامنه برآورد شده است. شکل عدد راف $[6/104,7/354]$ فقط نشان دهنده اندازه عامل S برای FM4 نیست، بلکه ذهنیت و ابهام ارزیابی‌های متخصصان را نیز نشان می‌دهد که هر چه فاصله مرزی کمتر باشد ابهام پوشش داده شده بیشتر است. در واقع، فاصله مرزی به ذهنیت و ابهام در فرآیند ارزیابی حالت‌های شکست از یک متخصص به متخصص دیگر تغییر می‌کند، زیرا متخصصان متفاوت تجربه و دانش متفاوتی دارند. بنابراین، روش پیشنهادی به‌طور کامل می‌تواند ذهنیت و ترجیح کارشناسان را در نظر بگیرد و یک راه منطقی برای رتبه‌بندی حالت‌های شکست در محیط‌های نامطمئن براساس قضاوت‌های ذهنی بدون نیاز به اطلاعات و فرضیه‌های پیشین ارائه کند.

روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی مقدار ثابت و نقطه‌ای را به کار می‌برد، ولی روش راف طرح‌ریزی رابطه خاکستری تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن مقدار فاصله‌ای انعطاف‌پذیری را برای ارزیابی حالت‌های شکست استفاده می‌کند. برای مثال، ارزیابی‌های چهار متخصص برای حالت شکست FM5 برای عامل S مجموعه اعداد $\{10,10,7,9\}$ است. در روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی، این مقادیر اختصاص داده شده توسط چهار متخصص در نهایت با یک مقدار کریسپ 9 تحت شرایط طوفان فکری جایگزین شده است. شکل بازه راف FM5 $[8/250,9/667]$ با فاصله مرزی $1/417$ است. اما برای مقادیر دیگر S با

مجموعه اعداد {7,7,9,9} بازه راف به [7/500,8/500] با فاصله مرزی 1 تغییر می‌کند. این نشان دهنده این است که هر چه فاصله مرزی راف بزرگ‌تر باشد، تناقض در قضاوت‌های کارشناسان بیشتر است. بنابراین، بازه‌های راف انعطاف‌پذیری و دقت بیشتری دارند.

با توجه به تفسیرهای بالا و تفاوت‌های بین دو روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی و روش پیشنهادی تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن براساس اعداد راف و روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری، در مجموع برخی از ویژگی‌های روش پیشنهادی محققان به صورت زیر خلاصه شده است:

✓ روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن براساس اعداد راف، ذهنیت و ابهام وزن سه عامل ریسک را که همیشه در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی نادیده گرفته شده است، در نظر می‌گیرد. شیوه تعیین وزن راف به شکلی است که با انعطاف‌پذیری توانایی انعکاس قضاوت‌های مبهم و ذهنی کارشناسان را دارد، از این روش این اطمینان حاصل می‌شود که وزن عوامل ریسک دست بالا یا دست‌کم گرفته نشده است.

✓ در روش پیشنهادی براساس اعداد راف نیاز به اطلاعات پیشین زیادی مثل تابع عضویت از پیش تعیین شده، فرضیات و توزیع داده‌ها، نسبت به روش‌های فازی و خاکستری مشاهده نمی‌شود. این ویژگی از روش پیشنهادی، در شرایطی که دسترسی به داده‌های شکست سخت است دسترسی به آن را آسان می‌سازد.

✓ روش پیشنهادی دقت بیشتری دارد، زیرا فواصل مرزی کوچک‌تری را که نشان‌دهنده عدم اطمینان و ابهام است، نشان می‌دهد و بر این اساس، ارزیابی حالت‌های شکست دقیق‌تری را انجام می‌دهد.

✓ روش پیشنهادی مسئله RPN های ناپیوسته با مقدارهایی از 1 تا 1000 در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی را حل می‌کند. تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن براساس اعداد راف و طرح‌ریزی رابطه خاکستری اولویت‌بندی حالت‌های شکست را براساس ضریب نسبی RP_i انجام می‌دهد. این ویژگی، یکی از امتیازهای روش پیشنهادی در مقابل تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی است.

✓ روش پیشنهادی می‌تواند یک رتبه‌بندی ریسک دقیق‌تر از RPN سنتی با استفاده از دو نقطه مرجع مثبت و منفی در روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری ارائه کند. در مجموع روش پیشنهادی محقق، به دلیل داشتن روشی ساده و مؤثر برای ارزیابی حالت‌های شکست با در نظر گرفتن ابهام و عدم قطعیت و عدم نیاز این روش به اطلاعات و داده‌های پیشین زیادی در مقایسه با روش‌های دیگر مواجهه با عدم قطعیت، مدل منطقی‌تر و دقیق‌تر برای ارزیابی حالت‌های شکست ارائه می‌کند.

8- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن به‌عنوان یک تکنیک مهندسی استاندارد برای کمک به شناسایی، رتبه‌بندی و کاهش خرابی‌های بالقوه در محصولات یا فرآیندها، به‌خوبی شناخته شده است. با این حال، روش RPN سنتی به دلیل کاستی‌ها در ارزیابی حالات شکست و محاسبه RPN موردانتقاد قرار گرفته است. در این راستا، تحقیقات بسیاری به‌منظور افزایش بهره‌وری تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن معرفی شده‌اند، اما هنوز کمبودها در این رویکرد وجود دارد. در این پژوهش، یک مدل اولویت ریسک جدید برای ارزیابی حالت‌های شکست در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن ارائه شده است. مدل پیشنهادی بر کمبودهای روش RPN سنتی غلبه می‌کند و چارچوب جدیدی برای رتبه‌بندی حالت‌های شکست در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن فراهم می‌کند. این رویکرد جدید برای رسیدگی به قضاوت‌های ذهنی تصمیم‌گیرندگان و فضای عدم قطعیت موجود بسیار مؤثر و عملی است. در این رویکرد، نظرات تصمیم‌گیرندگان درباره ریسک‌های شناسایی شده بر اساس اعداد راف مدل‌سازی شدند و براساس دنباله‌های ایده آل مثبت و منفی در روش رابطه خاکستری بهبودیافته رتبه‌بندی شده‌اند. برای نشان دادن کارکرد مدل از یک مثال برای رتبه‌بندی ریسک‌های شناسایی شده استفاده شده است. با استفاده از روش پیشنهادی حالت‌های شکست FM1، FM6 و FM5 به ترتیب رتبه‌های اول تا سوم را در ارزیابی ریسک کسب نموده‌اند. بنابراین، جزو مهم‌ترین و با اهمیت‌ترین حالت‌های شکست هستند. نتایج نشان می‌دهد که یک رتبه‌بندی معقول‌تر و دقیق‌تری توسط ترکیب اعداد راف و طرح‌ریزی رابطه خاکستری (GRP) برای ارزیابی ریسک در تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن حاصل شده است. رویکرد جدید با در

نظر گرفتن وزن عوامل ریسک و استفاده از یک روش اولویت‌بندی با استفاده از روش طرح‌ریزی رابطه خاکستری، بر کاستی‌های روش تجزیه و تحلیل حالت‌های شکست و آثار آن سنتی مثل ضرب عوامل ریسک و مقادیر ناپیوسته حاصل از آن و بی‌توجهی به وزن عوامل ریسک غلبه کرده است. مدل‌سازی اعداد کریسپی براساس اعداد راف نیاز به توابع عضویت و توابع احتمال ندارد. روش پیشنهادی با پوشش دادن ابهام و عدم قطعیت در قضاوت‌های متخصصان به اولویت‌بندی ریسک مؤثرتر و دقیق‌تری دست می‌یابد. برای تحقیقات آینده می‌توان محاسبه بازه‌های راف با استفاده از میانگین هندسی مورد بررسی قرار گیرند. همچنین بررسی اعداد راف با استفاده از دیگر روش‌های تصمیم‌گیری و مقایسه آن‌ها با اعداد فازی، اعداد پویا نیز می‌تواند نتایج قابل‌توجهی داشته باشد.

9- منابع

- [1] Bernstein, P.L., *Against the gods: The remarkable story of risk*. 1996: Wiley New York.
- [2] Aven, T., *Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation*. European Journal of Operational Research, 2016. 253 (1): p. 1-13.
- [3] Reilly, J. and R. Thompson, *International survey, 1400 projects*. 2001, internal report.
- [4] Woodhouse, S., B. Burney, and K. Coste, *To err is human: improving patient safety through failure mode and effect analysis*. Clinical leadership & management review: the journal of CLMA, 2003. 18(1): p. 32-36.
- [5] Bowles, J.B. and C.E. Peláez, *Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis*. Reliability Engineering & System Safety, 1995. 50(2): p. 203-213.
- [6] Chang, K.-H. and C.-H. Cheng, *Evaluating the risk of failure using the fuzzy OWA and DEMATEL method*. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011. 22 (2): p. 113-129.

- [7] Liu, H.-C., L. Liu, and N. Liu, *Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review*. Expert systems with applications, 2013. 40(2): p. 828-838.
- [8] Braglia, M., M. Frosolini, and R. Montanari, *Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis*. Quality and Reliability Engineering International, 2003. 19(5): p. 425-443.
- [9] Braglia, M., *MAFMA: multi-attribute failure mode analysis*. International Journal of Quality & Reliability Management, 2000. 17(9): p. 1017-1033.
- [10] Liu, H.-C., et al., *Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment*. Expert Systems with Applications, 2012. 39(17): p. 12926-12934.
- [11] Chin, K.-S., et al., *Failure mode and effects analysis by data envelopment analysis*. Decision Support Systems, 2009. 48(1): p. 246-256.
- [12] Seyed-Hosseini, S., N. Safaei, and M. Asgharpour, *Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique*. Reliability Engineering & System Safety, 2006. 91(8): p. 872-881.
- [13] Yang, J., et al., *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): p. 2084-2092.
- [14] Zhang, Z. and X. Chu, *Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty*. Expert Systems with Applications, 2011. 38(1): p. 206-214.
- [15] Chang, C.-L., P.-H. Liu, and C.-C. Wei, *Failure mode and effects analysis using grey theory*. Integrated Manufacturing Systems, 2001. 12(3): p. 211-216.
- [16] Liu, H.-C., et al., *Failure mode and effects analysis using D numbers and grey relational projection method*. Expert Systems with Applications, 2014. 41 (10): p. 4670-4679.

- [17] F.A.Mir fakhrodini and S.H.M.Poorhamidi, score potential situation ranking using fuzzy cluster analysis,2013.10(27): p. 68-93.
- [18] Rezaie, K. and M. Shaghaghi, *Failure Mode and Effects Analysis Using Generalized Mixture Operators*. Journal of Optimization in Industrial Engineering, 2012. 5(11): p. 1-10.
- [19] A. Roghanian, A. Azar, H. Ghaedrahmati, In the field of safety management and fuzzy data envelopment analysis .Second FDEA to analyze the potential error mode and its effects ,Rasht,Iran,1389.
- [20] M. Safari ,M. Bineshian, Using the integrated model of decision technique,the method of analyzing potential failure scenarios.First international multidimensional accounting, audit, management and economics ,Isfahan,Iran,1394.
- [21] Liu, H.-C., et al., *Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory*. Expert Systems with Applications,2011. 38(4): p. 4403-4415.
- [22] Zhang, X., F. Jin, and P. Liu, *A grey relational projection method for multi-attribute decision making based on intuitionistic trapezoidal fuzzy number*. Applied Mathematical Modelling, 2013. 37(5): p. 3467-3477.
- [23] Zheng, G., et al., *Application of improved grey relational projection method to evaluate sustainable building envelope performance*. Applied Energy,2010. 87(2): p. 710-720.
- [24] Karimi,T and M.Sadeghi moghadam,Rough collection and gray collection.1393, tehran: institute of book mehraban publication of entesharat.
- [25] Stamatis, D.H., *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. 2003: ASQ Quality Press.
- [26] Pillay, A. and J. Wang, *Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning*. Reliability Engineering & System Safety,2003.79(1): p. 69-85.

- [27] Chin, K.-S., et al., *Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach*. Computers & Operations Research, 2009. 36(6): p. 1768-1779.
- [28] Kutlu, A.C. and M. Ekmekçioğlu, *Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP*. Expert Systems with Applications, 2012. 39(1): p. 61-67.
- [29] Liu, H.-C., L. Liu, and P. Li, *Failure mode and effects analysis using intuitionistic fuzzy hybrid weighted Euclidean distance operator*. International Journal of Systems Science, 2014. 45(10): p. 2012-2030.
- [30] Sharma, R.K., D. Kumar, and P. Kumar, *Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling*. International Journal of Quality & Reliability Management, 2005. 22(9): p. 986-1004.
- [31] Meng Tay, K. and C. Peng Lim, *Fuzzy FMEA with a guided rules reduction system for prioritization of failures*. International Journal of Quality & Reliability Management, 2006. 23(8): p. 1047-1066.
- [32] Pawlak, Z., *Rough sets*. International Journal of Computer & Information Sciences, 1982. 11(5): p. 341-356.
- [33] Pawlak, Z., *Rough sets: Theoretical aspects of reasoning about data*. Vol. 9. Springer Science & Business Media.
- [34] Huang, S.-Y., *Intelligent decision support: handbook of applications and advances of the rough sets theory*. Vol. 11. 1992: Springer Science & Business Media.
- [35] Greco, S., B. Matarazzo, and R. Slowinski, *Rough sets theory for multicriteria decision analysis*. European journal of operational research, 2001. 129(1): p. 1-47.
- [36] Zhai, L.-Y., L.-P. Khoo, and Z.-W. Zhong, *A rough set enhanced fuzzy approach to quality function deployment*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008. 37(5-6): p. 613-624.

- [37] Song, W., X. Ming, and Z. Xu, *Risk evaluation of customer integration in new product development under uncertainty*. Computers & Industrial Engineering, 2013. 65(3): p. 402-412.
- [38] Tzeng, G.-H. and S. Tasur, *The multiple criteria evaluation of grey relation model*. The Journal of Grey System, 1994. 6(2): p. 87-108.
- [39] Song, W., et al., *A rough TOPSIS approach for failure mode and effects analysis in uncertain environments*. Quality and Reliability Engineering International, 2014. 30(4): p. 473-486.