



## ارزیابی ریسک های زنجیره تأمین پایدار با روش تحلیل حالات و دلایل شکست در محیط فازی (مطالعه موردی: صبا باطری)

مجتبی فرخ (نویسنده مسؤل)

استادیار، گروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

Email: M.farrok93@gmail.com

مهدی شعله

دانشجوی دکتری مدیریت، گرایش تولید و عملیات، دانشگاه تهران، پردیس فارابی، قم، ایران

محسن ذبیحی جامخانه

دانش آموخته دکتری مدیریت، گرایش تحقیق در عملیات، دانشگاه تهران، پردیس فارابی، قم، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۱۳ \* تاریخ پذیرش ۹۸/۰۶/۲۷

### چکیده

با وجود مزایای متعدد جهانی شدن و ورود فناوری های پیشرفته، این عوامل زنجیره تأمین پایدار را در معرض ریسک های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی قرار می دهد. هدف پژوهش حاضر، توسعه یک رویکرد جدید برای شناسایی و اولویت بندی ریسک های موجود در زنجیره تأمین پایدار با استفاده از روش تحلیل حالت و دلایل شکست (FMEA) است. برای تحقق این هدف، ابتدا ریسک های موجود در زنجیره های پایدار صنعت باتری سازی شناسایی شده، سپس با نظر گروه های بین وظیفه ای و با بهره گیری از روش پیشنهادی این ریسک ها اولویت بندی می شوند. با توجه به اینکه فاکتورهای ریسک شامل احتمال، شدت و قابلیت شناسایی به صورت متغیرهای فازی بوده، در این پژوهش از اعداد اولویت ریسک فازی (FRPN) برای بررسی حالات شکست استفاده می شود. اعداد اولویت ریسک فازی به صورت میانگین هندسی موزون فازی فاکتورهای ریسک تعریف و با کمک مجموعه های سطوح برش آلفا و مدل برنامه ریزی خطی محاسبه می شود. سپس با توجه به ناکارایی رویکردهای فازی اولویت بندی عوامل ریسک پایدار، در رویکرد پیشنهادی از روابط ترجیح فازی برای این منظور استفاده می شود. نتایج نشان دهنده آن است که رویکرد پیشنهادی قادر است با کارایی محاسباتی بالایی نتایج مشابهی را ارائه دهد.

**کلمات کلیدی:** اعداد اولویت ریسک فازی، روابط ترجیح فازی، زنجیره تأمین پایدار، فاکتورهای ریسک.

## ۱- مقدمه

امروزه به علت افزایش عدم اطمینان و بروز عواملی نظیر مسائل سیاسی، نوسانات تقاضا، تغییرات فناوری، ناپایداری‌های مالی و حوادث طبیعی، سازمان‌ها برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش قابلیت تحمل زنجیره تأمین خود مجبور به صرف منابع زیادی برای مواجهه با این ریسک‌ها شده‌اند. توجه به این عدم اطمینان‌ها و عوامل ایجادکننده انواع ریسک موجب شده است تا مدیریت ریسک به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین موضوعات پژوهشی در ادبیات مدیریت عملیات و زنجیره تأمین مطرح شود (Narasimhan & Talluri, 2009; Vanany et al., 2009; Anderson & Anderson, 2009).

گرایش به این موضوع از عدم اطمینان پیوسته در اقتصاد جهانی، روندهای کسب‌وکار مانند برون‌سپاری و پیشرفت در فناوری اطلاعات ناشی می‌شود که منجر به توسعه زنجیره‌های تأمین پیچیده جهانی شده است (Trkman & McCormack, 2009). به‌رغم منافع عمده این‌گونه زنجیره‌های تأمین، آن‌ها آسیب‌پذیرتر هستند و سازمان‌ها را در معرض سطوح بالاتری از ریسک قرار می‌دهند.

بدون تردید توجه به پایداری به‌صورت یک استراتژی مؤثر برای مواجهه با برخی از چالش‌های زنجیره‌های تأمین جهانی تشخیص داده شده است. پایداری زنجیره تأمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع کاهش هزینه و سودآوری بلندمدت شرکت‌ها است (Wang & Sarkis, 2013). مسئولیت‌پذیری مدیران زنجیره تأمین باعث شده است آن‌ها تصمیماتی را در خصوص منبع یابی پایدار، گسترش رضایت محلی، مدیریت روابط و بازیابی دارایی‌ها برای کاهش هزینه‌ها و ریسک‌های مرتبط با پایداری زنجیره تأمین بگیرند. پایداری به افزایش توان رقابت‌پذیری و بهبود عملکرد مالی منجر می‌شود و سرمایه بیشتری را برای شرکت‌ها جهت کاهش اثرات ریسک‌های بالقوه کسب‌وکار فراهم می‌سازد (Godfrey et al, 2009; Olson & Wu, 2010). بر اساس مفهوم پایداری تصمیمات کنونی سازمان‌ها بر روی وضعیت آینده محیط طبیعی، جوامع و بقای کسب‌وکار تأثیر می‌گذارد (Krysiak, 2009). پایداری دستیابی استراتژیک و تلفیق اهداف اجتماعی، محیطی و اقتصادی سازمان از طریق هماهنگی سامانند فرآیندهای اصلی تجاری برای بهبود عملکرد اقتصادی بلندمدت یک شرکت و شبکه ارزش آن است (Carter & Rogers, 2008). ایده ابعاد سه‌گانه پایداری به‌منظور دستیابی به تعادل بین ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه شده است. استراتژی پایداری باید عدم اطمینان آینده را در نظر بگیرد، که نیاز به افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای رسیدن به پایداری بیشتر زنجیره تأمین دارد. در ابتدا هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ریسک‌های مرتبط به محیط طبیعی و جامعه منتقل می‌شوند. همچنین تا حد زیادی آن‌ها به درون زنجیره‌های تأمین منتقل و به‌وسیله تعداد زیادی از تأمین‌کنندگان جذب می‌شوند. از سوی دیگر، آگاهی رو به رشد مشتریان از اهمیت پذیرش استراتژی‌های پایداری و همچنین توسعه شاخص‌های دقیق‌تر پایداری برای شرایط کاری، حوادث، مقدار کربن و شاخص‌های فساد باعث شده است تا شرکت‌ها این هزینه‌ها و ریسک‌های پایداری را مورد توجه قرار دهند. وقایع اخیر زنجیره تأمین مانند گوشت اسب سوپرمارکت‌های اروپایی، ریختن ساختمان پلاسکو و شرایط کاری ضعیف تأمین‌کنندگان اپل نشان می‌دهند که چگونه ریسک‌های پایداری بر روی یک کسب و کار می‌تواند تاثیر بگذارد.

مسئولیت مدیران زنجیره تأمین، تصمیم‌گیری در مورد منابع پایدار، توسعه محلی، مدیریت ارتباطات و بازیابی دارایی‌ها، در کاهش هزینه‌ها و به حداقل رساندن ریسک‌های پایداری است. در نتیجه، شناسایی ریسک‌های زنجیره تأمین پایدار، ارزیابی تاثیر آنها و توسعه ابزارهای مدیریت ریسک به مسئله مهمی برای مدیریت زنجیره تأمین پایدار تبدیل شده است (Hofmann et al, 2014). تعداد کلیدی از عوامل ریسک ممکن است تأثیر قابل توجهی بر روی عملکرد مدیریت زنجیره تأمین داشته باشد. شناسایی عوامل ریسک کلیدی به ویژه هنگامی که منابع مدیریت ریسک محدود می‌شود، برای مدیران ضروری است. به‌رغم علاقه زیاد محققان در زمینه رابطه بین پایداری زنجیره تأمین و ریسک‌ها، تحقیقات کمی در خصوص ریسک‌های مرتبط با پایداری زنجیره تأمین صورت گرفته است. برخی از این تحقیقات تنها به ریسک‌های محیطی (Cousins et al, 2004) و برخی دیگر نیز به ابعاد مالی پرداخته‌اند. اندرسون (۲۰۰۶) که تحقیقات اولیه در این زمینه را انجام داده است، معتقد است هر یک از استراتژی‌های مدیریت ریسک باید ریسک‌های مرتبط با پایداری را در نظر بگیرد. با این حال در این تحقیقات تنها بر روی

تأثیرات منفی عملکرد ضعیف پایداری صرفاً از جنبه مدیریت مالی پرداخته شده است. هافمن و همکاران (۲۰۱۴) فرایندهایی را که به وسیله آن‌ها مسائل زنجیره تأمین ممکن است ریسک های پایداری را ایجاد کند را مطالعه کرده اند.

یکی از روش‌های شناسایی و ارزیابی ریسک، روش تحلیل حالت و دلایل شکست<sup>۱</sup> (FMEA) است؛ FMEA ابزار تحلیل ریسک برای شناسایی و حذف شکست‌ها، مسائل و خطاهای بالقوه است که درزمینه قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌ها، طراحی فرایند و خدمات بکار می‌رود (Düe et al., 2013). حالت شکست به وضعیتی اشاره دارد که دران حالت یک جزء، سیستم، فرایند و غیره به‌طور بالقوه می‌تواند بشکند و اجازه ندهد تا به اهداف طراحی برسیم. در این روش، اولویت حالات شکست با اعداد اولویت ریسک تعیین می‌شود که با ضرب فاکتورهای ریسک شامل احتمال وقوع (O)، شدت (S) و قابلیت شناسایی (D) ریسک محاسبه می‌شود (Tuncel & Alpan, 2010). هدف پژوهش حاضر، توسعه یک روش جدید برای محاسبه اعداد اولویت ریسک فازی<sup>۲</sup> (FRPN) جهت شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های موجود در زنجیره تأمین پایدار با استفاده از تحلیل حالت و دلایل شکست است. اعداد اولویت ریسک فازی به‌صورت میانگین هندسی موزون فازی فاکتورهای ریسک تعریف و با کمک مجموعه‌های سطوح برش  $\alpha$  و مدل برنامه ریزی خطی محاسبه می‌شود. سپس با توجه به ناکارایی رویکردهای فازی موجود در اولویت‌بندی عوامل ریسک به‌ویژه زمانی که تعداد فاکتورهای ریسک زیاد می‌شود، در روش پیشنهادی از روابط ترجیح فازی برای این منظور استفاده می‌شود. ابتدا ریسک‌های موجود در زنجیره تأمین پایدار شناسایی و سپس با بکارگیری این روش و با نظر تیم‌های بین‌وظیفه‌ای این ریسک‌ها در حوزه زنجیره تأمین صنعت باطری مورد ارزیابی و اولویت‌بندی قرار می‌گیرند. در قسمت ۲ به بررسی مبانی و ادبیات مدیریت و ارزیابی ریسک و سپس بعد از تشریح ریسک‌های پایداری زنجیره تأمین در قسمت ۳، رویکرد پیشنهادی را در قسمت ۴ ارائه خواهیم کرد. درنهایت و در قسمت ۵، عملکرد رویکرد پیشنهادی مورد تحلیل و پیشنهادات کاربردی ارائه می‌شود.

## ۲- روش شناسی پژوهش

الف) پیشینه نظری

در تحقیقات متعددی به بحث مدیریت و ارزیابی ریسک به‌طور عام و در زنجیره تأمین به‌طور خاص پرداخته شده است. این تحقیقات را می‌توان به چند دسته تقسیم کرد؛ اول مطالعاتی که در آن‌ها به مرور ادبیات مدیریت ریسک زنجیره تأمین پرداخته شده است (Tang, 2006). ریسک زنجیره تأمین به‌صورت حاصل ضرب احتمال در اثر یک رخداد است و دو شاخص میزان تأثیر و احتمال وقوع ریسک در قالب ماتریس احتمال - اثر ریسک مورد استفاده قرار گرفته است (Thun & Hoening, 2011). FMEA یک ابزار بهبود کیفیت است که ابتدا به‌صورت یک متدولوژی طراحی در دهه ۱۹۶۰ در صنعت هوافضا توسعه داده شد. با این حال، این ابزار به دلایل مختلفی از قبیل عدم توجه به عدم اطمینان، در نظر گرفتن وزن برابر برای فاکتورهای ریسک و در نظر نگرفتن فاکتورها دیگر ارزیابی ریسک مورد انتقاد قرار گرفته است. بسیاری از محققان از منطق فازی برای بهبود عملکرد این ابزار استفاده کرده‌اند (Safari et al., 2016; Wang et al., 2009). چانگ و همکاران (۱۹۹۹) از مجموعه‌های فازی برای ارزیابی فاکتورهای ریسک استفاده و سپس اولویت‌های ریسک حالات شکست بالقوه را با استفاده از تحلیل خاکستری تعیین کرده‌اند. باراگلیا و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از روش تاپسیس فازی و بکارگیری مجموعه‌های فازی برای ارزیابی فاکتورهای ریسک و وزن‌های اهمیت نسبی به اولویت‌بندی حالات شکست پرداختند. چن و کو (۲۰۰۷) با استفاده از عملگر متوسط هندسی موزون فازی<sup>۳</sup>، عدد اولویت ریسک فازی را محاسبه کردند. وانگ و همکاران (۲۰۰۹) یک تعریف جدید برای محاسبه اعداد اولویت ریسک فازی با استفاده از عملگر میانگین هندسی موزون فازی<sup>۴</sup> پیشنهاد کردند. در این مدل، عدد اولویت ریسک فازی با استفاده از مجموعه‌های برش  $\alpha$ <sup>۵</sup> و مدل برنامه ریزی خطی بوسیله روش قطعی سازی

<sup>۱</sup>Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

<sup>۲</sup>Fuzzy Risk Priority Numbers (FRPNs)

<sup>۳</sup>Fuzzy ordered weighted geometric averaging

<sup>۴</sup>Fuzzy weighted geometric mean

<sup>۵</sup> $\alpha$  - cut

مرکز ثقل برای اولویت بندی حالات شکست بدست می آمد. ژانگ و چو (۲۰۱۱) برای بالا بردن دقت و استواری اعداد اولویت ریسک فازی با ترکیب روش حداقل مربعات موزون و رتبه بندی جزئی، یک روش مبتنی بر اعداد اولویت ریسک فازی مبتنی بر روش وانگ و همکاران (۲۰۰۹) پیشنهاد کردند. آنها از مفهوم روابط ترجیح فازی با استفاده از مفهوم فاصله همینگ<sup>۶</sup> برای اولویت بندی جزئی مقادیر اعداد اولویت ریسک فازی استفاده کردند. با این حال، این روش به مقایسات زوجی هر یک از مقادیر اعداد اولویت ریسک فازی نیاز دارد که با افزایش تعداد حالات شکست باعث ناکارایی محاسباتی آن می شود. لیو و همکاران (۲۰۱۲) به ارزیابی ریسک در FMEA با استفاده از روش ویکور پرداختند. آنها از روش قطعی سازی برای محاسبه مقدار دقیق امتیاز اعداد اولویت ریسک استفاده کردند. به زعم ماندال و مایتی (۲۰۱۴) در رویکرد قطعی سازی اعداد ریسک فازی، با محاسبه یک مقدار دقیق برای اعداد ریسک و سپس تصمیم گیری بر اساس این مقدار، استواری تصمیمات مورد تردید قرار می گیرد؛ در واقع با تصمیم گیری براساس یک مقدار قطعی، آنتروپی موجود در مجموعه های فازی نادیده گرفته می شود. آنها برای حل این مشکل، با ترکیب اندازه مقدار مشابهت اعداد فازی و تئوری امکان یک رویکرد یکپارچه برای گروه بندی حالات شکست پیشنهاد کردند. جیانگ و همکاران (۲۰۱۷) برای کاهش کاستی های موجود در محاسبه اعداد اولویت ریسک فازی، یک روش گواه فازی<sup>۷</sup> جدید را با استفاده از مجموعه های فازی و تئوری گواه دامپستر و شافر پیشنهاد کردند.

ب) ریسک های پایداری زنجیره تامین

عامل ریسک به صورت عدم اطمینان مرتبط با وقوع هر رویدادی در نظر گرفته می شود (Gurnani et al., 2012). دسته بندی های مختلفی از ریسک های مربوط به مدیریت زنجیره تامین وجود دارد، مانند عوامل ریسک اقتصادی، عوامل ریسک زیست محیطی و عوامل ریسک اجتماعی. طیف گسترده ای از ریسک در شبکه های زنجیره تامین وجود دارد، به طوری که این ریسک ها را می توان با توجه به اینکه منبع ریسک در داخل (درونزا) یا خارج (برونزا) شبکه زنجیره تامین است طبقه بندی کرد (Vilko & Hallikas, 2012). ریسک های عام زنجیره تامین شامل ریسک های عرضه مانند محدودیت های ظرفیت عرضه، مسائل کیفیت، مسائل نقدینگی تامین کننده، وابستگی تامین کننده، تغییرات طراحی محصول، تاخیرات تحویل (Chopra & Sodhi, 2004)، ریسک های تدارکات مانند نرخ های خرید، موجودی ها و خروج موجودی است (Hallikas et al, 2002). از سوی دیگر، آگاهی رو به رشد بازارها و جوامع از کسب و کارهای پایدار، ریسک های پایداری مختلفی را برای سازمان ها به بار آورده است. این ریسک ها در جنبه های مختلفی متفاوت از ریسک های عام زنجیره تامین هستند. این ریسک ها به جای اختلال در عملیات زنجیره تامین، به نتایج مرتبط با اکوسیستم طبیعی، شهرت شرکت، نتایج مالی و همچنین رعایت قوانین اشاره دارد. با توجه به بعد محیطی، می بایست نیازمندی های مرتبط با کیفیت یک اکوسیستم مشترک را برآورده ساخت؛ بعد اجتماعی به ایفای مسئولیت نسبت به کارمندان، مشتریان، شرکای تجاری، دولت ها و جوامع اشاره دارد و بعد مالی به ریسک های مرتبط با شرایط مالی، رفتار فریب آمیز شرکت ها و افراد و تلاش برای رشد پایدار مالی مربوط می شود (Pullman et al., 2009; Porter & Kramer, 2007).

بر اساس گزارش پیمان جهانی سازمان ملل، ریسک های پایداری بسیاری از صنایع شامل انتشار گازهای گلخانه ای، بلایای طبیعی، حوادث، مصرف انرژی، ضایعات بسته بندی، صدمات محیطی در لجستیک و حمل و نقل می شود. ریسک های دیگر پایداری ممکن است شامل تحریم محصولات شرکت، دعوی قضایی شرکت ها تا جبران صدمات مالی ناشی از حوادث محیطی، قانون شکنی، رفتار غیراخلاقی، ریسک های عدالت اجتماعی ناشی از اقدامات کاری و استخدام ناعادلانه، افزایش قیمت کالا و انرژی در نتیجه کمبود سوخت باشد. رویدادهای ریسک اجتماعی مانند کار کودک، برخورد غیراخلاقی با حیوانات، بی توجهی به محیط زیست، تثبیت قیمت، اتهامات رشوه، تقلب و نقض حق ثبت اختراع است (Hofmann et al, 2014). این ریسک ها با توجه به اینکه دارای تأثیر عمده ای بر روی شهرت سازمان ها هستند و می توانند باعث از دست دادن درآمد آن ها شود، تهدیداتی را برای شرکت ها به همراه دارد. علاوه بر این، این گونه ریسک ها ممکن است بدون هیچ گونه اختلال در عملیات شرکت ها، تأثیر

<sup>۶</sup>Hamming distance

<sup>۷</sup>Fuzzy evidential method

مخربی بر روی آن‌ها داشته باشد. ریسک‌های مرتبط با سه وجه اصلی پایداری در جدول ۱ آورده شده است که حاصل ترکیب طبقه‌بندی‌هایی است که در ادبیات تحقیق یافت شده است (Anderson, 2006; Giannakis & Papadopoulos, 2016; Haffman et al, 2014; Song et al, 2017).

جدول شماره (۱): ابعاد و مؤلفه‌های ریسک‌های پایداری زنجیره تأمین

ابعاد ریسک پایداری	عوامل	تعریف	منابع
	نوسانات قیمت/هزینه (REC <sub>1</sub> )	بی‌ثباتی قیمت و هزینه که نمی‌تواند زمان تحویل مطمئن و به‌موقع و حفظ کیفیت را تضمین کند.	(Giannakis & Papadopoulos, 2016; Tang & Musa, 2011)
	تورم و تغییرات نرخ ارز (REC <sub>2</sub> )	تورم و تغییرات نرخ ارز به دغدغه‌های مالی تبدیل می‌شود، و اثربخشی تأمین پایدار را تحت تأثیر قرار می‌دهد.	(Song et al., 2017; Tummala & Schoenherr, 2011)
ریسک اقتصادی (REC)	کاهش سهم بازار (REC <sub>3</sub> )	کاهش سهم بازار ناشی از عوامل خارجی و داخلی (به‌عنوان مثال، رقابت و کیفیت پایین).	(Afgan & Carvalho, 2004)
	از دست دادن اعتبار و آسیب به برندهای تجاری (REC <sub>4</sub> )	از دست دادن شهرت و اعتبار شرکت باعث می‌شود مشتریان شرکت را به عنوان منبع بالقوه رفع نیازشان در نظر نداشته باشند.	(Sodhi & Tang, 2009)
	تحریم (REC <sub>5</sub> )	ممانعت از استفاده، خرید، یا مقابله با یک سازمان، که معمولاً به دلایل اجتماعی، اخلاقی و سیاسی رخ می‌دهد.	(Giannakis & Papadopoulos, 2016; Spicher et al., 2009)
	بحران‌های مالی (REC <sub>6</sub> )	بخش بزرگی از ارزش اسمی دارایی‌های مالی را به‌طور ناگهانی از دست دادن.	(Giannakis & Papadopoulos, 2016)
	محیط کار ناسالم و خطرناک (RSO <sub>1</sub> )	شرایط کاری با عملیات خطرناک و محل کار نامطمئن / استفاده از مواد خطرناک که ایمنی و سلامت کارکنان را تهدید می‌کند.	(Halldórsson et al., 2009)
ریسک اجتماعی (RSO)	نقض حقوق بشر (RSO <sub>2</sub> )	رفتاری که کرامت انسانی فردی را نقض کند، به‌عنوان مثال، استخدام کودکان و کار اجباری، تبعیض، زمان کار بیشتر از الزامات قانونی.	(Giannakis & Papadopoulos, 2016; Song et al., 2017; Clift, 2003)
	عدم تحقق تعهد اجتماعی (RSO <sub>3</sub> )	ناتوانی در مشارکت با جامعه محلی، آموزش، فرهنگ و توسعه فناوری، ایجاد شغل، بهداشت و درمان و سرمایه‌گذاری اجتماعی	(Maloni & Brown, 2006; Song et al., 2017)
	نقض اخلاق در کسب و کار (RSO <sub>4</sub> )	رفتارهایی که اخلاق کسب و کار را نقض کند، به‌عنوان مثال، فساد، تجارت ناعادلانه، تجاوز به حریم خصوصی.	(Roberts, 2003; Song et al., 2017)
	بی‌ثباتی اجتماعی / ناآرامی (RSO <sub>5</sub> )	بی‌نظمی و اختلال به علت اعتصاب، توقف کار و تظاهرات.	(Giannakis & Papadopoulos, 2016)
ریسک زیست‌محیطی (REN)	بلایای طبیعی (REN <sub>1</sub> )	اختلالاتی با دفعات کم اما شدیداً آسیب‌زا (طوفان، سیل، طوفان، زلزله).	(Giannakis & Papadopoulos, 2016)
	استفاده ناکارآمد از منابع (REN <sub>2</sub> )	استفاده ناکارآمد از منابع به منظور تولید و تحویل محصولات و یا خدمات.	(Giannakis & Papadopoulos, 2016; Song et al., 2017)
	آلودگی محیط	آلودگی‌های آب، هوا و خاک ناشی از	(Safari et al, 2016; Song et al., 2017)

2017)	عملیات شرکت یا محصولات تولیدی.	زیست (REN <sub>3</sub> )
(Dües et al., 2013; Song et al., 2017)	به مواد غیرقابل استفاده، ناخواسته که در حین کار تولید شود و یا ناشی از یک فرآیند، مانند تولید و حمل و نقل باشند اطلاق می‌شود.	تولید زباله‌های خطرناک (REN <sub>4</sub> )
(Giannakis & Papadopoulos, 2016)	عدم تطابق با قوانین زیست محیطی، اشتغال و مالی، قوانین ضد رشوه‌خواری، قوانین کار / قانون برابری.	عدم رعایت قوانین پایداری (REN <sub>5</sub> )

ج) رویکرد پیشنهادی

در این قسمت پس از ارائه یک سری تعاریف مورد نیاز در زمینه تئوری مجموعه‌های فازی، به نحوه محاسبه اعداد اولویت ریسک فازی بر اساس روش وانگ و همکاران (۲۰۰۹) و سپس اولویت‌بندی ریسک‌های فازی پرداخته می‌شود.

تعریف ۱ (Zadeh, 1965). اعداد فازی گونه خاصی از مجموعه‌های فازی هستند. یک عدد فازی یک مجموعه محدب است که با یک بازه معین و تابع عضویت مشخص می‌شود. اعداد فازی مثلی و دوزنقه‌ای از مهم‌ترین این اعداد هستند. تابع عضویت عدد فازی مثلی  $\tilde{A} = (a, b, c)$  به صورت زیر تعریف می‌شود  $(\mu_{\tilde{A}}(x) = R \rightarrow [0, 1])$ :

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{(x-a)}{(b-a)} & a \leq x \leq b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)} & b \leq x \leq c \\ 0 & x \geq a_3 \end{cases} \quad \text{رابطه (۱)}$$

تعریف ۲ (Dubois & Prade, 1980). دو عدد فازی  $\tilde{A}_1 = (a_1, b_2, c_3)$  و  $\tilde{A}_2 = (a_2, b_2, c_2)$  و عدد اسکالر  $\lambda$  را در نظر بگیرید. بر اساس اصل گسترش زاده (۱۹۷۸) عملیات جبری بر روی اعداد فازی مثلی به صورت روابط زیر انجام می‌شود:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 + \tilde{A}_2 &= (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2) \\ \tilde{A}_1 - \tilde{A}_2 &= (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1)(a_1 - c_2, b_1 - b_2, c_1 - a_2) \\ \tilde{A}_1 \times \tilde{A}_2 &= (a_1 a_2, b_1 b_2, c_1 c_2) \text{ if } \tilde{A}_1, \tilde{A}_2 \geq 0 \text{ or } \tilde{A}_1, \tilde{A}_2 < 0 \\ \lambda \tilde{A}_1 &= \begin{cases} (\lambda a_1, \lambda b_1, \lambda c_1) & \lambda > 0 \\ (\lambda c_1, \lambda b_1, \lambda a_1)_{LR} & \lambda < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

تعریف ۳.  $\tilde{A}$  را یک مجموعه فازی در نظر بگیرید. مجموعه‌های برش سطح  $\alpha$  این مجموعه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$A_\alpha = \{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \quad \text{رابطه (۲)}$$

بر این اساس، سطح برش  $\alpha$  عدد فازی مثلی  $\tilde{A}$  به صورت زیر خواهد بود:

$$A_\alpha = [(A)_\alpha^L, (A)_\alpha^U] = [a + \alpha(b - a), c - \alpha(c - b)], 0 \leq \alpha \leq 1 \quad \text{رابطه (۳)}$$

بر اساس اصل گسترش زاده (۱۹۸۷) مجموعه فازی  $\tilde{A}$  را می‌توان بر اساس مجموعه‌های سطح برش  $\alpha$  نیز بیان کرد:

$$\tilde{A} = \bigcup_{\alpha} \alpha A_\alpha, 0 \leq \alpha \leq 1$$

قضیه ۱. برای عدد فازی مثلی  $\tilde{A}$ ،  $a$ ،  $b$  و  $c$  را می‌توان با استفاده از مجموعه‌های برش  $\alpha$  به صورت زیر به دست آورد:

$$\begin{aligned} a &= (A)_0^L = \min\{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq 0\} \\ b &= A_1^L = A_1^U = \min\{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq 1\} = \max\{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq 1\} \\ c &= (A)_0^U = \max\{x \in X \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq 0\} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴)}$$

اثبات. بر اساس مفهوم برش سطح صفر و یک داریم:

$$A_0 = [(A)_0^L, (A)_0^U] = [a + 0(b - a), c - 0(c - b)] = [a, c]$$

$$A_1 = [(A)_1^L, (A)_1^U] = [a + (b - a), c - (c - b)] = [b, b]$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$a = (A)_0^L$$

$$b = (A)_1^L = (A)_1^U$$

$$c = (A)_0^U$$

تعریف ۴ (Wang et al., 2009). میانگین موزون هندسی فازی  $n$  عدد فازی به صورت زیر بیان می شود:

$$\tilde{y} = f(\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n; \tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_n) = (\tilde{A}_1)^{\frac{\tilde{w}_1}{\tilde{w}_1 + \dots + \tilde{w}_n}} \times (\tilde{A}_2)^{\frac{\tilde{w}_2}{\tilde{w}_1 + \dots + \tilde{w}_n}} \dots \times (\tilde{A}_n)^{\frac{\tilde{w}_n}{\tilde{w}_1 + \dots + \tilde{w}_n}} =$$

$$\prod_{i=1}^n (\tilde{A}_i)^{\frac{\tilde{w}_i}{\sum_{j=1}^n \tilde{w}_j}} = (y_1, y_2, y_3) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n$  اعداد فازی مثبت هستند و  $\tilde{w}_1, \dots, \tilde{w}_n$  به ترتیب وزن های فازی این اعداد هستند. بر اساس قضیه ۱،  $\tilde{y}$  یک عدد فازی مثلثی است که عناصر آن با استفاده از مجموعه های سطح برش صفر و یک و با استفاده از مدل های ریاضی زیر محاسبه می شود:

$$y_1 = \text{Min} \prod_{i=1}^n (\tilde{A}_i)^{\frac{\tilde{w}_i}{\sum_{j=1}^n \tilde{w}_j}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\text{s.t.} \quad (w_i)_0^L \leq w_i \leq (w_i)_0^U, \quad i = 1, \dots, n$$

$$(A_i)_0^L \leq A_i \leq (A_i)_0^U, \quad i = 1, \dots, n$$

$$y_2 = \text{Min} \prod_{i=1}^n (\tilde{A}_i)^{\frac{\tilde{w}_i}{\sum_{j=1}^n \tilde{w}_j}} = \text{Max} \prod_{i=1}^n (\tilde{A}_i)^{\frac{\tilde{w}_i}{\sum_{j=1}^n \tilde{w}_j}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\text{s.t.} \quad (w_i)_1^L \leq w_i \leq (w_i)_1^U, \quad i = 1, \dots, n$$

$$(A_i)_1^L \leq A_i \leq (A_i)_1^U, \quad i = 1, \dots, n$$

$$y_3 = \text{Max} \prod_{i=1}^n (\tilde{A}_i)^{\frac{\tilde{w}_i}{\sum_{j=1}^n \tilde{w}_j}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\text{s.t.} \quad (w_i)_0^L \leq w_i \leq (w_i)_0^U, \quad i = 1, \dots, n$$

$$(A_i)_0^L \leq A_i \leq (A_i)_0^U, \quad i = 1, \dots, n$$

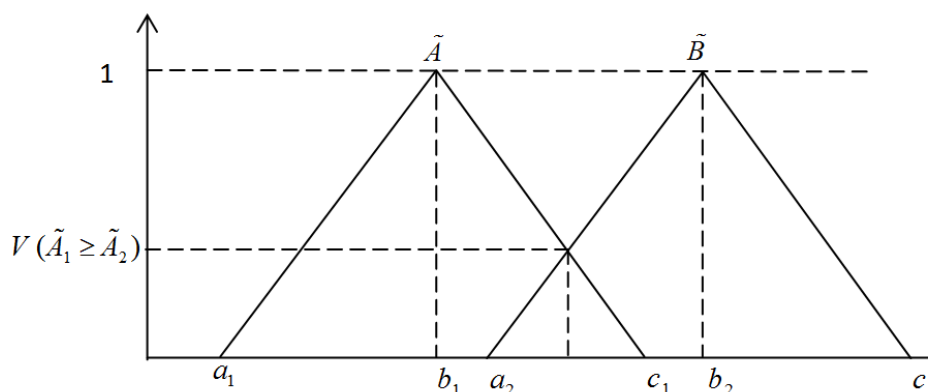
تعریف ۵ (Bonissone, 1980). درجه امکان بزرگی  $\tilde{A}_1$  از  $\tilde{A}_2$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$V(\tilde{A}_1 \geq \tilde{A}_2) = \sup[\min(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)] \quad \text{رابطه (۹)}$$

که مقدار آن با تابع عضویت زیر مشخص می شود:

$$V(\tilde{A}_1 \geq \tilde{A}_2) = \text{hgt}(\tilde{A}_1 \cap \tilde{A}_2) = \begin{cases} 1 & b_1 \geq b_2 \\ 0 & a_2 \geq c_1 \\ \frac{a_2 - c_1}{(b_1 - c_1) - (b_2 - a_2)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در شکل ۱،  $V(\tilde{A}_1 \geq \tilde{A}_2)$  نشان داده شده است.



شکل شماره (۱): درجه امکان  $V(\tilde{A}_1 \geq \tilde{A}_2)$

درجه امکان اینکه عدد فازی محدب  $\tilde{A}$  از  $k$  عدد فازی محدب  $\tilde{A}_i [i = 1, \dots, k]$  بزرگتر باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V(\tilde{A} \geq \tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_k) = \min_{i=1}^k V(\tilde{A} \geq \tilde{A}_i) \quad i = 1, 2, \dots, k$$

برخلاف FMEA کلاسیک، در FMEA جدید از عبارات زبانی فازی برای اعداد اولویت ریسک استفاده می‌شود. علاوه بر این، در FMEA کلاسیک فرض می‌شود که فاکتورهای ریسک  $S, O$  و  $D$  در محاسبه عدد اولویت ریسک دارای وزن برابر هستند. به‌زعم بن دایا و راتوف (۱۹۹۶) وزن‌های اهمیت نسبی فاکتورهای ریسک باید کاملاً متفاوت در نظر گرفته شوند. برای برطرف کردن این کاستی، برای محاسبه اعداد اولویت ریسک فازی، فاکتورهای ریسک با عبارات زبانی ارزیابی می‌شوند. جدول ۲ عبارات زبانی و اعداد فازی متناظر با این عبارات را که در این پژوهش برای ارزیابی فاکتورهای ریسک پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۳ عبارات زبانی و اعداد فازی متناظر با وزن اهمیت نسبی هر یک از فاکتورهای ریسک را بر اساس منبع (Maiti & Mandal, 2014) نشان می‌دهد.

جدول شماره (۲): متغیرهای زبانی و اعداد فازی مربوط به فاکتورهای ریسک

احتمال وقوع	شدت	قابلیت شناسایی	اعداد فازی
شکست غیرمحمول است	بدون تأثیر	تقریباً نامشخص	(۰, ۰, ۰/۲۵)
شکست‌های نسبتاً اندک	تأثیر کم	شانس پایین	(۰, ۰/۲۵, ۰/۵۰)
شکست‌های گاه به گاه	تأثیر متوسط	شانس متوسط	(۰/۲۵, ۰/۵, ۰/۷۵)
شکست‌های مکرر	تأثیر زیاد	شانس بالا	(۰/۵۰, ۰/۷۵, ۱)
شکست‌های غیرقابل اجتناب	تقریباً تأثیر مخرب	تقریباً مشخص	(۰/۷۵, ۱, ۱)

جدول شماره (۳): اعداد فازی مربوط به وزن اهمیت نسبی فاکتورهای ریسک

متغیرهای زبانی	اعداد فازی
خیلی کم	(۰, ۰, ۰/۲۵)
کم	(۰, ۰/۲۵, ۰/۵۰)
متوسط	(۰/۲۵, ۰/۵, ۰/۷۵)
زیاد	(۰/۵۰, ۰/۷۵, ۱)
خیلی زیاد	(۰/۷۵, ۱, ۱)

فرض کنید  $n$  حالت شکست برای ارزیابی وجود داشته باشد ( $i = 1, \dots, n$ )، که توسط  $m$  تیم FMEA می‌بایست اولویت بندی شود ( $j = 1, \dots, m$ ). فرض کنید  $\tilde{D}_{ij} = (D_{ijL}, D_{ijM}, D_{ijU})$  و  $\tilde{S}_{ij} = (S_{ijL}, S_{ijM}, S_{ijU})$ ،  $\tilde{O}_{ij} = (O_{ijL}, O_{ijM}, O_{ijU})$ ،  $\tilde{w}o_{ij} = (wo_{ijL}, wo_{ijM}, wo_{ijU})$  و



تیم تهیه شده است.  $h_j$  وزن های اهمیت نسبی  $m$  تیم ارزیابی باشد ( $\sum_{j=1}^m h_j = 1$ ). براساس این فرضیات  $n$  حالت شکست را می توان اولویت بندی کرد. برای این منظور ابتدا براساس روابط زیر نظرات تیم های ارزیابی را جمع می کنیم:

$$\tilde{O}_i = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{O}_{ij} = \left( \sum_{j=1}^m h_j O_{ijL}, \sum_{j=1}^m h_j O_{ijM}, \sum_{j=1}^m h_j O_{ijU} \right) = (O_{iL}, O_{iM}, O_{iU}), i = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{S}_{ij} = \left( \sum_{j=1}^m h_j S_{ijL}, \sum_{j=1}^m h_j S_{ijM}, \sum_{j=1}^m h_j S_{ijU} \right) = (S_{iL}, S_{iM}, S_{iU}), i = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$\tilde{D}_i = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{D}_{ij} = \left( \sum_{j=1}^m h_j D_{ijL}, \sum_{j=1}^m h_j D_{ijM}, \sum_{j=1}^m h_j D_{ijU} \right) = (D_{iL}, D_{iM}, D_{iU}), i = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$\tilde{w}_o = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{w}_{oj} = \left( \sum_{j=1}^m h_j w_{ojL}, \sum_{j=1}^m h_j w_{ojM}, \sum_{j=1}^m h_j w_{ojU} \right) = (w_{oL}, w_{oM}, w_{oU}) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\tilde{w}_s = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{w}_{sj} = \left( \sum_{j=1}^m h_j w_{sjL}, \sum_{j=1}^m h_j w_{sjM}, \sum_{j=1}^m h_j w_{sjU} \right) = (w_{sL}, w_{sM}, w_{sU}) \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\tilde{w}_d = \sum_{j=1}^m h_j \tilde{w}_{dj} = \left( \sum_{j=1}^m h_j w_{djL}, \sum_{j=1}^m h_j w_{djM}, \sum_{j=1}^m h_j w_{djU} \right) = (w_{dL}, w_{dM}, w_{dU}) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

در FMEA کلاسیک اعداد اولویت ریسک به صورت حاصل ضرب ساده فاکتورهای ریسک بدون در نظر گرفتن وزن های اهمیت نسبی آن ها تعریف می شد. برای حل این مشکل، وانگ و همکاران (۲۰۰۹) از میانگین موزون هندسی فازی برای محاسبه اعداد اولویت ریسک فازی استفاده کردند. باین حال، این روش دارایی ناکارایی محاسباتی است. در این پژوهش اعداد اولویت ریسک فازی به صورت میانگین موزون هندسی فازی تعریف می شود، با این تفاوت که به جای استفاده از برش های سطوح مختلف  $\alpha$  سپس محاسبه مرکز ثقل، تنها از برش های سطح صفر و یک و از روابط ترجیح فازی برای اولویت بندی ریسک های پایدار استفاده می شود.

بر اساس تعریف ۴، عدد اولویت ریسک فازی هر حالت شکست بر اساس رابطه زیر بدست می آید:

$$RPN_i = f(\tilde{O}_i, \tilde{S}_i, \tilde{D}_i; \tilde{w}_o, \tilde{w}_s, \tilde{w}_d) = (\tilde{O}_i)^{\frac{\tilde{w}_o}{w_o + w_s + w_o + d}} \times (\tilde{S}_i)^{\frac{\tilde{w}_s}{w_o + w_s + w_o + d}} \times (\tilde{D}_i)^{\frac{\tilde{w}_d}{w_o + w_s + w_o + d}} = (RPN_{iL}, RPN_{iM}, RPN_{iU}) \quad i = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

بر اساس قضیه ۱، با توجه به اینکه اعداد اولویت ریسک مربوط به هر یک از حالات شکست به صورت اعداد فازی مثلثی هستند، در رابطه فوق اعداد اولویت ریسک فازی مثلثی را می توان با مجموعه های برش سطح صفر و یک بر اساس مدل های زیر به دست آورد.

$$RPN_{iL} = \text{Min} \left( (O_i)^{\frac{w_o}{w_o + w_s + w_o + d}} \times (S_i)^{\frac{w_s}{w_o + w_s + w_o + d}} \times (D_i)^{\frac{w_d}{w_o + w_s + w_o + d}} \right)$$

s.t.

$$\begin{aligned} (O_i)_0^L &\leq O_i \leq (O_i)_0^U \\ (S_i)_0^L &\leq S_i \leq (S_i)_0^U \\ (D_i)_0^L &\leq D_i \leq (D_i)_0^U \\ (w_o)_0^L &\leq w_o \leq (w_o)_0^U \\ (w_s)_0^L &\leq w_s \leq (w_s)_0^U \\ (w_d)_0^L &\leq w_d \leq (w_d)_0^U \end{aligned} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$RPN_{iM} = Min \left( (O_i)^{\frac{wo}{wo+ws+wd}} \times (S_i)^{\frac{ws}{wo+ws+wd}} \times (D_i)^{\frac{wd}{wo+ws+wd}} \right)$$

$$s.t. \quad \begin{aligned} (O_i)_1^L &\leq O_i \leq (O_i)_1^U \\ (S_i)_1^L &\leq S_i \leq (S_i)_1^U \\ (D_i)_1^L &\leq D_i \leq (D_i)_1^U \\ (wo)_1^L &\leq wo \leq (wo)_1^U \\ (ws)_1^L &\leq ws \leq (ws)_1^U \\ (wd)_1^L &\leq wd \leq (wd)_1^U \end{aligned}$$

رابطه (۱۹)

$$RPN_{iU} = Max \left( (O_i)^{\frac{wo}{wo+ws+wd}} \times (S_i)^{\frac{ws}{wo+ws+wd}} \times (D_i)^{\frac{wd}{wo+ws+wd}} \right)$$

$$s.t. \quad \begin{aligned} (O_i)_0^L &\leq O_i \leq (O_i)_0^U \\ (S_i)_0^L &\leq S_i \leq (S_i)_0^U \\ (D_i)_0^L &\leq D_i \leq (D_i)_0^U \\ (wo)_0^L &\leq wo \leq (wo)_0^U \\ (ws)_0^L &\leq ws \leq (ws)_0^U \\ (wd)_0^L &\leq wd \leq (wd)_0^U \end{aligned}$$

رابطه (۲۰)

در این پژوهش برای اولویت‌بندی هر یک از ریسک‌های پایداری (حالات شکست) از مفهوم ترجیح‌فازی بونیسون (۱۹۸۰) بر اساس تعریف ۵ استفاده خواهد شد. در این روش برخلاف روش وانگ و همکاران (۲۰۰۹) برای اولویت‌بندی حالات شکست، تنها محاسبه سطوح برش صفر و یک اعداد اولویت‌فازی کافی است. درحالی‌که در روش وانگ و همکاران که مبتنی بر مفهوم مرکز ثقل عدد فازی است، نیاز به انجام محاسبات زیاد برای تعیین اعداد اولویت‌فازی در سطوح مختلف سطح برش و سپس محاسبه مرکز ثقل بر اساس مجموعه‌های سطح برش  $\alpha$  است. در روش پیشنهادی برای برطرف کردن این کاستی، از روابط ترجیحی برای مقایسه زوجی ریسک‌های پایداری بر اساس رابطه ۱۰ استفاده می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش به تشریح نحوه ارزیابی هر یک از ریسک‌های پایداری زنجیره تأمین با به‌کارگیری روش رویکرد پیشنهادی در صنعت تولید باتری و سپس ارائه بینش‌های مدیریتی می‌پردازیم. صنعت تولید باتری یکی از صنایع مهم و راهبردی در زنجیره ارزش اقتصادی هر کشوری است که در صورت عدم توجه به عوامل ریسک‌های اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی در زنجیره تأمین آن می‌تواند در بلندمدت این صنعت را با مشکلات بزرگی روبه‌رو کند.

شرکت توسعه منابع انرژی توان به‌عنوان بزرگ‌ترین گروه تولیدکننده باتری در خاورمیانه، باهدف پشتیبانی منسجم از نیروهای مسلح در حوزه انرژی و مشارکت در طرح‌های ملی مرتبط با انرژی است. زیرساخت این شرکت همان شرکت سهامی باتری-ساز نیرو است که ده‌ها سال در ایران و جهان آن را با برند خوش‌نام صبا باتری می‌شناسند. شرکت توان با برخورداری از ظرفیت‌های صنعتی مبتنی بر فناوری روز به‌عنوان مرجع اصلی تأمین نیاز نیروهای مسلح، شرکتی است که در عرصه نیازهای کشور به انرژی نیز به‌عنوان شرکت و نهاد معتبر و تأثیرگذار حضور دارد و در طرح‌های اولویت‌دار ملی با سایر سازمان‌ها و نهادهای قانونی کشور همکاری می‌کند. حوزه فعالیت شرکت توسعه منابع انرژی توان به‌طور خلاصه عبارت است از تحقیق، طراحی و توسعه سامانه‌ها و آرایه‌های پیشرفته هیبریدی متشکل از دستگاه‌های تولید انرژی، دستگاه‌های ذخیره‌ساز و خدمات مدیریت مصرف انرژی.

برای انجام این پژوهش، یک تیم ارزیابی ریسک‌های پایداری شامل ۷ تیم بین‌وظیفه‌ای برای ارزیابی ۱۶ عامل ریسک پایداری تشکیل می‌شود. این عوامل با مطالعه ادبیات تحقیق شناسایی و سپس توسط تیم‌های ارزیابی در صنعت باتری مورد تأیید

قرار گرفته‌اند (جدول ۱). به دلیل سختی ارزیابی دقیق فاکتورهای ریسک و وزن‌های اهمیت نسبی، از این تیم‌ها خواسته می‌شود تا با استفاده از جداول ۲ و ۳ به ارزیابی این فاکتورها بپردازند. با توجه به اهمیت متفاوت هر یک از این تیم‌ها، به هریک از آن‌ها وزن‌های متفاوتی تخصیص داده می‌شود. ابتدا از تیم‌ها خواسته می‌شود تا هر یک از مؤلفه‌های ریسک شامل احتمال، شدت و قابلیت شناسایی را با استفاده از متغیرهای زبانی جدول ۳ مورد ارزیابی قرار دهند. وزن‌های اهمیت تجمعی این سه فاکتور پس از تبدیل متغیرهای زبانی به اعداد فازی و سپس تجمیع نظرات خبرگان با استفاده از روابط ۱۶-۱۴ محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است.

جدول شماره (۴): ارزیابی تجمعی وزن‌های اهمیت نسبی فاکتورهای ریسک

وزن‌های اهمیت نسبی	احتمال	شدت	قابلیت شناسایی
(۰/۴۵۲، ۰/۶۸۷، ۰/۸۸۱)	(۰/۵۸۱، ۰/۹۸۴، ۰/۵۸۱)	(۰/۱۵۳، ۰/۳۱۵، ۰/۵۵۴)	

سپس این تیم‌ها ابعاد و عوامل ریسک‌های شناسایی شده پایداری که در جدول ۱ نشان داده شده است را برحسب هر یک از فاکتورهای ریسک با متغیرهای زبانی مورد ارزیابی قرار می‌دهند. وزن‌های تجمعی هر یک از عوامل ریسک‌های پایداری برحسب هر یک از فاکتورهای ریسک با استفاده از روابط ۱۳-۱۱ محاسبه و در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به اینکه وزن اهمیت فاکتورها و نمره عوامل ریسک پایداری به صورت اعداد فازی هستند، بر اساس رابطه ۱۷ ریسک کلی هر یک از ۱۶ عامل ریسک پایداری به صورت یک عدد فازی خواهد بود که بر اساس مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی روابط ۲۰-۱۸ بدست آورده شده است. این اعداد فازی به اعداد اولویت ریسک فازی اشاره دارد که در ستون آخر جدول ۵ آورده شده‌اند.

جدول شماره (۵): ارزیابی تجمعی احتمال، شدت و قابلیت شناسایی عوامل ریسک‌های پایداری

ریسک‌های پایداری	احتمال	شدت	قابلیت شناسایی	اعداد اولویت ریسک فازی
REC1	(۰/۴۶۱، ۰/۶۴۶، ۰/۸۳۱)	(۰/۳۱۴، ۰/۴۴۰، ۰/۵۶۵)	(۰/۲۸۸، ۰/۴۰۳، ۰/۵۱۸)	(۰/۳۳۵، ۰/۵۰۰، ۰/۶۹۲)
REC2	(۰/۴۲۶، ۰/۵۹۶، ۰/۷۶۷)	(۰/۴۱۰، ۰/۵۷۴، ۰/۷۳۸)	(۰/۳۰۵، ۰/۴۲۸، ۰/۵۵۰)	(۰/۳۷۴، ۰/۵۵۴، ۰/۷۳۴)
REC3	(۰/۴۶۶، ۰/۶۵۳، ۰/۸۳۹)	(۰/۴۳۰، ۰/۶۰۲، ۰/۷۷۴)	(۰/۲۹۷، ۰/۴۱۵، ۰/۵۳۴)	(۰/۳۸۷، ۰/۵۸۲، ۰/۷۸۱)
REC4	(۰/۴۲۶، ۰/۵۹۶، ۰/۷۶۷)	(۰/۳۳۰، ۰/۴۶۲، ۰/۵۹۴)	(۰/۳۵۸، ۰/۵۰۱، ۰/۶۴۴)	(۰/۳۵۸، ۰/۵۱۵، ۰/۶۸۸)
REC5	(۰/۴۵۸، ۰/۶۴۱، ۰/۸۲۵)	(۰/۳۱۰، ۰/۴۳۴، ۰/۵۵۸)	(۰/۲۸۵، ۰/۳۹۹، ۰/۵۱۴)	(۰/۳۳۱، ۰/۴۹۵، ۰/۶۸۵)
REC6	(۰/۴۹۰، ۰/۶۸۶، ۰/۸۸۳)	(۰/۴۳۰، ۰/۶۰۲، ۰/۷۷۴)	(۰/۴۲۸، ۰/۵۹۹، ۰/۷۷۰)	(۰/۴۴۲، ۰/۶۳۱، ۰/۸۳۱)
RSO1	(۰/۴۱۰، ۰/۵۷۴، ۰/۷۳۸)	(۰/۳۲۰، ۰/۴۴۸، ۰/۵۷۶)	(۰/۲۵۳، ۰/۳۵۴، ۰/۴۵۵)	(۰/۳۱۶، ۰/۴۷۲، ۰/۶۴۵)
RSO2	(۰/۴۹۳، ۰/۶۹۰، ۰/۸۸۷)	(۰/۳۶۰، ۰/۵۰۴، ۰/۶۴۸)	(۰/۴۹۷، ۰/۶۹۶، ۰/۸۹۵)	(۰/۴۰۶، ۰/۵۹۸، ۰/۸۱۲)
RSO3	(۰/۳۳۰، ۰/۴۶۱، ۰/۵۹۳)	(۰/۳۶۵، ۰/۵۱۱، ۰/۶۵۷)	(۰/۴۲۸، ۰/۵۹۹، ۰/۷۷۰)	(۰/۳۵۰، ۰/۵۰۵، ۰/۶۷۴)
RSO4	(۰/۳۸۶، ۰/۵۴۰، ۰/۶۹۵)	(۰/۳۶۲، ۰/۵۰۷، ۰/۶۵۲)	(۰/۳۴۱، ۰/۴۷۸، ۰/۶۱۴)	(۰/۳۶۱، ۰/۵۱۴، ۰/۶۷۱)
RSO5	(۰/۳۸۶، ۰/۵۴۰، ۰/۶۹۵)	(۰/۲۳۰، ۰/۳۲۲، ۰/۴۱۴)	(۰/۲۷۹، ۰/۳۹۱، ۰/۵۰۳)	(۰/۲۷۱، ۰/۴۰۳، ۰/۵۵۹)
REN1	(۰/۵۰۰، ۰/۷۰۰، ۰/۹۰۰)	(۰/۳۷۰، ۰/۵۱۸، ۰/۶۶۶)	(۰/۵۰۰، ۰/۷۰۰، ۰/۹۰۰)	(۰/۴۱۵، ۰/۶۱۰، ۰/۸۲۵)
REN2	(۰/۴۰۲، ۰/۵۶۳، ۰/۷۲۳)	(۰/۴۸۵، ۰/۶۷۹، ۰/۸۷۳)	(۰/۳۷۶، ۰/۵۲۷، ۰/۶۷۷)	(۰/۴۱۷، ۰/۶۰۷، ۰/۸۰۸)
REN3	(۰/۴۵۱، ۰/۶۳۱، ۰/۸۱۲)	(۰/۴۸۵، ۰/۶۷۹، ۰/۸۷۳)	(۰/۰۳۴، ۰/۰۴۷، ۰/۰۶۱)	(۰/۱۸۷، ۰/۴۲۰، ۰/۶۹۱)
REN4	(۰/۳۱۷، ۰/۴۴۳، ۰/۵۷۰)	(۰/۳۵۰، ۰/۴۹۰، ۰/۶۳۰)	(۰/۳۱۴، ۰/۴۴۰، ۰/۵۶۵)	(۰/۳۲۵، ۰/۴۶۴، ۰/۶۰۶)
REN5	(۰/۴۲۸، ۰/۵۹۹، ۰/۷۷۰)	(۰/۵۰۰، ۰/۷۰۰، ۰/۹۰۰)	(۰/۳۴۹، ۰/۴۸۹، ۰/۶۲۸)	(۰/۴۲۲، ۰/۶۲۱، ۰/۸۳۲)

سپس، از رابطه ۱۰ برای محاسبه درجه بزرگی هر یک از عوامل ریسک پایداری زنجیره تأمین نسبت به سایر عوامل استفاده می‌شود. این روش برخلاف روش وانگ و همکاران (۲۰۰۹) دارای کارایی محاسباتی بالایی است. مقدار درجه بزرگی اعداد اولویت ریسک فازی ۱۶ عامل ریسک پایداری نشان‌دهنده رتبه و اولویت این عوامل است که در جدول ۶ آورده شده‌اند. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، این نتایج با نتایج اولویت‌بندی روش وانگ و همکاران سازگاری معناداری دارد. بر اساس این نتایج، عوامل ریسک‌های پایداری در صنعت باطری به ترتیب اولویت شامل بحران‌های مالی، عدم رعایت قوانین پایداری، بلایای طبیعی، استفاده ناکارآمد از منابع، نقض حقوق بشر، کاهش سهم بازار و ... است.

جدول شماره (۶): رتبه‌بندی عوامل ریسک‌های پایداری بر اساس روش‌های مختلف

رتبه	رویکرد پیشنهادی		رتبه	مقدار بزرگی	ریسک‌های پایداری	REC 1
	مقدار قطعی	رویکرد وانگ و همکاران				
۱۱	۰/۵۰۹	۱۰	۰/۶۵۶	نوسانات قیمت/هزینه	REC 1	
۷	۰/۵۵۴	۷	۰/۷۹۱	تورم و تغییرات نرخ ارز	REC 2	
۶	۰/۵۸۳	۶	۰/۸۷۴	کاهش سهم بازار	REC 3	
۸	۰/۵۲۰	۸	۰/۶۸۰	از دست دادن اعتبار و آسیب به برندهای تجاری	REC 4	
۱۲	۰/۵۰۴	۱۲	۰/۶۴۱	تحریم	REC 5	
۱	۰/۶۳۵	۱	۱	بحران‌های مالی	REC 6	
۱۳	۰/۴۷۸	۱۳	۰/۵۶۱	محیط کار ناسالم و خطرناک	RSO 1	
۵	۰/۶۰۵	۵	۰/۹۱۸	نقض حقوق بشر	RSO 2	
۱۰	۰/۵۱۰	۱۱	۰/۶۴۸	عدم تحقق تعهد اجتماعی	RSO 3	
۹	۰/۵۱۵	۹	۰/۶۶۲	نقض اخلاق در کسب‌وکار	RSO 4	
۱۶	۰/۴۱۱	۱۶	۰/۳۳۹	بی‌ثباتی اجتماعی/ ناآرامی	RSO 5	
۳	۰/۶۱۷	۳	۰/۹۴۸	بلایای طبیعی	REN 1	
۴	۰/۶۱۱	۴	۰/۹۳۸	استفاده ناکارا از منابع	REN 2	
۱۵	۰/۴۳۳	۱۴	۰/۵۴۱	آلودگی محیط‌زیست	REN 3	
۱۴	۰/۴۶۵	۱۵	۰/۴۹۵	تولید زباله‌های خطرناک	REN 4	
۲	۰/۶۲۵	۲	۰/۹۷۵	عدم رعایت قوانین پایداری	REN 5	

از جنبه کاربردی این نتایج می‌تواند به مدیران در مدیریت ریسک زنجیره تأمین پایدار کمک کند. با کمک نتایج رویکرد پیشنهادی، مدیران زنجیره تأمین می‌توانند ابزاری برای ارزیابی، کنترل و کاهش فاکتورهای ریسک شناسایی شده در اختیار داشته باشند. از جنبه تئوری این پژوهش یک روش شناسایی فاکتورهای ریسک زنجیره تأمین پایدار را توسعه داد. با چنین ابزار تصمیم‌گیری، فرایند مدیریت ریسک زنجیره تأمین به صورت پیشگیرانه صورت می‌گیرد، در واقع می‌توان با شناسایی فاکتورهای ریسک از قبل به برنامه‌ریزی برای مدیریت ریسک کمک کرد. این رویکرد می‌تواند به مدیران کمک کند تا از نظر مالی، زیست‌محیطی و اجتماعی تصمیمات منطقی بگیرند. از جنبه کاربردی نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. اولاً، کلیدی‌ترین فاکتور ریسک، بحران‌های مالی است، یعنی به دلیل نوسانات ارزی بخش بزرگی از ارزش اسمی دارایی‌های مالی یک زنجیره تأمین را به‌طور ناگهانی از دست می‌دهند که می‌تواند عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و حتی اجتماعی شرکت‌های باتری‌سازی را مختل کند. مدیران باید سعی کنند برای کنترل نوسانات ارزی به‌جای ایجاد بدهی‌های ارزی، بخشی از دارایی‌های خود را به صورت ارزی نگهداری کنند تا در مواقع بحرانی توان خرید مواد اولیه وارداتی و پرداخت هزینه‌های خرید تجهیزات را داشته باشند. در واقع هدف کنترل مالی زنجیره تأمین برای رسیدن به اهداف پایداری در شرایط بروز بحران‌های ارزی است. همچنین، عدم رعایت

قوانین پایداری به عنوان دومین عامل کلیدی به عدم تطابق با قوانین زیست محیطی، اشتغال و مالی، قوانین ضد رشوه خواری، قوانین کار و برابری اشاره دارد. مدیران می بایست در خصوص مکان یابی برای استقرار کارخانه های باتری سازی و واحدهای تولید و بازیافت مواد اولیه خصوصاً سرب و همچنین خرید فناوری های مورد نیاز این صنعت با مطالعه و برنامه ریزی تصمیم گیری کنند تا در آینده به دلایل قانونی متحمل هزینه های اقتصادی، زیست محیطی و حتی اجتماعی نشوند. سومین عامل کلیدی که می بایست مورد توجه مدیران زنجیره تأمین قرار گیرد وقوع بلایای طبیعی مانند سیل، طوفان، زلزله است که می تواند باعث اختلال و از هم پاشیدگی زنجیره تأمین شود. بروز این بلایا علاوه بر صدمات سنگین مالی می تواند باعث انتشار انواع گازها و مواد خطرناک در کارخانه های تولید و بازیافت مواد اولیه باتری شود. مدیران می توانند راه کارهای پیشگیرانه متعددی از جمله مکان یابی مناسب تسهیلات، استفاده از منبع یابی منعطف، خرید فناوری های سازگار با محیط و غیره را مورد توجه قرار دهند.

استراتژی های پایداری علاوه بر هزینه های سرمایه گذاری برای ایجاد زنجیره تأمین پایدار، باید سطح عدم اطمینان آینده و در نتیجه ریسک هایی که تصمیمات ممکن است بر روی ابعاد محیطی، اقتصادی و اجتماعی بگذارد را در نظر بگیرد. برای ارزیابی این ریسک ها از FMEA و محاسبه اعداد اولویت ریسک فازی استفاده می شود. برای محاسبه اعداد اولویت ریسک فازی از روش میانگین موزون هندسی فازی و مدل برنامه ریزی خطی مبتنی بر مجموعه های برش سطح الا استفاده و سپس برای بهبود کارایی محاسباتی از روابط ترجیح فازی برای مقایسه این اعداد استفاده شد. نتایج نشان دهنده آن است که رویکرد پیشنهادی قادر است با کارایی محاسباتی بالیا نتایج مشابه روش وانگ و همکاران را ارائه دهد. همچنین نتایج نشان می دهد که بحران های مالی، عدم رعایت قوانین پایداری، بلایای طبیعی، استفاده ناکارآمد از منابع، نقض حقوق بشر، کاهش سهم بازار به ترتیب از مهم ترین عوامل ریسک های پایداری در صنعت باتری هستند.

در تحقیقات آتی می توان به توسعه روش پیشنهادی برای اولویت بندی اعداد اولویت ریسک فازی پرداخت. نحوه محاسبه و رتبه بندی اعداد اولویت ریسک فازی و همچنین استواری مقادیر این اعداد، مواردی هستند که می تواند مورد توجه محققان قرار بگیرد. بررسی روابط بین فاکتورهای ریسک می تواند به تحلیل دقیق تر ریسک کمک کند. همچنین برای کنترل و کاهش ریسک های شناسایی شده می توان در تحقیقات آتی شاخص های پاسخ ریسک را به کمک تکنیک هایی مانند تاپ سیس رتبه بندی و به مدیران در جهت تعیین استراتژی کاهش ریسک کمک کرد.

#### ۴- منابع

1. Anderson, D. R. (2006). The critical importance of sustainability risk management. *Risk Management*, 53(4), 66.
2. Anderson, D. R., & Anderson, K. E. (2009). Sustainability risk management. *Risk Management and Insurance Review*, 12(1), 25-38.
3. Afgan, N. H., & Carvalho, M. G. (2004). Sustainability assessment of hydrogen energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(13), 1327-1342.
4. Bonissone, P. P. (1980). A fuzzy sets based linguistic approach: theory and applications. In *Proceedings of the 12th conference on Winter simulation*. IEEE Press.
5. Braglia, M., Frosolini, M., & Montanari, R. (2003). Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis. *Quality and reliability engineering international*, 19(5), 425-443.
6. Ben-Daya, M., & Raouf, A. (1996). A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13(1), 43-47.
7. Clift, R. (2003). Metrics for supply chain sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 5(3-4), 240-247.
8. Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International journal of physical distribution & logistics management*, 38(5), 360-387.
9. Cousins, P. D., Lamming, R. C., & Bowen, F. (2004). The role of risk in environment-related supplier initiatives. *International Journal of Operations & Production Management*, 24(6), 554-565.

10. Chang, C. L., Wei, C. C., & Lee, Y. H. (1999). Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. *Kybernetes*, 28(9), 1072-1080.
11. Chen, L. H., & Ko, W. C. (2009). Fuzzy approaches to quality function deployment for new product design. *Fuzzy sets and systems*, 160(18), 2620-2639.
12. Chopra, S., & Sodhi, M. S. (2004). Managing risk to avoid supply-chain breakdown. *MIT Sloan management review*, 46(1), 53.
13. Dubois, D., & Prade, H. (1980). Systems of linear fuzzy constraints. *Fuzzy sets and Systems*, 3(1), 37-48.
14. Dües, C. M., Tan, K. H., & Lim, M. (2013). Green as the new Lean: how to use Lean practices as a catalyst to greening your supply chain. *Journal of cleaner production*, 40, 93-100.
15. Giannakis, M., & Papadopoulos, T. (2016). Supply chain sustainability: A risk management approach. *International Journal of Production Economics*, 171, 455-470.
16. Godfrey, P. C., Merrill, C. B., & Hansen, J. M. (2009). The relationship between corporate social responsibility and shareholder value: An empirical test of the risk management hypothesis. *Strategic management journal*, 30(4), 425-445.
17. Gurnani, H., Mehrotra, A., & Ray, S. (2012). *Supply chain disruptions: Theory and practice of managing risk*. London: Springer.
18. Hallikas, J., Virolainen, V. M., & Tuominen, M. (2002). Risk analysis and assessment in network environments: A dyadic case study. *International journal of production economics*, 78(1), 45-55.
19. Hofmann, H., Busse, C., Bode, C., & Henke, M. (2014). Sustainability-related supply chain risks: conceptualization and management. *Business Strategy and the Environment*, 23(3), 160-172.
20. Halldórsson, Á., Kotzab, H., & Skjøtt-Larsen, T. (2009). Supply chain management on the crossroad to sustainability: a blessing or a curse? *Logistics Research*, 1(2), 83-94.
21. Krysiak, F. C. (2009). Risk management as a tool for sustainability. *Journal of business ethics*, 85, 483-492.
22. Liu, H. C., Liu, L., Liu, N., & Mao, L. X. (2012). Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 12926-12934.
23. Jiang, W., Xie, C., Zhuang, M., & Tang, Y. (2017). Failure mode and effects analysis based on a novel fuzzy evidential method. *Applied Soft Computing*, 57, 672-683.
24. Maloni, M. J., & Brown, M. E. (2006). Corporate social responsibility in the supply chain: an application in the food industry. *Journal of business ethics*, 68(1), 35-52.
25. Mandal, S., & Maiti, J. (2014). Risk analysis using FMEA: Fuzzy similarity value and possibility theory based approach. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3527-3537.
26. Narasimhan, R., & Talluri, S. (2009). Perspectives on risk management in supply chains.
27. Olson, D. L., & Dash Wu, D. (2010). A review of enterprise risk management in supply chain. *Kybernetes*, 39(5), 694-706.
28. Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2007). *The Link Between Competitive Advantage and Corporate Social Responsibility*. Harvard business review.
29. Pullman, M. E., Maloni, M. J., & Carter, C. R. (2009). Food for thought: social versus environmental sustainability practices and performance outcomes. *Journal of Supply Chain Management*, 45(4), 38-54.
30. Roberts, S. (2003). Supply chain specific? Understanding the patchy success of ethical sourcing initiatives. *Journal of business ethics*, 44(2), 159-170.
31. Safari, H., Faraji, Z., & Majidian, S. (2016). Identifying and evaluating enterprise architecture risks using FMEA and fuzzy VIKOR. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(2), 475-486.

32. Sodhi, M. S., & Tang, C. S. (2009). *Managing supply chain disruptions via time-based risk management*. In *Managing supply chain risk and vulnerability*. Springer, London.
33. Song, W., Ming, X., & Liu, H. C. (2017). Identifying critical risk factors of sustainable supply chain management: A rough strength-relation analysis method. *Journal of Cleaner Production*, 143, 100-115.
34. Spicher, P., von Clausbruch, J. C., & von Waldenfels, P. (2009). Sustainability in Finance—Banking on the Planet. *Sustainable Solutions for Modern Economies*, (4), 12.
35. Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 451-488.
36. Tang, O., & Musa, S. N. (2011). Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management. *International journal of production economics*, 133(1), 25-34.
37. Thun, J. H., & Hoenig, D. (2011). An empirical analysis of supply chain risk management in the German automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 242-249.
38. Tummala, R., & Schoenherr, T. (2011). Assessing and managing risks using the supply chain risk management process (SCRMP). *Supply Chain Management: An International Journal*, 16(6), 474-483.
39. Trkman, P., & McCormack, K. (2009). Supply chain risk in turbulent environments—A conceptual model for managing supply chain network risk. *International Journal of Production Economics*, 119(2), 247-258.
40. Tuncel, G., & Alpan, G. (2010). Risk assessment and management for supply chain networks: A case study. *Computers in industry*, 61(3), 250-259.
41. Vanany, I., Zailani, S., & Pujawan, N. (2009). Supply chain risk management: literature review and future research. *IGI Global*, 16-33.
42. Vilko, J. P., & Hallikas, J. M. (2012). Risk assessment in multimodal supply chains. *International Journal of Production Economics*, 140(2), 586-595.
43. Wang, Z., & Sarkis, J. (2013). Investigating the relationship of sustainable supply chain management with corporate financial performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 62(8), 871-888.
44. Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert systems with applications*, 36(2), 1195-1207.
45. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
46. Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 1(1), 3-28.
47. Zhang, Z., & Chu, X. (2011). Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 38(1), 206-214.

## **Evaluating Risks of Sustainable Supply Chain by the Failure Mode and Effect Analysis Method in Fuzzy Environment (Case Study: Saba Battery)**

**Mojtaba Farrokh**

Department of Management, Kharazmi University, Tehran, Iran

Email: M.farrokh93@gmail.com

**Mehdi Sholeh**

PhD Candidate in Industrial Management, University of Tehran, Farabi College, Qom, Iran

**Mohsen Zabihi**

PhD in Industrial Management, University of Tehran, Farabi College, Qom, Iran

### **Abstract:**

Despite the numerous benefits of globalization and the emergence of advanced technologies, they have put the sustainable supply chain in subject to the social, economic, environmental risks. The aim of this study is to develop a new approach to identify and prioritize the risks involved in sustainable supply chain by using the failure mode and effect analysis (FMEA) technique. In this way, the fuzzy sets theory is applied to calculate the risk priority numbers with regard to the fuzzy importance coefficients of risk factors including probability of occurrence, severity and detectability for each risk factor. However, proposed approaches have a computational inefficiency in ranking the fuzzy priority numbers. The fuzzy weighted geometric mean and linear programming model is used in a different way to determine the fuzzy risk priority numbers and then the fuzzy preference relations are applied to compare these numbers for prioritizing sustainability risk factors. Risk factors of the sustainable supply chain in the battery industry are identified and then prioritized by the cross-functional team by using the proposed method. The results show that the approach is capable to provide similar results than other ones with a high computational performance.

**Keywords:** Fuzzy risk priority numbers, Fuzzy preference relations, Risk Factors, Sustainable supply chain.