

شناسایی و رتبه بندی ریسک های نصب و طراحی صفحات انرژی خورشیدی در شرایط عدم قطعیت

محمد خزائیلی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
آدرس پست الکترونیک: m.khazaeili@ine.uut.ac.ir

سعید جعفرزاده قوشچی

استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
آدرس پست الکترونیک: s.jafarzadeh@uut.ac.ir

چکیده

تجزیه و تحلیل حالت ریسک^۱ یک روش مهندسی که به طور گسترده ای برای طراحی، شناسایی و حذف شناخته شده و یا احتمال شکست، مشکلات، خطا و غیره، از سیستم، طراحی یا خدمات قبل از رسیدن به مشتری مورد استفاده قرار می گیرد. در یک FMEA معمولی، برای هر حالت شکست، سه عامل خطر؛ شدت (S)، احتمال وقوع (O) و تشخیص (D) ارزیابی می شوند و عدد اولویت ریسک^۲ با ضرب کردن این عوامل به دست می آید. تلاش های قابل توجهی در ادبیات FMEA برای غلبه بر کاستی های محاسبه دقیق RPN انجام شده است. در این مطالعه برای اولین بار یک رویکرد فازی که اجازه می دهد تا خبرگان از متغیرهای زبان شناختی برای تعیین فاکتورهای سه گانه فوق استفاده کنند به همراه تلفیقی از توابع ارزش خطی تکه ای^۳ و روش بهترین-بدترین فازی^۴ برای ارزیابی ریسک های موجود مورد استفاده قرار می گیرد. در نهایت مطالعه موردی کاربرد مدل FMEA پیشنهادی را در زمینه نصب و طراحی صفحات خورشیدی در شهرستان نقده نشان می دهد.

واژگان کلیدی: تجزیه و تحلیل حالت ریسک، عدد اولویت ریسک، روش بهترین-بدترین فازی، اعداد فازی مثلثی، توابع ارزش خطی تکه ای، صفحات خورشیدی

¹. Failure mode and effect analysis (FMEA)

². Risk priority number (RPN)

³. Piecewise linear value functions

⁴. Fuzzy best worst method (FBWM)

مقدمه

افزایش رقابت و توقعات مشتریان منجر به رشد سریع تعهدات تولید کنندگان امروزی شده است. به نحوی که هر کمبود و انحراف در مشخصات محصول، باعث از دست دادن سهم بازار می شود. به همین دلیل، امروزه اکثر شرکت های تولیدی به استفاده از تکنیک هایی مختلفی روی آورده اند تا به کمک آن مطمئن شوند محصولی بی عیب و قابل رقابت را روانه بازار نموده و سهم فعلی تولیدات خود را حفظ نمایند. در واقع، این شرکت ها با استفاده از تکنیک های ارزیابی ریسک تلاش می کنند تا حد ممکن خطرات بالقوه موجود در محدوده ارزیابی ریسک را شناسایی نموده و علل و اثرات مرتبط با آن ها را تعیین نمایند. به همین دلیل، استفاده از انواع روش های مختلف کیفی و کمی ارزیابی ریسک در صنایع مختلف گسترش یافته است. این روش ها معمولاً برای شناسایی، کنترل و کاهش پیامدهای خطرات به کار رفته و مدیران صنایع مختلف بر اساس نیاز خود می توانند از روش های مذکور استفاده نمایند (Rezaee et al, 2018).

انرژی خورشیدی سهل الوصول ترین منبع انرژی و یکی از مهم ترین منابع تجدیدپذیر انرژی به حساب می آید، زیرا فاقد هر گونه آلودگی بوده و به کاهش میزان گازهای گلخانه ای کمک می کند. استفاده از صفحات خورشیدی معمولاً برای تولید انرژی در مقیاس کم و بویژه برای استفاده در مصارف تجاری یا شخصی (مجموعه های مسکونی) مرسوم بوده است. کارایی این صفحات در بازه [18، 12] درصد متغیر بوده و در دو نوع کریستالی پلی کریستال و مونو کریستال یافت می شوند. مهم ترین چالش موجود در طراحی و راه اندازی سایت های خورشیدی مکان یابی آن ها می باشد (Ayag, 2015).

روش FMEA یکی از روش های مرسوم برای حصول اطمینان از وارد نمودن محصولی بی عیب و قابل رقابت به بازار است. FMEA یک ابزار سیستماتیک بر پایه کار تیمی و اصل پیشگیری قبل از وقوع است که در شناسایی خرابیها، علل وقوع، اثرات خرابیهای بالقوه و اقدامات کنترلی و پیشگیرانه در یک سیستم به کار گرفته می شود (Baghery et al, 2016). در اجرای FMEA بر خلاف سایر روش های واکنشی، با پیش بینی مشکلات بالقوه و محاسبه میزان ریسک پذیری آن ها، اقداماتی در جهت حذف و یا کاهش میزان وقوع آن ها تعریف و اجرا می شود. این برخورد پیشگیرانه، کنشی است در برابر آنچه ممکن است در آینده رخ دهد. در واقع، اعمال اقدامات اصلاحی در مراحل اولیه طراحی محصول یا فرآیند منجر به صرفه جویی هزینه و زمان نسبت به اعمال اقدامات اصلاحی پس از وقوع خرابیها می گردد (Yousefi et al., 2018). بنابراین با کمک این روش می توان خرابیها را ریشه یابی و از بروز آن ها جلوگیری نمود تا محصول یا خدمت نهایی با کیفیت بالا به دست مشتری برسد. همانطور که بیان گردید این خرابیها در آینده رخ می دهند و تشخیص، وقوع و همچنین تأثیرات آن ها فرآیندهایی احتمالی هستند؛ چرا که بر پایه یک سری از پیش بینی ها انجام می شوند. از این رو، در آنالیز کمی، سه عامل شدت (S)، احتمال وقوع (O) و همچنین احتمال تشخیص خرابی (D) بایستی مد نظر قرار گیرند. حاصلضرب این سه عامل کمیتی به نام عدد اولویت ریسک (RPN) به وجود می آورد که در تحلیل های بعدی مفید بوده و تصمیم گیری بر این اساس صورت می پذیرد.

به منظور کاهش مقایسات زوجی بین معیارها در روش های تصمیم گیری چندمعیاره موجود روش بهترین - بدترین برای نخستین بار توسط (Rezaei, 2015) ارائه گردید. سپس از آنجایی که قضاوت های انسانی توأم با ابهام می باشد، برای کاهش ابهام در تصمیم گیری (Guo and Zhao, 2017) روش بهترین - بدترین را در محیط عدم قطعیت توسعه دادند. همچنین اکثر تحقیقات پیشین از توابع ساده و خطی برای مسائل تصمیم گیری استفاده کرده اند که ترجیحات تصمیم گیرنده گان را به شیوه مطلوبی لحاظ نمی کند. لذا برای رفع نقص موجود (Rezaei, 2018) توابع ارزش خطی تکه ای را برای در نظر گرفتن ترجیحات تصمیم گیرندگان در مسائل تصمیم گیری چندمعیاره بکار گرفت. در این مطالعه برای اولین بار یک رویکرد فازی که اجازه می دهد تا خبرگان از متغیرهای زبان شناختی برای تعیین فاکتورهای سه گانه فوق استفاده کنند به همراه تلفیقی از توابع ارزش خطی تکه ای و روش بهترین - بدترین فازی برای ارزیابی ریسک های موجود مورد استفاده قرار می گیرد. پژوهش حاضر به شرح ذیل سازماندهی شده است: در ادامه ادبیات و پیشینه مرتبط با موضوع مورد بحث قرار می گیرد. بخش سوم بکارگیری روش بهترین - بدترین فازی را برای وزن دهی فاکتورهای سه گانه به صورت گروهی مورد بررسی قرار می دهد و نیز توابع ارزش خطی تکه ای به منظور رتبه بندی حالات ریسک مورد استفاده قرار می گیرد. بخش چهارم به بکارگیری روش پیشنهادی در زمینه صفحات خورشیدی پرداخته است. در نهایت نتایج مورد تحلیل قرار گرفته و رتبه بندی کاملی برای ریسک های مورد نظر در زمینه نصب و طراحی صفحات انرژی خورشیدی ارائه می گردد.

ادبیات پژوهش

تطبیق مستمر بررسی های ریسک با قواعد و مقررات، در کنار گسترش آنها در تصمیم گیری، سبب توسعه مبانی نظری، روشها و ابزارهای عملی و کاربردی شده است (Haimes, 2015). از میان روش ها، FMEA یکی از روش های متداول در ادبیات که به عنوان یک ابزار کنشی برای تعریف، شناسایی و از بین بردن نقایص احتمالی و ایجاد یک مزیت رقابتی استفاده می شود. سهولت به کارگیری این روش مومنجر به گسترده شدن کاربرد آن در زمینه های مختلف شده است. تکنیک FMEA برای اولین بار در سال 1920 گزارش شد، اما استفاده از آن از ابتدای دهه 1960 به طور قابل توجهی افزایش یافت. به نحوی که به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، انرژی، خودرو، شیمیایی، پزشکی، مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است (Chang and Cheng, 2011; Rezaei et al, 2018b; Sharma et al, 2005; Yousefi et al., 2018). با وجود کاربردهای زیاد روش FMEA مرسوم، اولویت بندی خرابی ها در این روش بر اساس شاخص سنتی RPN (حاصل ضرب معیارهای S,O,D) انجام میشود که کمبودهای این شاخص در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. (Mandal and Maiti, 2014; Rezaei et al., 2017; Spreafico et al, 2017) در این راستا، محققان سعی نموده اند با بهره گیری از alternative approaches از جمله روش های تصمیم گیری چندشاخصه (MCDM) برخی از معایب شاخص سنتی RPN را مورد پوشش قرار دهند (Liu, 2016; Liu et al, 2015). روشهای MCDM منعکس کننده رفتار طبیعی و تفکر انسانی است و در حالتی که عمل تصمیم گیری با چند گزینه و معیارهای کمی و کیفی مد نظر باشد به کار می روند. (Liu et al., 2015) از جمله اولین کاربردهای رویکردهای جایگزین و ترکیب شده با روش FMEA می توان به تجزیه و

تحلیل سلسله مراتبی AHP اشاره نمود که توسط (Bevilacqua and Braglia, 2000) برای اولویت بندی علل خرابی در یک شرکت تولید یخچال در کشور ایتالیا استفاده شد. روش تجزیه و تحلیل فرآیند شبکه ای ANP نیز توسط (Zammori and Gabbrielli, 2012) به منظور بررسی رابطه بین معیارهای خطر در روند تصمیم گیری مورد استفاده قرار گرفت. روش اولویت بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده آل TOPSIS توسط (Rau et al, 2007). به منظور اولویت بندی ریسک ها در مرحله بسته بندی یک شرکت کامپیوتری مورد استفاده قرار گرفت. (Garcia and Schirru, 2005) از روش تجزیه و تحلیل پوششی داده ها DEA برای تعیین شاخص های رتبه بندی در حالت های شکست استفاده نمود. روش تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری (GRA) توسط (Sharma, 2012) برای اولویت بندی و ارزیابی موارد هزینه زا در یک فرایند تولیدی پیشنهاد شد. (Hosseini et al, 2006) از روش آزمایشگاه سنجش و آزمون تصمیم گیری DEMATEL برای ارزیابی مجدد حالت های شکست در FMEA استفاده نمود. (Liu et al, 2012) پژوهش در مورد انتخاب مهمترین حالت های شکست، در یک مطالعه موردی بود که خطر بیهوشی در آن وجود داشت، ایشان یک FMEA فازی بر مبنای نظریه مجموعه فازی و روش VIKOR برای اولویت بندی حالت های شکست پیشنهاد شده است.

در مطالعه (Maheswaran and Loganathan (2013) از ترکیب دو روش PROMETHEE و AHP برای اولویت بندی حالات شکست استفاده نمود، (Das Adhikary et al, 2014). از روش COPRAS برای تجزیه و تحلیل حالات شکست در یک نیروگاه های حرارتی زغال سنگ استفاده نمود. لازم به توضیح است که با وجود توسعه روشهای تصمیم گیری قطعی مبتنی بر FMEA، نظرات اعضای تیم FMEA با توجه به نوع تجربه و پیشینه ذهنی می تواند دارای عدم قطعیت باشد. لذا استفاده از رویکردهای موجود برای حل مسائل دارای عدم قطعیت از جمله تئورهای فازی برای پوشش برخی از کمبودهای RPN سنتی ارائه شده است. (Wang et al., 2009).

در مطالعه ای (Şağbanşua و Balo, 2016) با استفاده از AHP مناسب ترین نوع صفحات خورشیدی را برای طراحی سیستم های فتوولتائیک انتخاب کردند. در سال (Ayag, 2015) نیز با استفاده از روش AHP مسأله مکان یابی صفحات خورشیدی را برای انتخاب بهترین محل استقرار این صفحات بررسی کرد. (Wang & Tsai, 2018) رویکرد تصمیم گیری چندمعیاره فازی (متشکل از FAHP و DEA) را به منظور ارزیابی و انتخاب تأمین کننده مناسب صفحات خورشیدی بکار گرفتند.

روش شناسی پژوهش

اعداد فازی

اولین بار مفهوم مجموعه های فازی توسط Zadeh (1965) معرفی شد. یک مجموعه فازی بطور کلی بصورت یک تابع عضویت تعریف میشود که عناصر را به درجه عضویت در یک بازه معین که معمولاً بصورت بازه $[0,1]$ است نشان میدهد. در ادامه تعاریف پایه ای برای مجموعه اعداد فازی مورد استفاده در این مطالعه ارائه شده است.

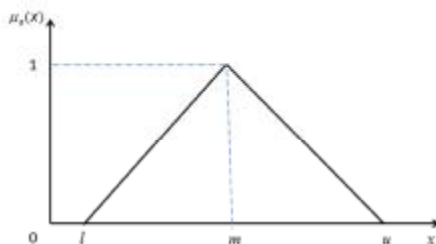
تعریف 1: یک مجموعه فازی A که در مرجع X تعریف شده است بصورت معادله (1) می باشد.

$$A = \{(x, m_A(x)) \mid x \in X\} \quad (1)$$

در معادله (1)، $m_A(x): X \rightarrow [0,1]$ تابع عضویت از مجموعه A است. مقدار عضویت $m_A(x)$ درجه وابستگی $x \in X$ را در A نشان می دهد.

تعریف 2: عدد فازی مثلثی \mathcal{A} بصورت سه تایی (l, m, u) تعریف می شود و تابع عضویت مطابق معادله (2) و نمودار آن به صورت شکل (1) می باشد.

$$m_A(x) = \begin{cases} 0 & x \in (-\infty, l) \\ \frac{x-l}{m-l} & x \in [l, m] \\ \frac{u-x}{u-m} & x \in [m, u] \\ 0 & x \in (u, \infty) \end{cases} \quad (2)$$



شکل 1- عدد فازی مثلثی

تعریف 3: فرض کنید $\mathcal{A} = (l_1, m_1, u_1)$ ، $\mathcal{B} = (l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثالی باشند و l عددی ثابت و بزرگتر از صفر است، در این حالت، اعمال حسابی روی این اعداد فازی مطابق با معادلات (3) الی (7) انجام می شود.

$$\mathcal{A} \oplus \mathcal{B} = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (3)$$

$$\mathcal{A} \otimes \mathcal{B} = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (4)$$

$$\mathcal{A} - \mathcal{B} = (l_1 - u_2, m_1 - m_2, u_1 - l_2) \quad (5)$$

$$\mathcal{A} / \mathcal{B} = (l_1 / u_2, m_1 / m_2, u_1 / l_2) \quad (6)$$

$$l \mathcal{A} = l(l_1, m_1, u_1) = (l l_1, l m_1, l u_1) \quad (7)$$

تعریف 4: به منظور مقایسه اعداد فازی مثلثی مقیاس میانگین ادغامی¹ برای عدد فازی $\mathcal{A} = (l_i, m_i, u_i)$ به شرح ذیل تعریف می شود:

$$R(\mathcal{A}_i) = \frac{l_i + 4m_i + u_i}{6} \quad (8)$$

روش بهترین - بدترین فازی

¹. Graded Mean Integration Representation (GMIR)

روش بهترین - بدترین فازی اولین بار توسط گو و ژائو (2017) در مسائل تصمیم گیری توسعه داده شد. گام های این روش به شرح زیر می باشد:

گام 1: انتخاب شاخص های تصمیم گیری. این شاخص ها از طریق مرور ادبیات و نظر کاشناسان بدست می آید و به صورت C_1, C_2, \dots, C_n برای n شاخص مشخص می شود.

گام 2: تعیین بهترین و بدترین شاخص از میان شاخص ها.

گام 3: اولویت بندی اهمیت بهترین معیار در مقایسه با معیارهای دیگر (BO^1) و نیز اولویت بندی سایر معیارها نسبت به بدترین معیار (OW^2) براساس متغیرهای کلامی جدول 1:

$$A_B^{\%} = (\alpha_{B_1}, \alpha_{B_2}, \dots, \alpha_{B_n}) \quad (9)$$

جایی که α_{B_j} اهمیت بهترین معیار نسبت به معیار j ام می باشد (بدیهی است $\alpha_{B_B} = 1$).

$$A_W^{\%} = (\alpha_{W_1}, \alpha_{W_2}, \dots, \alpha_{W_n}) \quad (10)$$

جایی که α_{W_j} اهمیت معیار j ام نسبت به بدترین معیار می باشد (بدیهی است $\alpha_{W_W} = 1$).

جدول 1- تبدیل متغیرهای کلامی به اعداد فازی مثلثی

تایع عضویت	ارزیابی کلامی
(1,1,1)	اهمیت مساوی (EI^3)
$(\frac{2}{3}, 1, \frac{3}{2})$	اهمیت ضعیف (WI^4)
$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	اهمیت متوسط (FI^5)
$(\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2})$	اهمیت بالا (VI^6)
$(\frac{7}{2}, 4, \frac{9}{2})$	اهمیت فوق العاده (AI^7)

گام 4: تعیین مقادیر بهینه وزن های معیارها ($w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$) براساس مدل ریاضی (11):

¹ Best to Others
² Others to worst
³ Equally Important
⁴ Weakly Important
⁵ Fairly Important
⁶ Very Important
⁷ Absolutely Important

min x^0

$$\begin{cases}
 \left| \frac{r_{Bj}^w}{r_{jw}^w} - \alpha_{Bj} \right| \leq x^0 \\
 \left| \frac{r_{jw}^w}{r_{jw}^w} - \alpha_{jw} \right| \leq x^0 \\
 \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l}
 \sum_{j=1}^n R(r_{jw}^w) = 1 \\
 l_j^w \leq m_j^w \leq u_j^w \\
 l_j^w \geq 0 \\
 j = 1, 2, \dots, n
 \end{array} \right.
 \end{cases} \quad (11)$$

که پارامترهای مدل فوق همگی به صورت اعداد فازی مثلثی به صورت زیر فرض می شوند:

$$r_{Bj}^w = (l_B^w, m_B^w, u_B^w), \quad r_{jw}^w = (l_j^w, m_j^w, u_j^w), \quad r_{jw}^w = (l_w^w, m_w^w, u_w^w), \quad \alpha_{Bj} = (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj}), \quad \alpha_{jw} = (l_{jw}, m_{jw}, u_{jw}) \\
 x^0 = (l^x, m^x, u^x).$$

با فرض $x^* = (k^*, k^*, k^*), k^* \leq l^x$ مدل فوق به مدل نهایی رابطه (12) تبدیل می گردد:

$$\begin{cases}
 \min x^0 \\
 \left| \frac{(l_B^w, m_B^w, u_B^w)}{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)} - (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj}) \right| \leq (k^*, k^*, k^*) \\
 \left| \frac{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)}{(l_w^w, m_w^w, u_w^w)} - (l_{jw}, m_{jw}, u_{jw}) \right| \leq (k^*, k^*, k^*) \\
 \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l}
 \sum_{j=1}^n R(r_{jw}^w) = 1 \\
 l_j^w \leq m_j^w \leq u_j^w \\
 l_j^w \geq 0 \\
 j = 1, 2, \dots, n
 \end{array} \right.
 \end{cases} \quad (12)$$

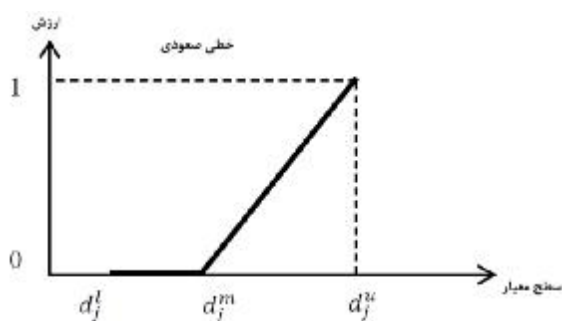
توابع ارزش خطی تکه ای

توابع ارزش خطی تکه ای برای اولین بار توسط رضایی (2018) برای مسائل تصمیم گیری چندمعیاره مورد استفاده قرار گرفت. این توابع از چندین تابع ساده خطی تشکیل می شوند. در ادامه برخی از توابع ارزش خطی تکه ای معرفی می شوند:

تابع ارزش صعودی

در این نوع تابع ارزش تکه ای خطی از d_j^l تا d_j^m مقدار تابع صفر و از d_j^m تا d_j^u مقدار تابع به صورت خطی از صفر تا یک افزایش می یابد. ضابطه و نمودار تابع ارزش خطی تکه ای به صورت زیر بیان می گردد:

$$u_{ij} = \begin{cases} 0 & d_j^l \leq x_{ij} \leq d_j^m \\ \frac{x_{ij} - d_j^m}{d_j^u - d_j^m} & d_j^m \leq x_{ij} \leq d_j^u \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

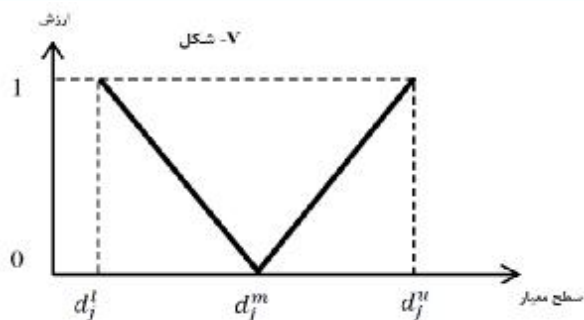


شکل 2- تابع ارزش خطی صعودی

توابع ارزش خطی V- شکل

در این نوع تابع ارزش تکه ای خطی از d_j^l تا d_j^m مقدار تابع از یک تا صفر به صورت خطی کاهش یافته و سپس از d_j^m تا d_j^u مقدار تابع به صورت خطی از صفر تا یک افزایش می یابد. ضابطه و نمودار این تابع ارزش خطی تکه ای به صورت زیر بیان می گردد:

$$u_{ij} = \begin{cases} \frac{d_j^m - x_{ij}}{d_j^m - d_j^l} & d_j^l \leq x_{ij} \leq d_j^m \\ \frac{x_{ij} - d_j^m}{d_j^u - d_j^m} & d_j^m \leq x_{ij} \leq d_j^u \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$



شکل 3- تابع ارزش خطی V- شکل

به منظور رتبه بندی گزینه ها میزان مطلوبیت هر گزینه از رابطه زیر بدست می آید:

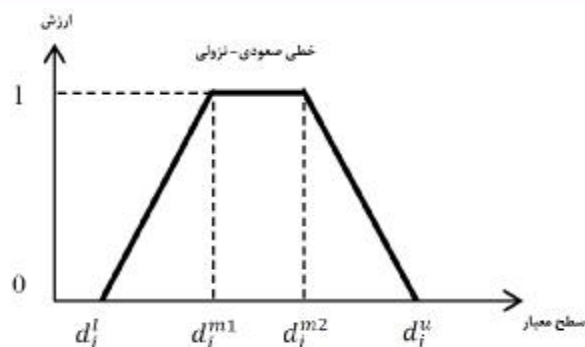
$$U_i = \sum_{j=1}^n w_j u_{ij} \quad (14)$$

w_j : وزن معیار j ام ، u_{ij} : ارزش گزینه i ام با در نظر داشتن معیار j ام

تابع ارزش صعودی - نزولی

در این نوع تابع ارزش تکه ای خطی از d_j^l تا d_j^{m1} مقدار تابع از صفر تا یک افزایش یافته و از d_j^{m1} تا d_j^{m2} مقدار تابع یک و در این صورت خطی از یک تا صفر کاهش می یابد. ضابطه و نمودار این تابع ارزش خطی تکه ای به صورت زیر بیان می گردد:

$$u_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - d_j^l}{d_j^{m1} - d_j^l} & d_j^l \leq x_{ij} \leq d_j^{m1} \\ 1 & d_j^{m1} \leq x_{ij} \leq d_j^{m2} \\ \frac{d_j^u - x_{ij}}{d_j^u - d_j^{m2}} & d_j^{m2} \leq x_{ij} \leq d_j^u \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$



شکل 4- تابع ارزش خطی صعودی- نزولی

یافته‌های پژوهش

در این پژوهش به بررسی ریسک های موجود در زمینه نصب و طراحی صفحات خورشیدی در شهرستان نقده پرداخته شده است. ابتدا از بین ریسک های موجود تیم FMEA هشت مورد زیر را شناسایی نمودند: پیش بینی عملکرد نادرست انرژی، پایداری، اندازه، اتصالات الکتریکی، رعد و برق، اتصال شبکه، عدم سازگاری با استاندارد، و تجهیزات. سپس با توجه به جدول 2 به هر یک از فاکتورهای سه گانه به ازای هر ریسک توسط تیم FMEA امتیازی تخصیص داده شد. در ادامه مقادیر عدد اولویت ریسک (RPN) هر یک از ریسک های مورد نظر به صورت جدول 3 بدست می آید.

جدول 2- رتبه‌بندی کلاسیک فاکتورهای سه‌گانه (شدت، احتمال وقوع، و تشخیص) (Liu and Liu, 2013)

امتیاز	شدت (S)	احتمال وقوع (O)	تشخیص (D)
10	خطرناک بدون هشدار	خیلی بالا: خرابی تقریباً اجتناب ناپذیر است	عدم اطمینان کامل
9	خطرناک با هشدار		
8	خیلی بالا	بالا: خرابی های مکرر	بالا: خرابی های مکرر
7	بالا		
6	متوسط	متوسط: خرابی های نوسانی	متوسط: خرابی های نوسانی
5	پایین		
4	خیلی پایین	پایین: خرابی های نسبتاً اندک	پایین: خرابی های نسبتاً اندک
3	جزئی		
2	خیلی کم	کنترلی: خرابی غیرمحتمل	کنترلی: خرابی غیرمحتمل
1	هیچ		

جدول 3- عدد اولویت ریسک (RPN)

حالات ریسک	شدت (S)	احتمال وقوع (O)	تشخیص (D)	عدد اولویت ریسک (RPN)
پیش بینی عملکرد نادرست انرژی (FM1)	7	3	2	42

280	5	7	8	پایداری (FM2)
140	4	5	7	اندازه (FM3)
60	3	4	5	اتصالات الکتریکی (FM4)
96	4	3	8	رعد و برق (FM5)
140	4	7	5	اتصال شبکه (FM6)
12	2	2	3	عدم سازگاری با استاندارد (FM7)
60	3	5	4	تجهیزات (FM8)

همان گونه که در جدول 3 مشاهده می شود رتبه بندی بدست آمده کامل نبوده و لذا اتخاذ رویکردی ترکیبی جدیدی در این زمینه ضروری می باشد. بدین منظور فاکتورهای سه گانه به روش بهترین - بدترین فازی وزن دهی می شوند. ابتدا تیم FMEA با استفاده از جدول 1 بهترین و بدترین معیارها را به شرح جدول 4 مشخص نمودند:

جدول 4- بهترین و و بدترین فاکتورهای سه گانه و بردارهای بهترین - بقیه و دیگران - بدترین شناسایی شده توسط خبرگان

بردار سایر معیارها نسبت به بدترین معیار (OW)				بردار بهترین معیار نسبت به بقیه معیارها (BO)				خبره
تشخیص (D)	احتمال وقوع (O)	شدت (S)	بدترین (Worst)	تشخیص (D)	احتمال وقوع (O)	شدت (S)	بهترین (Best)	
WI	EI	AI	احتمال وقوع (O)	FI	AI	EI	شدت (S)	خبره 1
WI	EI	VI	احتمال وقوع (O)	EI	WI	FI	تشخیص (D)	خبره 2
EI	FI	VI	تشخیص (D)	WI	VI	EI	شدت (S)	خبره 3

حال با توجه به جدول (1)، متغیرهای کلامی ارائه شده در جدول (4) به اعداد فازی مثلثی تبدیل میشوند. سپس مدل ریاضی FBWM با توجه به این اعداد فازی مثلثی مورد اجرا قرار می گیرد. برای مثال، محاسبات مدل مذکور با توجه به نظر خبره 1 در ادامه ارائه می شود:

بردار سایر معیارها نسبت به بدترین معیار (OW) و بردار بهترین معیار نسبت به بقیه معیارها (BO) به صورت زیر بدست می آیند:

$$A_B = [(1,1,1), (7/2, 4, 9/2), (3/2, 2, 5/2)]$$

$$A_W = [(7/2, 4, 9/2), (1,1,1), (2/3, 1, 3/2)]$$

در ادامه مدل برنامه ریزی ریاضی (16) جهت بدست آوردن وزن فاکتورهای سه گانه ارائه می شود:

$$\begin{aligned}
 & \min x \\
 & s.t. \\
 & l_1 - 3.5u_2 \leq xu_2 \quad l_1 - 3.5u_2 \geq -xu_2 \\
 & m_1 - 4m_2 \leq xm_2 \quad m_2 - 4m_1 \geq -xm_1 \\
 & u_1 - 1.5l_2 \leq xl_2 \quad u_2 - 1.5l_2 \geq -xl_2 \\
 & l_1 - 2u_3 \leq xu_3 \quad l_1 - 2u_3 \geq -xu_3 \\
 & m_1 - 2.5m_3 \leq xm_3 \quad m_1 - 2.5m_3 \geq -xm_3 \\
 & u_1 - 3.5l_3 \leq xl_3 \quad u_1 - 3.5l_3 \geq -xl_3 \\
 & l_3 - 0.67u_2 \leq xu_2 \quad l_3 - 0.67u_2 \geq -xu_2 \\
 & m_3 - 1m_2 \leq xm_2 \quad m_3 - 1m_2 \geq -xm_2 \\
 & u_2 - 1.5l_3 \leq xl_3 \quad u_3 - 1.5l_2 \geq -xl_2 \\
 & \frac{l_1 + 4m_1 + u_1}{6} + \frac{l_2 + 4m_2 + u_2}{6} + \frac{l_3 + 4m_3 + u_3}{6} = 1 \\
 & l_1 \leq m_1 \quad l_2 \leq m_2 \quad l_3 \leq m_3 \\
 & m_1 \leq u_1 \quad m_2 \leq u_2 \quad m_3 \leq u_3 \\
 & l_1 > 0 \quad l_2 > 0 \quad l_3 > 0 \\
 & x \geq 0
 \end{aligned} \tag{16}$$

مدل فوق با کمک نرم افزار لینگو (17) حل شده و وزن های نهایی بهینه به شرح ذیل حاصل می شوند:

$$x^* = (0.4495, 0.4495, 0.4495)$$

$$w_1^* = (l_1, m_1, u_1) = (0.5595, 0.5952, 0.5966)$$

$$w_2^* = (l_2, m_2, u_2) = (0.1473, 0.1677, 0.1832)$$

$$w_3^* = (l_3, m_3, u_3) = (0.2026, 0.2430, 0.2872)$$

شاخص سازگاری¹ به صورت $0.4495/8.04 = 0.0559 < 0.1$ بدست می آید که نرخ بالای سازگاری را نشان می دهد (گو و ژائو، 2017). بطور مشابه وزن بهینه نهایی فاکتورهای سه گانه برای تمام خبرگان در جدول (5) ارائه می گردد:

جدول 5- وزن های فازی فاکتورهای سه گانه

مقدار بهینه (x^*)	تشخیص (D)	احتمال وقوع (O)	شدت (S)	خبره
0.4495	(0.2026, 0.2430, 0.2872)	(0.1473, 0.1677, 0.1832)	(0.5595, 0.5952, 0.5966)	خبره 1
1.0000	(0.3496, 0.3768, 0.4710)	(0.1884, 0.1884, 0.2094)	(0.3140, 0.3768, 0.6992)	خبره 2
0.2361	(0.3011, 0.3738, 0.4382)	(0.1671, 0.1735, 0.3011)	(0.3927, 0.4620, 0.5228)	خبره 3
	(0.2844, 0.3312, 0.3988)	(0.1653, 0.1744, 0.1887)	(0.4221, 0.4780, 0.6062)	وزن نهایی (w_j)

با توجه به جدول (5) وزن نهایی فاکتورهای سه گانه در قالب اعداد فازی مثلثی به صورت زیر بیان می شود:

¹. Consistency Index

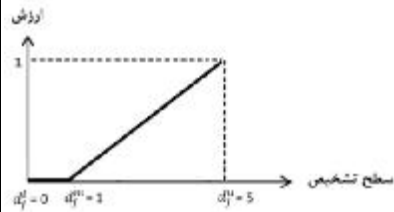
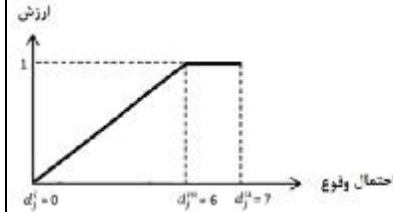
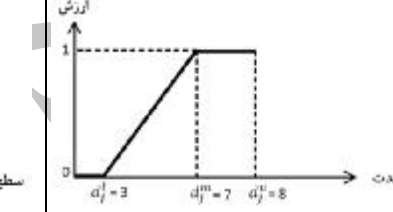
$$w_s^* = (0.4221, 0.4780, 0.6062), w_o^* = (0.1653, 0.1744, 0.1887), w_D^* = (0.2844, 0.3312, 0.3988)$$

مقادیر نهایی وزن های سه گانه با استفاده از تعریف (4) (بخش 3-1) بصورت زیر می باشند:

$$w_s^* = 0.4901, w_o^* = 0.1753, w_D^* = 0.3347$$

در ادامه برای رتبه بندی ریسک های مورد نظر رویکرد پیشنهادی به کارگیری توابع ارزش خطی تکه ای متناسب با هر معیار می باشد. در جدول (6) نمودار و ضابطه توابع ارزش خطی تکه ای برای فاکتور های سه گانه بصورت زیر ارائه می شود:

جدول 6- توابع ارزش خطی تکه ای برای فاکتور های سه گانه

<p>ارزش</p>  <p>سطح تشخیص</p> $u_{ij} = \begin{cases} 0 & 0 \leq x_{ij} \leq 1 \\ \frac{x_{ij}-1}{5-1} & 1 \leq x_{ij} \leq 5 \end{cases}$	<p>ارزش</p>  <p>سطح احتمال وقوع</p> $u_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}-0}{6-0} & 0 \leq x_{ij} \leq 6 \\ 1 & 6 \leq x_{ij} \leq 7 \end{cases}$	<p>ارزش</p>  <p>سطح شدت</p> $u_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq 3 \\ \frac{x_{ij}-3}{7-3} & 3 \leq x_{ij} \leq 7 \\ 1 & 7 \leq x_{ij} \leq 8 \end{cases}$
---	---	---

با توجه به نمودار تابع ارزش خطی تکه ای برای فاکتور شدت کمتر از 3 (از محدوده وضعیت های هیچ تا جزئی) ارزشی برای تصمیم گیرنده ندارد (صفر). و به همین شیوه بیشتر از 7 دارای بالاترین ارزش (یک) می باشد (با توجه به جدول 2 از محدوده وضعیت های بالا تا خطرناک بدون هشدار). محدوده 3 تا 7 (وضعیت های خیلی پایین تا متوسط) از تابع ارزش خطی تبعیت می کند.

به شیوه مشابه برای فاکتور احتمال وقوع از 1 تا 6 (از محدوده وضعیت های خرابی غیرمحمتمل تا متوسط خرابی های نوسانی) از تابع ارزش خطی تبعیت می کند و بیشتر از 6 دارای بالاترین ارزش (یک) می باشد (وضعیت های خرابی های نوسانی تا خرابی های مکرر).

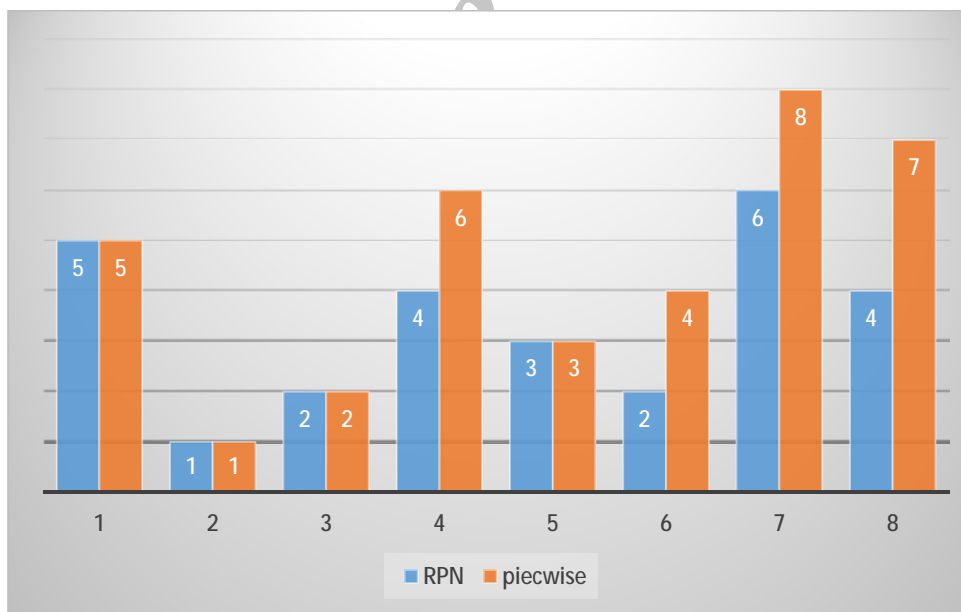
در نهایت برای فاکتور تشخیص کمتر از 1 (محدوده وضعیت خرابی غیرمحمتمل) ارزشی برای تصمیم گیرنده ندارد (صفر) و به همین شیوه برای محدوده 1 تا 5 (وضعیت های خرابی غیرمحمتمل تا خرابی های نوسانی) از تابع ارزش خطی تبعیت می کند.

جدول 7- مقایسه رتبه بندی حالات ریسک با استفاده از توابع ارزش خطی تکه ای و RPN سنتی

حالات ریسک	شدت (S)	احتمال وقوع (O)	تشخیص (D)	میزان مطلوبیت حالات ریسک	رتبه بندی براساس توابع ارزش خطی تکه ای	رتبه بندی براساس RPN
------------	---------	-----------------	-----------	--------------------------	--	----------------------

5	5	0.661	1.000	0.500	1	پیش بینی عملکرد نادرست (FM1) انرژی
1	1	0.999	1.000	1.000	1	پایداری (FM2)
2	2	0.886	1.000	0.833	1	اندازه (FM3)
4	6	0.529	0.500	0.667	0/5	اتصالات الکتریکی (FM4)
3	3	0.828	1.000	0.500	1	رعد و برق (FM5)
2	4	0.670	0.500	1.000	0/5	اتصال شبکه (FM6)
6	8	0.142	0.000	0.333	0	عدم سازگاری با استاندارد (FM7)
4	7	0.435	0.250	0.833	0/25	تجهیزات (FM8)

با توجه به جدول 7، RPN سنتی برای حالات ریسک رتبه بندی کاملی ارائه نمی دهد (ریسک های شماره 3 و 6 در رتبه 2 و ریسک های 4 و 8 در رتبه 4 قرار دارند). اما روش توابع ارزش خطی تکه ای ریسک 3 را با رتبه 2 و ریسک 6 را در رتبه 4 قرار می دهد. لذا از توابع ارزش خطی تکه ای به منظور رتبه بندی حالات ریسک استفاده گردید که رتبه بندی کاملی بدست می آید. همان گونه که مشاهده می شود برای ریسک های 1، 2 و 5 رتبه بندی یکسانی (به ترتیب 5، 1 و 3) در هر دو روش بدست آمده است.



نمودار 1- مقایسه رتبه بندی حالات ریسک با استفاده از توابع ارزش خطی تکه ای و RPN سنتی

با توجه به نمودار فوق رتبه بندی حالات ریسک مطرح شده در این پژوهش با بکارگیری رویکرد RPN و توابع ارزش خطی تکه ای به شرح ذیل می باشد:

RPN : $FM2 > FM3 = FM6 > FM5 > FM4 = FM8 > FM1 > FM7$

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

نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل حالت شکست و ریسک (FMEA) یک تکنیک مهندسی در صنایع که برای ارائه اطلاعات و تصمیم گیری در مورد مدیریت ریسک طراحی شده است، در FMEA حالت های خرابی بالقوه، توسط عوامل خطر به نام شدت، وقوع و تشخیص مورد ارزیابی قرار می گیرد. در یک FMEA معمولی، عدد اولویت ریسک RPN از ضرب مقادیر عوامل ریسک به دست می آید. با این حال، RPN سنتی به دلیل نادیده گرفتن اهمیت نسبی و عدم قطعیت در میان عوامل ریسک از کارایی کمتری برخوردار می باشد. لذا خبرگان برای ارزیابی عوامل سه گانه ریسک از متغیرهای زبانی برای وزن دهی در نظر می گیرند. توابع ارزش خطی تکه ای می تواند ترجیحات واقعی تصمیم گیرنده را پوشش دهد یعنی تصمیم گیرنده می تواند برای معیارها یک عملکرد افزایش سطح از مقدار صفر تا یک آستانه معین را تعیین کند. در این پژوهش تلفیقی از دو رویکرد FBWM و توابع ارزش خطی تکه ای برای بدست آوردن اولویت بندی حالت های ریسک صفحات خورشیدی استفاده شده است. مدل پیشنهادی به عنوان یک مفهوم مدیریتی، می تواند برای تصمیم گیری در مدیریت ریسک در سازمان های صنعتی و خدماتی مورد استفاده قرار گیرد. برای تحقیقات بیشتر، نتایج مطالعه را می توان با سایر روش های چند معیاره فازی مانند Topsis فازی، Moora فازی یا Vikor فازی مقایسه کرد.

منابع

- اصغر پور، محمد جواد (1392). تصمیم گیری چند معیاره، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ یازدهم.
- Ayag, Z. (2015). A Multiple-Criteria Decision Making Method for Evaluating Solar Power Plant Location Alternatives, Proceedings of the 9th International Management Conference, Management and Innovation For Competitive Advantage, November 5th-6th, 2015, BUCHAREST, ROMANIA.
- Bagheri, M., Yousefi, S., Rezaee, M.J., 2016. Risk measurement and prioritization of auto parts manufacturing processes based on process failure analysis, interval data envelopment analysis and grey relational analysis. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-23.
- Balao, F., Şağbanşua, L. (2016). The selection of the best solar panel for the photovoltaic system design by using AHP, Energy Procedia, 100 (2016), 50 – 53.
- Bevilacqua, M., Braglia, M., 2000. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. Reliability Engineering & System Safety 70(1), 71-83.
- Chang, K.-H., Cheng, C.-H., 2011. Evaluating the risk of failure using the fuzzy OWA and DEMATEL method. Journal of Intelligent Manufacturing 22(2), 113-129.
- Das Adhikary, D., Kumar Bose, G., Bose, D., Mitra, S., 2014. Multi criteria FMECA for coal-fired thermal power plants using COPRAS-G. International Journal of Quality & Reliability Management 31(5), 601-614.
- Garcia, P.A., Schirru, R., 2005. A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA. Progress in Nuclear Energy 46(3-4), 359-373.
- Guo, S., Zhao, H., 2017. Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. Knowledge-Based Systems 121, 23-31.
- Haimes, Y.Y., 2015. Risk modeling, assessment, and management. John Wiley & Sons.

- Liu, H.-C., 2016. FMEA using uncertainty theories and MCDM methods, *FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods*. Springer, pp. 13-27.
- 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.
- Liu, H.-C., You, J.-X., Ding, X.-F., Su, Q., 2015. Improving risk evaluation in FMEA with a hybrid multiple criteria decision making method. *International Journal of Quality & Reliability Management* 32(7), 763-782.
- Maheswaran, K., Loganathan, T., 2013. A Novel Approach for Prioritization of Failure modes in FMEA using MCDM. *International Journal of Engineering Research and Applications* 3(4), 733-739.
- 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.
- Rau, H., Liao, C.-P., Shiang, W.-J., Lin, C.-H., 2007. Using fuzzy theory for packaging attribute deployment for new notebook computer introduction, *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*. Springer, pp. 250-259.
- Rezaee, M.J., Salimi, A., Yousefi, S., 2017. Identifying and managing failures in stone processing industry using cost-based FMEA. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88(9-12), 3329-3342.
- Rezaee, M.J., Yousefi, S., Valipour, M., Dehdar, M.M., 2018a. Risk analysis of sequential processes in food industry integrating multi-stage fuzzy cognitive map and process failure mode and effects analysis. *Computers & Industrial Engineering* 123, 325-337.
- Rezaee, M.J., Yousefi, S., Valipour, M., Dehdar, M.M., 2018b. Risk analysis of sequential processes in food industry integrating Multi-stage fuzzy cognitive map and process failure mode and effects analysis. *Computers & Industrial Engineering*.
- Rezaei, J. (2018). Piecewise linear value functions for multi-criteria decision-making, *Expert Systems With Applications* (article in press), doi: 10.1016/j.eswa.2018.01.004.
- Rezaei, J., 2015. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega* 53, 49-57.
- Seyed-Hosseini, S.M., Safaei, N., Asgharpour, M., 2006. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. *Reliability Engineering & System Safety* 91(8), 872-881.
- Sharma, R.K., Kumar, D., Kumar, P., 2005. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling. *International Journal of Quality & Reliability Management* 22(9), 986-1004.
- Sharma, R.K., Sharma, P., 2012. Integrated framework to optimize RAM and cost decisions in a process plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25(6), 883-904.
- Spreafico, C., Russo, D., Rizzi, C., 2017. A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. *Computer Science Review* 25, 19-28.
- Wang, T. C. & Tsai S. Y. (2018). Solar Panel Supplier Selection for the Photovoltaic System Design by Using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approaches, *Energies*, 2018, 11, 1-22.
- Yousefi, S., Alizadeh, A., Hayati, J., Bagheri, M., 2018. HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach with undesirable outputs: A study of automotive parts industry in Iran. *Safety science* 102, 144-158.
- Zammori, F., Gabbriellini, R., 2012. ANP/RPN: A multi criteria evaluation of the risk priority number. *Quality and Reliability Engineering International* 28(1), 85-104.