پژوهش‌های مدیریت عمومی
سال دوازدهم ، شماره چهل و ششم ، زمستان ۱۳۹۸
صفحه ۲۲۶-۱۹۹

تاریخ دریافت : ۱۳۹۸/۰۲/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶

Impact of PFMEA Implementation with Fuzzy Approach on Improving Overall Equipment Effectiveness in the Sugar Industry

Mohammad Baghbani[1], *Soleyman Iranzadeh[2], Majid Bagherzadeh khajeh[3]

1-Ph.D Student, Department of Industrial Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
2-Prof, Department of Industrial Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran. (Corresponding author). Email: Dr.iranzadeh@yahoo.com
3-Assistant Prof, Department of Management, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Received: 16/05/2019 ; Accepted: 08/10/2019

Extended Abstract

Abstract

The purpose of this study was to investigate the effect of the implementation of the PFMEA on the improvement of the overall equipment effectiveness (OEE) in a sugar factory. First, the average Overall Equipment Effectiveness in the production process in eight consecutive working weeks was extracted as a pre-test. Then, the types of potential failures in the production process were identified and the three parameters of the severity of the failures, the probability of occurrence of the failures and the probability of failures detection for each failure mode were extracted in linguistic variable and determined by group discussion and by collective agreement and multiplied by corresponding numerical values These three parameters in each other, the number of priority numbers for each failure, was calculated. In the next step, 24 priority failures were identified by the severity-occurrence matrix and risk ranking table. Then, appropriate strategies for reducing the effects or eliminating prioritized failures were identified and implemented, corrective actions and necessary interventions were planned over a period of eight weeks. During the implementation of the interventions and at the end of each week, the Overall Equipment Effectiveness was calculated as a post-test. At the end of the study, the relationship between the risk priority number (RPN) and OEE was studied in the form of the Pearson correlation.

Introduction

Previous studies have shown that reducing or eliminating of failures, effects on machinery and equipment and increasing their availability, quality and performance will lead to improve the quality and quantity of products and services provided by various organizations (Hassan, Siadat, Dantan, & Martin, 2010; Helvacioglu & Ozen, 2014). Many techniques have been developed to identify, assess and manage the risks involved in various processes. FMEA is one of the most efficient of these techniques (Banduka, Mačužić, Stojkić, Bošnjak, & Peronja, 2016; Cândeaa, Kifor, & Constantinescu, 2014; Elahi, 2018). OEE, on the other hand, is one of the tools used to improve the efficiency of the manufacturing process. This simple and practical tool, identify major and common sources of production related losses and divides them into three main groups to improve equipment efficiency (Ahire & Relkar, 2012).
The purpose of this research is to investigate the impact of PFMEA implementation on OEE in a sugar manufacturing company.

Case study

The research was carried out at the Kurdistan Sugar Factory.

Materials and Methods

At first, the PFMEA implementation team was formed with the participation of process owners and the then process of sugar production from raw sugar to crop production was thoroughly studied and analyzed. In the next step, as the production processes were extracted, the rate of OEE in the production process was extracted over a period of two months and as one-week intervals as a pre-test. Then, in the next phase of the study, within two working months, a variety of possible errors and failures that had an impact on reducing the quantity and quality of product and process outputs were identified. In the next step, according to the types of failures, the three parameters of severity, occurrence probability and detection probability of each failure by collective agreement were extracted in linguistic scales and then fuzzy risk priority number was calculated. Afterward, by using the severity-occurrence matrix and risk ranking table, failures that were on the priority of needing corrective action were identified. Next, during brainstorming sessions, appropriate solutions were suggested for corrective actions, and these strategies were implemented in priority over eight weeks. In order to ensure the effectiveness of the measures taken, OEE was calculated as a post-test at one-week intervals over two working months. By comparing the post-test results with the pre-test results, the effectiveness of the interventions taken was analyzed. In fact, the innovation aspect of this research compared to the past research is the use of appropriate pre-test and post-test to ensure the effectiveness of interventions taken. Also, at the end of each week, the fuzzy risk priority number for the new situation was

extracted from the project implementation team and finally, considering the normality of the parameters of the two tools, the correlation coefficient between RPN and OEE during the eight working weeks were tested.

Discussion and Results

In this study, the OEE technique was used as pre-test and post-test to ensure the accuracy and effectiveness of the actions and interventions implemented in the framework of PFMEA technique implementation. According to the results of this study, fuzzy PFMEA implementation has increased the overall equipment effectiveness, so it can be said that the implementation of PFMEA with the participation of process owners will improve production status and achieve higher effectiveness.

Conclusion

In this study, the relationship between risk priority numbers and overall equipment effectiveness was negative. Based on the data gathered, the relationship was defined as follows.

$$OEE = 0.773 - 0.024 * RPN$$

According to the above correlation formula, by reducing one RPN unit, the overall equipment effectiveness will increase 0.024 units. In other words, proper implementation of corrective actions will reduce the average risk priority number, and this reduction in RPN will in turn increase the overall equipment effectiveness.

Keywords: PFMEA, OEE, RPN, Fuzzy

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

تاثیر پیاده‌سازی PFMEA با رویکرد فازی در ارتقای اثربخشی کلی تجهیزات در صنایع قند

محمد باغبانی* – دکتر سلیمان ایرانزاده – دکتر مجید باقرزاده خواجه*****

چکیده

هدف از این تحقیق مطالعه تاثیر پیاده‌سازی تکنیک تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن در فرآیند(PFMEA) بر بهبود اثربخشی کلی تجهیزات(OEE) در یک کارخانه تولید قند است. ابتدا میانگین اثربخشی کلی تجهیزات در هشت هفته‌ی کاری متوالی به عنوان پیش آزمون استخراج گردید. سپس انواع خطاهای بالقوه در فرآیند تولید شناسایی و سه پارامتر شدت خطا، احتمال وقوع خطا و احتمال کشف خطا برای هر حالت خطا بصورت مقیاس‌های کلامی و با استفاده از توافق جمعی تعیین گردید و با ضرب مقادیر عددی دِفازی شده‌ی متناظر این سه پارامتر در همدیگر، میزان عدد اولویت هر خطا محاسبه گردید. در مرحله‌ی بعد بوسیله ماتریس شدت-وقوع و جدول رتبه‌بندی ریسک، ۲۴ خطای اولویت‌دار مشخص شد. سپس راهکارهای مناسب برای کاهش اثرات و یا حذف خطاهای اولویت‌دار تعیین و پیاده‌سازی اقدامات اصلاحی و مداخلات لازم در طول هشت هفته‌ی کاری برنامه‌ریزی شد. در مدت اجرای مداخلات و در پایان هر هفته اثربخشی کلی تجهیزات به عنوان پس آزمون محاسبه شد. در پایان رابطه‌ی بین تغییرات عدد اولویت خطا(RPN) و OEE در قالب همبستگی پیرسون مورد مطالعه قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: PFMEA، OEE، RPN، فازی

* دانشجوی دکتری، گروه آموزشی مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران.

** نویسنده مسئول- استاد، گروه آموزشی مدیریت صنعتی، دانشکده‌ی مدیریت و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران.Dr.iranzadeh@yahoo.com

*** استادیار، گروه آموزشی مدیریت ،دانشکده‌ی مدیریت و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران.

۱- مقدمه

امروزه بازار متلاطم و آشفته بر شرکت‌ها فشار می‌آورد که به سرعت و با کیفیت مناسب و قیمت قابل قبول به تقاضای مشتری پاسخ دهند. این سه عامل (زمان، کیفیت و قیمت) در تعامل و وابستگی متقابل هستند، بنابراین باید بین آنها تعادل ایده‌آل با هدف دستیابی به رضایت مشتری ایجاد گردد(*Stamatis, 2003*). سازمان‌ها همواره بدنبال دستیابی به میزان رضایت بخشی از کارایی و اثربخشی در انجام وظایف، فعالیت‌ها و فرآیندهای خود هستند، یکی از راهکارهای ارتقای اثربخشی و کارایی سازمان‌ها، شناسایی مشکلات مختلف و تنگناهای متنوع و گسترده و نیز خطاهای ایجاد شده در فرایندهای مختلف تولیدی و غیر تولیدی و تلاش برای کاهش یا حذف اینگونه گلوگاهای موجود در سیستم است، از جمله مشکلات اصلی سازمان‌های صنعتی می‌توان به نرخ بالای زمان‌های بیکاری و توقف‌های بلند مدت و متعدد ماشین آلات و تجهیزات و نیز تأخیرهای مختلف در فرآیندهای تولید و عملیات، بروز خطاهای بزرگ و دردسر ساز و .... اشاره نمود، در واقع اغلب مشکلات سازمان‌های تولیدی ناشی از وقوع اشتباه و خطاهای با ریسک و آثار بالا در فرآیندهای مرتبط به تولید و عملیات است. تحقیقات گذشته نشان داده است که کاهش یا حذف حالات و آثار خطا در ماشین‌آلات و تجهیزات و افزایش سطح دسترسی، سطح کیفیت و سطح عملکرد آنها موجب ارتقای کمی و کیفی تولید محصولات و ارائه خدماتِ سازمان-های مختلف خواهد شد(*Hassan, Siadat, Yves Dantan, & Martin, 2010*). جهت شناسایی، ارزیابی و مدیریت ریسک‌های موجود در فرآیندهای مختلف سازمانی، تکنیک‌های فراوانی ابداع و بکارگیری شده است. تکنیک تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن[1](FMEA) به عنوان یکی از کارآمدترین این تکنیک‌ها می‌باشد (*Banduka, Mačužić, Stojkić, Bošnjak, & Peronja, 2016; Cândeaa, Kifor, & Constantinescu, 2014; Elahi, 2018*). از طرف دیگر اثربخشی کلی تجهیزات[2] یکی از ابزارهای کاربردی برای بهبود وضعیت اثربخشی فرآیندهای تولید است. این ابزار ساده و کاربردی، منابع اصلی و مشترک مرتبط به زیان‌های مرتبط به تولید را شناسایی و این زیان‌ها را در سه گروه اصلی به منظور بهبود اثربخشی تجهیزات تقسیم‌بندی می‌نماید(*Ahire & Relkar, 2012*). هدف از

1-Failure Mode and Effect Analysis
2-Overall Equipment Effectiveness

این تحقیق مطالعه تاثیر پیاده‌سازی تکنیک تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن در فرآیند، بر میزان بهبود اثربخشی کلی تجهیزات، در یک شرکت صنعتی تولید قند است.

۲- ادبیات تحقیق

۲-۱- FMEA

اولین استفاده رسمی از FMEA به اواسط دهه ۱۹۶۰ در صنعت هوافضا، خودروسازی و امور مرتبط به سلامت و ایمنی بر می‌گردد(*Baynal, Sarı, & Akpınar, 2017; Chang & Wen, 2010; Li, He, & Wang, 2017; H.-C. Liu, Liu, & Liu, 2013; McDermott, Mikulak, & Beauregard, 2009; Pinnarat Nuchpho, Nansaarng, & Pongpullponsak, 2014*). FMEA بعنوان ابزاری مفید و قوی در ارزیابی خطاهای بالقوه و جلوگیری از وقوع آنها در راستای بهبود ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد (*Liua, You, & Duan, 2019; Sangeetha & Saravanan, 2016; Shahin, 2004; W. Wang, Liu, Qin, & Fuc, 2018*). FMEA یک ابزار نظام یافته بر پایه کار تیمی است که در تعریف، شناسایی، ارزیابی، پیشگیری، حذف یا کنترل حالات، علل و اثرات خطاهای بالقوه در یک سیستم، فرآیند، طراحی یا خدمت بکار گرفته می‌شود، قبل از آنکه محصول یا خدمت نهایی بدست مشتری برسد(*Rezaei, Sidi, & Nouri, 2005*). میزان اولویت هر کدام از حالات خطا در FMEA با محاسبه عدد اولویت ریسک (RPN)[1] در قالب حاصل ضرب سه مؤلفه (S)[2]، (O)[3] و (D)[4] مشخص می‌شود(*Raguram, 2014*). S بیانگر شدت و بزرگی خطا در سیستم است(*Catelani, Ciani, & Venzi, 2018*) هدف اصلی از ارزیابی شدت شناسایی آثار و پیامدهای خطاهای با پتانسیل بالای وقوع است(*Yazdi, Nedjati, & Abbassi, 2018*). O احتمال اتفاق افتادن خطا و D احتمال کشف خطا قبل از اتفاق افتادن آن است (*Catelani et al., 2018; Huai-Wei Lo, Liou, Huang, & Chuang, 2019*) . ضمناً عدد اولویت خطا از حاصلضرب سه مولفه فوق و بصورت رابطه‌ی ۱ تعیین می‌شود:

$$RPN = S * O * D \qquad (1)$$

1-Risk Priority Number
2-Severity
3-Likelihood of Occurrence
4-Detection

چون در این تکنیک درجه‌بندی هر کدام از سه مؤلفه مذکور بر اساس اعدادی بین ۱ تا ۱۰ می‌باشد، RPN محاسبه شده می‌تواند عددی بین ۱ تا ۱۰۰۰ گردد. هرچه عدد اولویت خطا به عدد ۱۰۰۰ نزدیک‌تر باشد نشان دهنده ریسک بالاتر و مهم‌تر بودن خطرات و شکست‌های ایجاد شده در فرآیندهای تولیدی و خدماتی است و باید علت یا علل آن به سرعت توسط تیم FMEA بررسی شود (*Chang & Wen, 2010; Huai-Wei Lo, Lioub, Huang, & Chuang, 2019*). باتوجه به هدف؛ روش شناسی و دیگر جزئیات، FMEA به چهار نوع:

الف: Design FMEA، ب: Process FMEA ، ج: Service FMEA، د: System FMEA

تقسیم بندی شده است (*Cândeaa et al., 2014*).

PFMEA-۱-۱-۲

تکنیک تجزیه و تحلیل حالات خطا و آثار آن در فرآیند(PFMEA) برای تحلیل و ارزیابی شکست‌های بالقوه در فرآیند تولید و مونتاژ کاربرد دارد(*Asan & Soyer, 2015; Jahangoshai Rezaee, Yousefi, Valipour, & Mehdi Dehdar, 2018; Lundgren, Hedlind, & Kjellberg, 2016; Stamatis, 2003*). با استفاده از این ابزار می‌توان اثر شکست‌های فرآیندی را در قالب یک کار تیمی منسجم شناسایی و با استفاده از تکنیک طوفان‌فکری اقدامات لازم برای حذف یا کاهش شکست‌ها را تعیین و رویه‌های لازم برای بهبود وضعیت را شناسایی نمود (*Johnson & Khan, 2003; Pinnarat Nuchpho, Nansaarng, & 2014*). دلیل استفاده ازPFMEA بهبود مستمر محصول و فرآیند برای افزایش رضایت مشتری است. PFMEA بهمراه دیگر ابزارهای کیفیت، اقدامات و فلسفه پیشگیری از مشکلات و بهبود مستمر(که از عوامل کلیدی مدیریت کیفیت جامع هستند) را پشتیبانی می‌کند(*Johnson & Khan, 2003*).

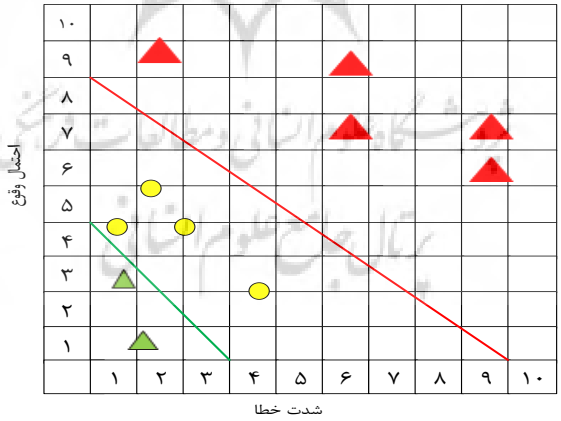
۲-۱-۲-ضعف اولویت‌بندی خطاها بر مبنای RPN

باتوجه به اینکه نمره اولویت خطا از حاصل ضرب سه پارامتر تشکیل دهنده آن به دست می‌آید، شرایط متفاوت پارامترها می‌تواند منجر به RPN یکسان و برابر گردد(*Huai-Wei Lo et al., 2019*). برای مثال در هر سه حالت زیر RPN عدد ۱۰۰ خواهد شد، اگر شدت ۱۰؛ احتمال وقوع ۲ و احتمال کشف ۵ باشد؛ همچنین اگر

شدت ۱؛ احتمال وقوع ۱۰ و احتمال کشف ۱۰ و یا اگر شدت ۴، احتمال وقوع ۵ و احتمال کشف ۵ باشد، در حالیکه تخصیص وزن و اولویت یکسان به سه خطای متفاوت مناسب نخواهد بود! در تحقیق‌های مختلف برای غلبه بر این نقصان، از دو ابزار ماتریس شدت-وقوع و جدول رتبه‌بندی ریسک برای اولویت‌بندی خطاها و شکست‌های خط تولید استفاده شده است (*Basu, 2017; Bhattacharya, Pharm, & Phil, 2015; Rinaldi, Thies, Walker, & Johanning, 2017*).

۲-۱-۳-اولویت‌بندی خطاها با ماتریس شدت - وقوع[1]

ماتریس شدت- وقوع روشی جایگزین در زمینه استفاده از مقیاس‌های رتبه‌بندی برای اولویت‌بندی مشکلات بالقوه فراهم می‌کند. در این ماتریس معیار وقوع خطا بصورت عمودی و معیار شدت خطا افقی می‌باشد. هر نقطه‌ای بر روی ماتریس نشان دهنده‌ی میزان درجه وقوع و شدت خطا است(*Bhattacharya et al., 2015*). این ماتریس احتمال وقوع و پیامدهای حالات خطا را نسبت به همدیگر نشان می‌دهد(*Rinaldi , Thies , Walker , & Johanning, 2017*). تیم تحلیل می‌تواند در ماتریس محدوده‌هایی را برای تعریف اولویت-های بالا، متوسط و پایین تعریف کند. معمولاً برای اولویت بالا رنگ قرمز، اولویت متوسط رنگ زرد و اولویت پایین رنگ سبز انتخاب می‌شود (*Bhattacharya et al., 2015*). (شکل ۱).



شکل۱: ماتریس شدت - وقوع

1- Occurrence/Severity Matrix

۲-۱-۴- اولویت‌بندی خطاها با جدول رتبه‌بندی ریسک[1]

در این جدول لزوم اقدام اصلاحی با توجه به ترکیب اعداد شدت، وقوع و احتمال کشف خطا مشخص می‌شود. در این ابزار شدت خطا بصورت افقی و احتمال وقوع به صورت عمودی خواهد آمد. اعداد و علائم داخل جدول نشان دهنده این است که چه موقع اقدام اصلاحی لازم و چه موقع غیر ضروری است (*Rivera & Mc Leod, 2009*). (شکل۲).

شدت

وقوع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱۰	N	N	N	N	N	N	N	N	C	
۹	N	N	N	N	N	N	**10**	**8**		
۸	N	N	N	N	**10**	**7**	**6**	**5**		
۷	N	N	N	**8**	**6**	**5**	**4**	**4**		
۶	N	N	**10**	**6**	**5**	**4**	**3**	**3**		
۵	N	N	**7**	**5**	**4**	**3**	**3**	**2**		
۴	N	**10**	**6**	**4**	**3**	**3**	**2**	**2**		
۳	N	**8**	**5**	**4**	**3**	**2**	**2**	**2**		
۲	N	**7**	**5**	**3**	**3**	**2**	**2**	**1**		
۱	N	**6**	**4**	**3**	**2**	**2**	**1**	**1**		

شکل۲: جدول رتبه‌بندی ریسک

شرح شکل: (**N:** اقدام اصلاحی لازم نیست؛ **C:**اقدام اصلاحی لازم است؛ در سایر خانه ها که اعداد وجود دارد؛ اگر مقدار احتمال کشف خطا بزرگتر یا مساوی عدد مذکور بود؛ اقدام اصلاحی لازم است)

۲-۱-۵- FMEA با رویکرد فازی

معمولاً بطور سنتی از RPN برای اولویت‌بندی خطاهای موجود در طراحی و تولید استفاده می‌شود. اما باتوجه به نبود اطمینان کامل و اطلاعات تاحدودی مبهم، روش استخراج اولویت خطاها با RPN سنتی دارای مشکلاتی است (*H. C. Liu, Liu, & Lin, 2013; Yazdi, Daneshvar, & Setareh, 2017*). یکی از مشکلات این است که پارامترهای S، O و D را نمی‌توان بصورت دقیق تعیین نمود، در این موارد جهت کاهش برخی از این مشکلات، بهتر است از منطق فازی برای تعیین سه شاخص مذکور استفاده نمود (*Fattahi & Khalilzadeh, 2018; H. C. Liu et al., 2013; Y.-M. Wang, Chin, Poon, & Yang, 2009; Yazdi et al., 2017*). در واقع مهم ترین کمک تئوری مجموعه‌های فازی کاربرد آن برای داده‌های مبهم و غیر دقیق است (*Keshavarzi &*

1 -Risk Ranking Tables

(*Abooie, 2016*). فازی‌سازی[1] فرآیند تبدیل ارزش متغیرهای ورودی به متغیرهای زبانی معادل آنها است. در منطق دقیق[2] یک عضو ممکن است متعلق به مجموعه‌ای از داده-ها باشد، یا ممکن است عضو آن مجموعه داده نباشد، اما در منطق فازی درجه تعلق یک عضو از میان مجموعه‌ای از اعداد فازی انتخاب می‌شود که به آنها تابع عضویت فازی می‌گویند. تابع عضویت منحنی است که در بازه صفر تا یک تعریف خواهد شد (*Rouhparvar, Mazandarani Zadeh, & Nasirzadeh, 2014*). جدول زیر واژه‌های زبانی و اعداد فازی متناسب با آنها را برای ارزیابی پارامترهای شدت خطا و کشف خطاها نشان می‌دهد. این واژه‌های زبانی بطور کامل شامل همان‌هایی می‌شوند که در FMEA سنتی بکار می‌روند، منتها در قالب اعداد فازی مثلثی به جای ارزش‌های عددی دقیق بکار رفته اند(*Rezaei et al., 2005*).

جدول ۱: درجه‌بندی قطعی برای شدت و کشف خطاها و اعداد فازی متناظر با آنها

درجه‌بندی عددی	درجه‌بندی زبانی شدت	درجه‌بندی زبانی کشف	عدد فازی
۱۰	خطرناک بدون هشدار	مطلقاً کم	(۹،۱۰،۱۰)
۹	خطرناک با هشدار	خیلی ناچیز	(۸،۹،۱۰)
۸	خیلی بالا	ناچیز	(۷،۸،۹)
۷	بالا	خیلی کم	(۶،۷،۸)
۶	متوسط	کم	(۵،۶،۷)
۵	کم	متوسط	(۴،۵،۶)
۴	خیلی کم	نسبتاً زیاد	(۳،۴،۵)
۳	اثرات جزئی	زیاد	(۲،۳،۴)
۲	خیلی جزئی	بسیار زیاد	(۱،۲،۳)
۱	هیچ	کاملاً قطعی	(۱،۱،۲)

Source: (Fattahi & Khalilzadeh, 2018; Helvacioglu & Ozen, 2014)

در جدول ۲، واژه‌های زبانی و اعداد فازی متناسب با آنها برای ارزیابی پارامتر احتمال وقوع خطا آمده است.

1 -Fuzzification
2- Crisp Logic

جدول۲: درجه بندی قطعی برای احتمال وقوع و اعداد فازی متناظر با آنها

درجه قطعی	درجه بندی زبانی	احتمال وقوع	عدد فازی
۱۰	بسیار زیاد- خطر تقریباً اجتناب ناپذیر است	۱ از ۲	(۸،۱۰،۱۰)
۹		۱ از ۳	
۸	زیاد - خطرهای تکراری	۱از ۸	(۵،۷،۹)
۷		۱ از ۲۰	
۶	متوسط - خطرهای موردی	۱ از ۸۰	(۳،۵،۷)
۵		۱ از ۴۰۰	
۴	کم - خطرهای نسبتاً نادر	۱ از ۲۰۰۰	(۱،۳،۵)
۳		۱از ۱۵،۰۰۰	
۲	جزئی: خطا غیر محتمل است	۱ از ۱۵۰،۰۰۰	(۰،۰،۲)
۱		۱ از ۱،۵۰۰،۰۰۰	

Source: (Mentes, Akyildiz, Yetkin, & Turkoglu, 2015)

در این تحقیق برای دِفازی‌کردن اعداد مثلثی از روش غیرفازی کننده «امتیازدهی به چپ و راست عدد فازی» استفاده شد. رابطه‌ی ۲ و ۳ نحوه‌ی تعیین امتیازات چپ و راست عدد فازی A را نشان می‌دهد (*Aldian, 2003; S.-H. Chen, 1985; S. J. Chen & Hwang, 1992; H.S, Pavani, & Gangadhar, 2013; H.S., Singhai, & Shukla, 2012; Kianfar, Najmi, & Ebrahimi, 2004; Reza Abroshan & Hayati, 2017; T.J, 2009*).

$$\mu_L(A) = 1 - (m/(1+\alpha)) \qquad (2)$$

$$\mu_R(A) = (m+\beta)/(1+\beta) \qquad (3)$$

با بدست آوردن این امتیازات، می‌توان امتیاز کل را بوسیله رابطه۴ محاسبه کرد.

$$\mu_T(A) = (\mu_R(A) + 1 - \mu_L(A))/2 \qquad (4)$$

در نهایت با تعیین اعداد فازی وقوع، شدت و کشف خطا، می‌توان بوسیله رابطه زیر اولویت عدد ریسک را بصورت فازی تعیین نمود:

$$\text{RPFuzzy Number}(\text{RPFN})_{ij} = O_{ij} \otimes S_{ij} \otimes D_{ij} \qquad (5)$$

برای مثال اگر اعداد فازی سه پارامتر بصورت زیر باشند، RPN فازی با انجام مراحل امتیاز دهی به چپ و راست به صورت زیر خواهد شد:

جدول۳: نحوه‌ی محاسبه RPN فازی

پارامتر	درجه بندی زبانی	عدد فازی	$m-\alpha$	m	$m+\beta$	α	β	$\mu_R(A)$	$\mu_L(A)$	$\mu_T(A)$
شدت	خطرناک با هشدار	(۸،۹،۱۰)	۸	۹	۱۰	۱	۱	۵	-۳/۵	۴/۷۵
کشف	خیلی کم	(۶،۷،۸)	۶	۷	۸	۱	۱	۴	-۲/۵	۳/۷۵
وقوع	متوسط	(۳،۵،۷)	۳	۵	۷	۲	۲	۲/۳۳۳	-۰/۶۶۷	۲

$(RPFN)_{ij}$ =۴/۷۵*۳/۷۵*۲=**۳۵/۶۳**

OEE -۲-۲

اثربخشی کلی تجهیزات در دهه۱۹۷۰ توسط Nakajima در صنایع ژاپن ارائه شد (*Foulloy, Clivillé, & Berrah, 2019*). این تکنیک بعنوان یک ابزار سنجش عملکرد با کمترین محاسبات، وضعیت موجود تولید را نشان می‌دهد (*Raguram, 2014*). کاربرد عام این ابزار در صنایع تولیدی می‌باشد (*Afefy, 2013*). این ابزار به ارزیابی ضررها و اقدامات اصلاحی برای کاهش آنها کمک می‌کند. اثربخشی کلی تجهیزات از سه مؤلفه نرخ دسترسی (A)[1]، نرخ عملکرد(PR)[2] و نرخ کیفیت (QR)[3] تشکیل شده است (*Relkar & Nandurkar, 2012*). شکل ۳ نحوه‌ی محاسبه OEE را در سازمان‌های تولیدی نشان می‌دهد.(رابطه ۶)

<table>
<tr><td rowspan="2">سطح دسترسی (Availability)</td><td colspan="3">کل زمان (A)</td></tr>
<tr><td colspan="2">زمان در دسترس(B)</td><td>خرابی و تنظیمات</td></tr>
<tr><td rowspan="3">عملکرد (Performance)</td><td colspan="3">زمان تولید (C)</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2">تولید واقعی(D)</td><td>توقف کوتاه و کاهش سرعت</td></tr>
<tr><td rowspan="2">کیفیت (Quality)</td><td colspan="2">کل تولید (E)</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>تولید سالم(F)</td><td>ضایعات و دوباره-کاریها</td></tr>
<tr><td colspan="4">$OEE = \frac{B}{A} * \frac{D}{C} * \frac{F}{E}$ (۶)</td></tr>
</table>

شکل ۳: نحوه‌ی محاسبه OEE در سازمان‌های تولیدی

1- Availability
2- Performance Rate
3- Quality Rate

به عنوان مثال اگر داده‌های تولید در یک شیفت کارخانه‌ای بصورت زیر باشد:
کل زمان در دسترس: ۴۸۰ دقیقه، زمان خرابی و تنظیمات: ۳۰ دقیقه؛ توان تولید در هر شیفت: ۴۰۰۰۰ کیلو، کل تولید یک شیفت:۳۶۰۰۰ کیلو، و میزان ضایعات: ۵۰۰۰ کیلو، مقدار OEE بصورت جدول زیر محاسبه خواهد شد:

جدول۴: نحوه‌ی محاسبه OEE

زمان در دسترس:	۴۸۰-۳۰=۴۵۰
سطح دسترسی(A):	۴۵۰/۴۸۰=۹۳/۷۵٪
سطح عملکرد(P):	۳۶۰۰۰/۴۰۰۰۰=۹۰٪
سطح کیفیت(Q):	(۳۶۰۰۰-۵۰۰۰)/۳۶۰۰۰=۸۶/۱۱٪
مقدار اثربخشی کلی تجهیزات	OEE=۹۳/۷۵٪.*۹۰٪*۸۶/۱۱٪. =**۷۲/۶۶٪**

۳-روش‌پژوهش

برای انجام این تحقیق ابتدا تیم *پیاده‌سازی* PFMEA شامل کلیه مسئولین واحدها، بخش‌های درگیر در فعالیت‌های مرتبط به فرآیندهای تولیدی کارخانه و با مشارکت صاحب فرآیندها[1] تشکیل گردید و در قالب جلسات کارشناسانه و حضور در محیط تولیدی، فرآیند کامل تولید قند از مرحله تهیه شکر خام تا تولید محصول، بطور جامع مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت، در گام بعدی کارگاه آموزشی PFMEA و OEE و نیز آشنایی مقدماتی با منطق فازی برای تمامی اعضای تیم پروژه برگزار شد. در مرحله‌ی بعدی همزمان با استخراج فرآیندهای تولیدی میزان OEE برای تجهیزات مختلف تولیدی در طول دو ماه و بصورت بازه-های زمانی یک هفته‌ای بعنوان پیش آزمون استخراج گردید و نتایج محاسبات در قالب نمودار آبشاری نشان داده شد. سپس در فاز بعدیِ پژوهش در مدت دو ماهِ کاری انواع خطاهای احتمالی و شکست‌هایی که در کمیت و کیفیت محصول و خروجی‌های فرآیندها تأثیر داشتند، توسط همان تیم تخصصی شناسایی شد. در گام بعدی در جلسات تخصصی و در قالب بحث‌های گروهی متمرکز با کارشناسان و

1- Process Owner

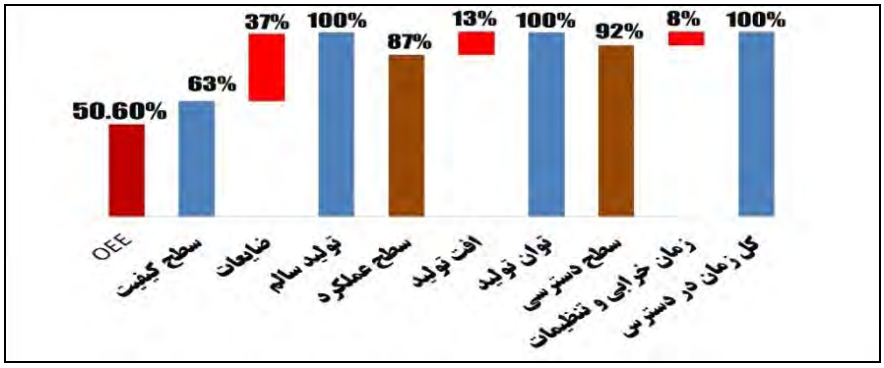
مدیران سازمان با توجه به آثار خطاها، سه شاخص شدت خطا، احتمال وقوع خطا و احتمال کشف خطا با توافق جمعی برای هر حالت خطا بصورت مقیاس‌های کلامی استخراج و با تبدیل آنها به اعداد فازی مثلثی و دِفازی‌کردن اعداد، نمره اولویت خطرپذیری خطاها (RPN) تعیین گردید. در ادامه بوسیله ماتریس شدت وقوع و جدول اولویت‌بندی خطاها، خطاهایی که در اولویتِ نیاز به اقدام اصلاحی بودند، مشخص شد.

در مرحله‌ی بعد با برگزاری جلسات طوفان فکری، راهکارهای مناسب جهت انجام اقدامات اصلاحی و کاهش ریسک‌های فرآیندهای تولیدی پیشنهاد و این راهکارها هم جهت اجرا و *پیاده‌سازی* اولویت‌بندی گردید، در ادامه مهم‌ترین این راهکارها در قالب برنامه هشت هفته ای، پس از تأیید مدیر عامل شرکت به ترتیب اولویت *پیاده-سازی* گردید. برای اطمینان از اثربخشی اقدامات و مداخلات انجام شده در فرآیند تولید، میزان OEE نیز همزمان با *پیاده‌سازی* راهکارها، بعنوان پس آزمون در بازه-های زمانی یک هفته‌ای و در طول همان هشت هفته‌ی کاری محاسبه شد، با مقایسه مقدار میانگین پس آزمون با مقدار پیش آزمونِ OEE، نتایج بدست آمده مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در واقع جنبه نوآوری این تحقیق نسبت به پژوهش‌های گذشته استفاده از پیش آزمون و پس آزمونِ مناسب، برای اطمینان از اثربخشی اقدامات مداخله گرانه است. ضمناً در پایان هرهفته عدد فازی اولویت خطا برای وضعیت جدید، از نظر تیم *پیاده‌سازی* پروژه استخراج گردید و در نهایت باتوجه به نرمال بودن مقادیر پارامترهای دو ابزار، رابطه بین مقادیر RPN و OEE در طول هشت هفته کاری، در قالب همبستگی پیرسون مورد مطالعه قرار گرفت.

۴- یافته‌های تحقیق

۴-۱- محاسبه OEE بعنوان پیش آزمون

برای تعیین وضعیت قبل از مداخلات در کارخانه قند، ابتدا میزان اثربخشی کلی تجهیزات در طول هشت هفته‌ی کاری، بصورت روزانه استخراج و میانگین آنها بصورت هفته‌ای محاسبه و در نهایت میانگین OEE در مجموع هشت هفته‌ی مورد مطالعه مشخص گردید(نمودار ۱).



نمودار ۱: نمودار آبشاری میانگین OEE بعنوان پیش آزمون در هشت هفته‌ی قبل از مداخلات

همچنان‌که در نموار فوق مشاهده می‌شود، میزان اثربخشی کلی تجهیزات بعنوان پیش آزمون در مجموع هشت هفته اول، ۵۰/۶۰٪ بود. شایان ذکر است این سطح اثربخشی در صنایع قند در حد متوسط به بالا است.

۴-۲- شناسایی خطاهای موجود در فرآیندهای تولیدی

با مرور دقیق نقشه فرایندها و بررسی آنها در جلسات تخصصی، تعداد ۴۹ خطای بالقوه در فرآیند تولید قند شکسته استخراج گردید.

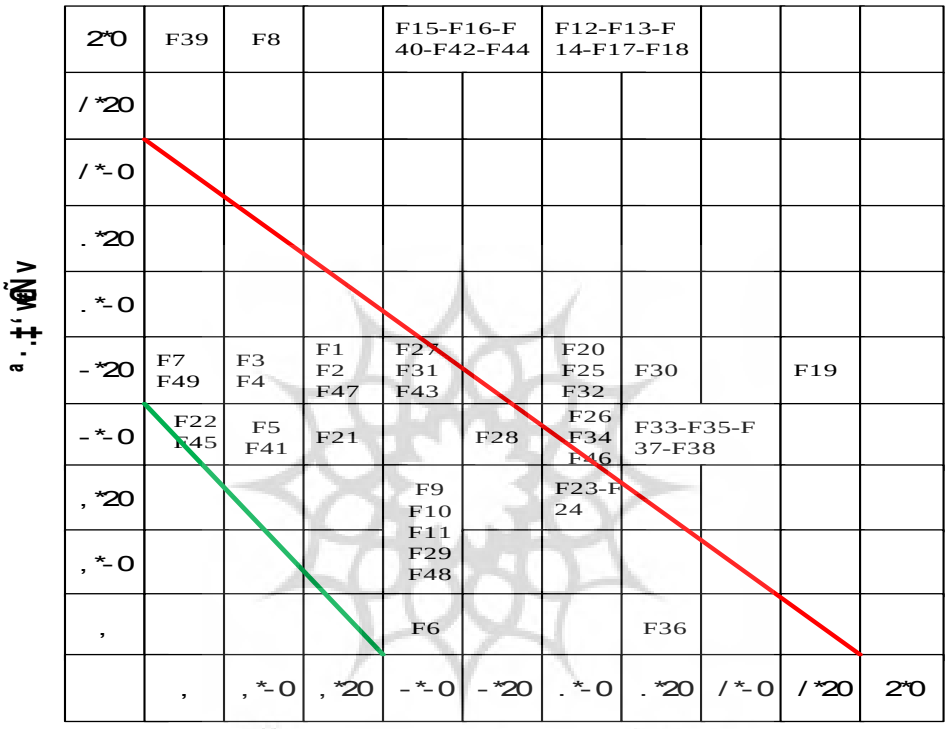
۴-۳- تعیین RPN

طی جلسات متعدد تمامی خطاها و شکست‌های بالقوه، با حضور تیم پروژه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و میزان پارامترهای شدت خطا، احتمال وقوع خطا و احتمال کشف خطا برای هرکدام از آنها بصورت متغیرهای زبانی تعیین گردید و پس از تبدیل آنها به اعداد فازی مثلثی ده طیفی، نمره اولویت خطاها با ضرب کردن سه عدد دِفازی شده در همدیگر مشخص شد.

۴-۴- تعیین خطاهای اولویت‌دار با ماتریس شدت- وقوع و جدول رتبه‌بندی ریسک

برای رتبه‌بندی خطاهای بالقوه، ابتدا اعداد ابعاد دو ابزار ماتریس شدت- وقوع و جدول رتبه‌بندی ریسک، به اعداد فازی مثلثی متناسب با خود (باتوجه به جداول ۱ و۲) تبدیل گردید، سپس با استفاده از روش «امتیازدهی به چپ و راست عدد فازی» اعداد مذکور دِفازی گردید. مراحل فازی‌سازی و دفازی کردن به همین ترتیب برای پارامترهای شدت؛ احتمال وقوع و احتمال کشف برای تمامی خطاهای فرآیند تولید انجام و در نهایت با توجه

به میزان پارامترهای تشکیل دهنده RPN، عدد اولویت خطاهای بالقوه در داخل مـاتریس و جدول مذکور جاگذاری شد. در شکل زیر محل قرارگیری خطاها (اولویت خطاها) با ذکر کد خطاها در ماتریس شدت-وقوع آمده است:



شکل ۴: ماتریس شدت وقوع برای خطاهای فرآیند تولید

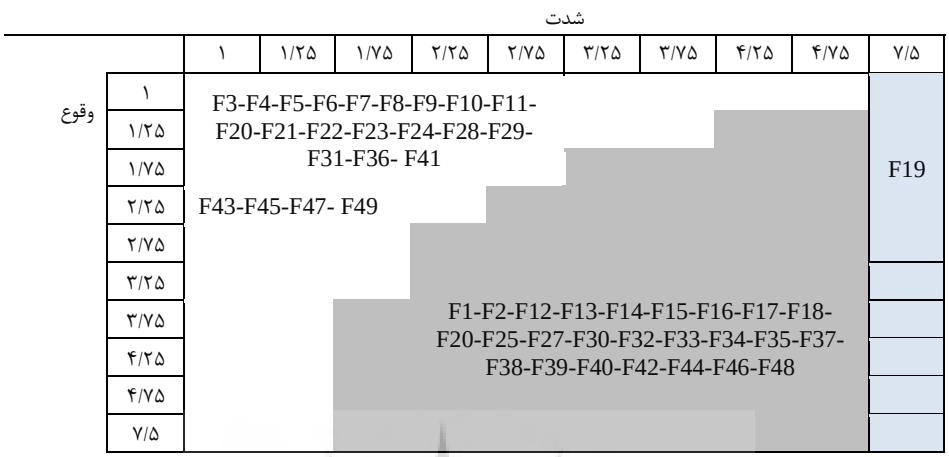
همچنان‌که در شکل فوق مشاهده می‌گردد؛ تعداد ۳۰ خطای زیر در منطقه بـا اولویـت بـالا قرار گرفتند:

F8, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17, F18, F19, F20, F25, F26, F27, F30, F31, F32, F33, F34, F35, F37, F38, F39, F40, F42, F43, F44, F46

۱۹خطای باقی مانده زیر هم در ناحیه با اولویت متوسط بودند.

F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F21, F22, F23, F24, F28, F29, F36, F41,F45, F47, F48, F49

در شکل ۵ ضرورت اقدام اصلاحی با توجه به مقدار عدد فازی پارامترهای شدت؛ احتمال وقوع و احتمال کشف خطاها در جدول رتبه‌بندی ریسک دست آمد:



شکل ۵: جدول رتبه‌بندی ریسک بصورت فازی

باتوجه به شکل فوق، ۲۴ مورد از ۴۹ خطای بالقوه‌ی فرآیند تولید، در اولویت اقدام اصلاحی قرار دارند. شایان ذکر است خطای با کد F19 در منطقه بحرانی و با اولویت اول اقدام اصلاحی می‌باشد. پس ازجلسات مختلف تحلیل و بررسی خطاها، کارگروه پیاده‌سازی PFMEA، ۲۴ خطای مشترک در دو ابزار فوق را بعنوان خطاهای اولویت‌دار فرآیند تولید تعیین نمود(جدول زیر).

جدول ۴: اولویت نهایی خطاهای فرایند تولید در کارخانه قند

ردیف	زیر فرآیند	خطای بالقوه	کد خطا	RPN
۱	سانتریفیوژ	عدم همخوانی سرعت دورانی و زمان سانتریفیوژ با محصول فرآیند ریفاینری	F32	۴۸/۸
۲	قند شکن	نوسان نامنظم تسمه قند شکن	F44	۴۱/۳
۳	ساتراسیون	PH بالاتر از ۶/۸	F12	۳۷/۹
۴		PH پایین تر از ۸/۳	F13	۳۷/۹
۵	صاف کردن توسط گراندپوند	زلال نشدن شربت	F14	۳۷/۹
۶	فیلتر پرس	صحیح عمل نکردن فیلتر پرس و وجود CACO3 بالا در خروجی	F17	۳۷/۹
۷	رنگبری شرب	رنگ بری نامناسب رزین	F18	۳۷/۹
۸	صاف کردن توسط گراندپوند	بریکس بالاتر از ۵۱	F15	۲۶/۳
۹		بریکس پایین تر از ۴۹	F16	۲۶/۳
۱۰	قند شکن	عملکرد نامناسب تیغه‌های برش	F40	۲۶/۳

ردیف	زیر فرآیند	خطای بالقوه	کد خطا	RPN
۱۱		حرکت نامنظم گیوتین هنگام شکستن قطعات کالباسی	F42	۲۶/۳
۱۲	تولید بخار	بخار ایجاد شده به اندازه کافی نباشد	F19	۲۲/۲
۱۳	جداسازی پساب	جداسازی ناقص شربت	F26	۱۷/۹
۱۴	قندریزی	دمای محیط بیشتر از حالت ایده آل	F30	۱۷/۵
۱۵	گرمخانه	کم بودن دمای گرمخانه	F33	۱۶/۹
۱۶		رطوبت گیری نامناسب هوای داخل گرمخانه	F37	۱۶/۹
۱۷		سیرکوله(گردش) نامناسب هوای داخل گرمخانه	F38	۱۶/۹
۱۸	تغلیظ شربت در	کمبود خلاء	F20	۱۵/۲
۱۹	طباخی	اشتباه در اندازه گیری بریکس شربت	F25	۱۵/۲
۲۰	گرمخانه	بالا بودن دمای گرمخانه	F34	۱۴/۶
۲۱	بسته بندی	کار نکردن جت پرینتر	F46	۱۴/۶
۲۲	قندریزی	انتقال پخت به مرحله‌ی قند ریزی با دمای کمتر از ۱۰۲ درجه	F27	۱۳/۵
۲۳	گرمخانه	کم بودن زمان انتظار قند در گرمخانه	F35	۱۳/۱
۲۴	قند شکن	جای گیری نامناسب کله قند درون تیغه‌ها	F39	۸/۳

۴-۵- تعیین راهکارهای کاهش یا حذف خطاهای اولویت‌دار و پیاده‌سازی آنها در فرایند تولید

پس از اولویت‌بندی خطاهای فرآیند تولید، باتوجه به درخت تحلیل خطا، در جلساتی تخصصی راهکارهای مناسب برای کاهش یا حذف خطاهای موجود در فرایندها، پیشنهاد و راهکارهای اصلی و قابل اجرا اولویت‌بندی شدند. در جدول ۵ راهکارهای پیشنهادی جهت کاهش یا حذف خطاهای فرآیند تولید آمده است.

جدول ۵: راهکارهای پیشنهادی برای کاهش یا حذف خطاهای فرایند تولید

کدخطا	راهکار پیشنهادی
F32	افزایش تعداد بازرسی‌های دوره‌ای؛ تغییر روش بازدید از حالت صداسنجی؛ آمپرگیری بصورت شیفتی و منظم؛ بازرسی منظم مجموعه‌ی سانتریفیوژ؛ تست و راه‌اندازی بعد از هر تعمیر دوره‌ای و اتفاقی؛ آموزش تخصصی بهره-برداری دستگاه سانتریفوژ برای همه اپراتورهای مرتبط
F44	بازرسی منظم تسمه‌های قند شکن؛ بازرسی منظم شِفت راهنما؛ بازرسی منظم بلبرینگ یک طرفه؛ تعویض و سرویس دوره‌ای شِفت‌ها حتی قبل از خرابی کامل؛ تست و راه‌اندازی بعد از هر تعمیر دوره‌ای و اتفاقی؛ آموزش تخصصی دستگاه قند شکن برای همه اپراتورهای مرتبط

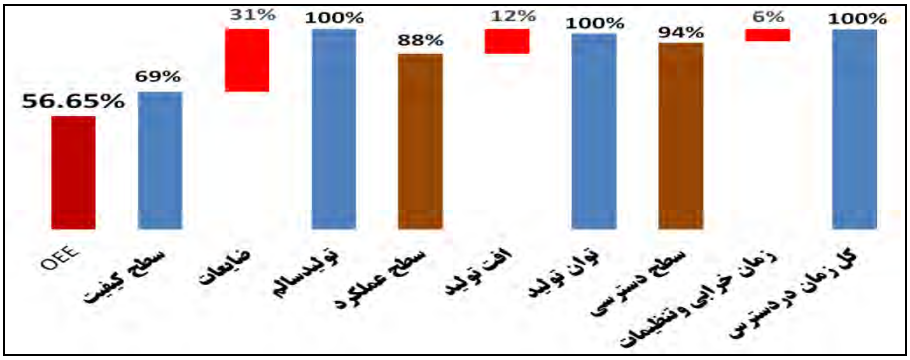
کدخطا	راهکار پیشنهادی
F12	تعیین خصوصیات لازم برای مواد اولیه توسط واحد آزمایشگاه؛ تمیزکاری دوره‌ای داخل ساتراسیون و بازرسی روزانه مجموعه هوزینگ و انتقال قدرت؛ بازرسی دوره‌ای و روزانه همزن ساتراسیون؛ آمپرگیری پمپ‌ها؛ کنترل مسیر آب سرد؛ کنترل مسیر ورود و خروج گاز CO_2 ؛ کنترل فنی پمپ‌های گاز؛ تنظیم دامپرهای دیگ بخار؛ کنترل باز بودن اگزوز دیگ‌های بخار به لاور؛ تمیزکاری فتوسل؛ تنظیم طول شعله دیگ‌های بخار؛ تعمیر و آچارکشی دوره‌ای؛ کالیبره کردن دوره‌ای تجهیزات دستگاه PH متر و وسایل تیتراسیون؛ راه‌اندازی صحیح تجهیز بعد از هر تعمیر؛ تدوین دستورالعمل استفاده از دستگاه ساتراسیون
F13	آمپرگیری پمپ‌ها؛ کنترل مسیر آب سرد؛ کنترل مسیر ورود و خروج گاز CO_2؛ کنترل فنی پمپ‌های گاز؛ تنظیم دامپرهای دیگ بخار؛ کنترل باز بودن اگزوز دیگ‌های بخار به لاور؛ تنظیم طول شعله دیگ‌های بخار؛ تعیین خصوصیات لازم برای مواد اولیه توسط واحد آزمایشگاه؛ کنترل دقیق تاریخ‌های مصرف مواد اولیه در فرآیند خرید و درصورت لزوم معدوم کردن آنها و جایگزینی مواد قابل اعتماد؛ کالیبره‌کردن دوره‌ای تجهیزات دستگاه PH متر و وسایل تیتراسیون؛ راه‌اندازی صحیح تجهیز بعد از هر تعمیر؛ تدوین دستورالعمل استفاده از دستگاه ساتراسیون
F14	بازدید و کنترل دوره‌ای و تعویض پارچه‌های صافی در صورت لزوم؛ تعویض گراندپوند در صورت بالا بودن فشار آن؛ کنترل مستمر و درصورت مناسب نبودن درجه حرارات تنظیم آن؛ تست و راه‌اندازی دستگاه بعد از هر تعمیر؛ تدوین دستورالعمل استفاده از دستگاه گراندپوند
F17	کنترل مستمر درجه حرارات؛ تعویض صفحات کج شده در زمان مورد نیاز؛ استفاده از فیلترپرس آماده بکار در صورت بالا بودن فشار فیلترپرس؛ بازدید دوره‌ای و تعویض پارچه‌های صافی در صورت لزوم؛ تدوین دستورالعمل استفاده از دستگاه فیلترپرس؛ دقت در انتخاب و استفاده از خاک فسیل و پارچه صافی
F18	تمیزکاری مستمر نازل‌های ورودی و خروجی شربت در رزین؛ تنظیم فشار ورودی و خروجی شربت؛ بازرسی و تعویض و تعمیر شیرهای ورودی و خروجی درصورت لزوم؛ کنترل سطح رزین در مخزن‌ها و در صورت نیاز افزایش سطح آن؛ آموزش دستورالعمل احیای رزین
F15	بازرسی مسیر آب ورودی به گراندپوند و حل گرفتگی‌های احتمالی؛ بازرسی دوره‌ای شیرهای ورودی گراندپوند؛
F16	آموزش اپراتور درخصوص ترکیب مناسب آب و شربت در گراندپوند؛ آموزش دستورالعمل استفاده از گراندپوند
F40	بازدید پس از هر شیفت کاری و گزارش وضعیت تیغه‌ها جهت اقدامات لازم؛ تمیزکاری تیغه‌ها پس از اعلام گزارش وضعیت تیغه‌ها و تمیزکاری دوره‌ای؛ تست و راه‌اندازی دستگاه پس از هر بار تعمیر؛ تدوین دستورالعمل بهره‌برداری و آموزش مداوم نحوه‌ی بهره‌برداری
F42	استانداردسازی قطعات مصرفی و شناسایی عمر مفید قطعات؛ آچارکشی مداوم در بازدیدهای هر شیفت؛ تعویض دوره‌ای کفشک با استخراج عمر مفید قبل از ایجاد ضایعات زیاد؛ تست و راه‌اندازی دستگاه پس از هر بار تعمیر؛ گریسکاری مداوم بوش برنجی‌ها؛ بازدید دوره‌ای واسگازین گیربکس و همچنین آچارکشی پایه‌های گیربکس
F19	رفع یا کاهش اتلاف بخار در پروسه انتقال یا تولید بخار؛ آموزش انجام صحیح تعمیرات و نگهداری دستگاه دیگ بخار؛ آموزش دستورالعمل استفاده از دیگ بخار؛ تست و راه‌اندازی بعد از هر تعمیر دوره‌ای و اتفاقی
F26	تعویض توری کانتینو درصورت وجود سوراخ در آن؛ بازرسی دوره‌ای مسیرهای ورودی و خروجی شربت و آب؛ آموزش دستورالعمل استفاده از سانتریفیوژ کانتینیو؛ آموزش انجام صحیح تعمیرات و نگهداری دستگاه سانتریفیوژ کانتینیو؛ تست و راه‌اندازی بعد از هر تعمیر دوره‌ای و اتفاقی
F30	طراحی سیستم اتوماسیون تهویه مطبوع ریفاینری؛ آموزش انجام صحیح تعمیرات و نگهداری دستگاهای تهویه
F33	جاسازی سنسورهای آنالوگ در محیط داخل گرمخانه و مقایسه مداوم دما؛ فراهم سازی سوخت جایگزین و فراهم سازی مقدمات تعویض سوخت در صورت نیاز؛ بازدید دوره‌ای و روزانه از مشعل‌ها و مبدل‌های حرارتی؛ تست و راه-

کدخطا	راهکار پیشنهادی
	اندازی دستگاه پس از هر بار تعمیر
F37	تایمردار کردن فن های سانتریفیوژ به جای سنسورها پس از شناسایی رفتار فن‌ها؛ بازدید و بازرسی روزانه دریچه-های رطوبت گیر؛ تهیه دستورالعمل استفاده از سیستم رطوبت گیر و آموزش آن؛ تست و راه‌اندازی دستگاه پس از هر بار تعمیر
F38	تهیه دستورالعمل استفاده از سیستم سیرکوله و آموزش آن؛ بازرسی مداوم از بادگیری گرمخانه‌ها قبل از شروع فرایند خشک شدن؛ تایمر دار کردن سیرکوله‌ها؛ تست و راه‌اندازی دستگاه پس از هر بار تعمیر؛ بازدید و بازرسی مداوم تجهیزات و فرایندهای داخل گرمخانه
F20	تعمیر و یا تعویض پمپ خلاء معیوب؛ بازدید مستمر مسیر تولید خلاء و رفع نشتی‌های احتمالی؛ تعبیه سنسورهای فشار (مانومتر) در مراحل مختلف تولید خلاء؛ کنترل مستمر شیرهای ورودی و خروجی کندانسور؛ سرد کردن آب بوسیله تزریق آب سرد؛ افزایش ارتفاع آب پرتابی از فواره‌های استخر آب گرم؛ بازدید و بازرسی شیرها و مخازن بصورت مستمر
F25	تدوین برنامه دوره‌ای کالیبره نمودن تجهیزات آزمایشگاهی و بریکس متر
F34	بازدید و بازرسی از سنسورهای دما؛ تست و راه اندازی دستگاه پس از هر بار تعمیر؛ تهیه دستورالعمل استفاده از کوره هوای گرم با توجه به فصل‌های مختلف؛ بازدید و بازرسی تابلو فرمان به صورت روزانه؛ تنظیم شعله‌های کوره هوای گرم با توجه به شناسنامه دستگاه
F46	اصلاح مسیرهای هوای داخل خط تولید و جداسازی آنها از هم؛ تعمیرات دوره ای جت پرینتر مطابق دستورالعمل
F27	تعویض ترمومتر در صورت وجود خطا در اندازه گیری دمای آپارات؛ تعمیرات دوره ای ترمومتر مطابق دستورالعمل؛ آموزش دستورالعمل طباخی به اپراتوها
F35	نصب تایمر شروع فرایند روی هر گرمخانه که نشان دهنده مدت زمان ماندگاری قند در گرمخانه باشد؛ اصلاح فرایندها و ارتباط فرایندها باهم (تنظیم گرمخانه بر اساس فرایندهای قبلی)
F39	فراهم‌سازی یک دست کامل شانه ای و بادامک به عنوان زاپاس و تعویض سریع در صورت معیوب بودن

در گام بعدی کاربرگ‌های PFMEA دربرگیرنده مشخصات خطاهای فرآیند تولید و راهکارهای پیشنهادی تکمیل گردید و با تقسیم مسئولیت میان واحدهای مختلف مرتبط به فرایند تولید، بیش از ۹۰٪ راهکارهای پیشنهادی در طول یک ماه کاری *پیاده‌سازی* و اجرا شدند.

۴-۶- محاسبه مجدد OEE بعنوان پس آزمون و تحلیل نتایج

بعد از *پیاده‌سازی* راهکارهای پیشنهادی، لازم بود از اثربخشی اقدامات و مداخلات انجام شده اطمینان حاصل گردد، لذا جهت سنجش وضعیت جدید، از OEE به عنوان پس آزمون استفاده گردید و میزان OEE به مدت هشت هفته‌ی کاری محاسبه شد. نتیجه محاسبات پس آزمون در نمودار ۲ آمده است:



نمودار ۲: نمودار آبشاری مقدار OEE بعنوان پس آزمون

همچنان‌که مشاهده می‌شود میزان اثربخشی کلی تجهیزات نسبت به قبل از مداخلات حدود ۶/۰۵ درصد افزایش داشته است. (OEE پیش آزمون ۵۰/۶۰ درصد بود) ضمناً میزان ضایعات خط تولید حدود ۶٪ نسبت به پیش آزمون کاهش داشته است. این میزان بهبود نشان دهنده بهتر شدن کارایی فرایند تولید و اثربخش بودن اقدامات انجام شده در جهت کاهش یا حذف خطاهای اولویت‌دار در فرآیند تولید و در نتیجه ارتقای وضعیت تولید در کارخانه قند است.

۴-۷- رابطه بین RPN و OEE

در جدول زیر میزان RPN محاسبه شده در طول هشت هفته‌ای که مداخلات و راهکارهای اولویت‌دار در فرآیند در حال اجرا بودند، آمده است.

جدول۶: متوسط RPN در هشت هفته‌ی همزمان با پیاده‌سازی راهکارها

ماه	شهریور۹۶				مهر۹۶			
هفته	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
شدت خطا	۲/۷۱	۲/۶۷	۲/۲۴	۲/۶۹	۲/۲۱	۲/۵۴	۲/۸۵	۲/۶۹
احتمال وقوع	۲/۰۱	۱/۸۶	۱/۶۹	۱/۸۳	۱/۶۸	۱/۷۱	۱/۸۵	۲/۰۴
احتمال کشف	۱/۹۵	۱/۷۵	۱/۶۵	۱/۷۷	۱/۶۷	۱/۷۳	۱/۸۵	۱/۷۵
عدد اولویت خطا	**۱۰/۶۲**	**۸/۶۹**	**۶/۲۵**	**۸/۷۳**	**۶/۱۹**	**۷/۵۱**	**۹/۷۸**	**۹/۶۰**

در جدول ۷ ، OEE محاسبه شده در طول هشت هفته‌ای که مداخلات و راهکارهای اولویت‌دار در فرآیند در حال اجرا بودند، آمده است.

جدول ۷: میزان OEE در هشت هفته بعد از مداخلات هفتگی

ماه	شهریور۹۶				مهر۹۶			
هفته	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
سطح دسترسی	٪۹۰/۱۳	٪۹۰/۹۹	٪۹۸/۱۰	٪۹۱/۶۱	٪۹۹/۳۱	٪۹۷/۶۵	٪۸۹/۶۵	٪۹۴/۲۲
سطح عملکرد	٪۸۶/۸۳	٪۸۹/۱۶	٪۸۹/۵۱	٪۸۷/۰۷	٪۹۰/۶۷	٪۹۱/۷۹	٪۸۲/۹۹	٪۸۴/۳۲
سطح کیفیت	٪۶۸/۵۹	٪۷۱/۹۵	٪۷۰/۶۴	٪۶۶/۰۵	٪۶۹/۲۶	٪۶۶/۸۸	٪۶۹/۷۷	٪۶۶/۱۸
اثربخشی کلی تجهیزات	**٪۵۳/۶۸**	**٪۵۸/۳۷**	**٪۶۲/۰۲**	**٪۵۲/۶۸**	**٪۶۲/۳۷**	**٪۵۹/۹۴**	**٪۵۱/۹۱**	**٪۵۲/۵۸**

برای استفاده از تکنیک مناسب آماری جهت تعیین همبستگی بین پارامترهای فوق که در واقع بصورت متغیرهای مستقل و وابسته هستند، ابتدا باید مشخص نماییم که آیا توزیع داده های بدست آمده از نوع نرمال است یا غیر نرمال؟ در صورت نرمال بودن توزیع داده‌های جمع‌آوری شده برای آزمون فرضیه‌ها می‌توان از آزمون‌های پارامتریک استفاده نمود، در غیر این صورت بایستی از آزمون‌های آماری ناپارامتریک استفاده کرد. با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول فوق، و با استفاده از نرم افزار SPSS نتیجه آزمون نرمال بودن متغیرهای مستقل با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در جدول زیر آمده است.

جدول ۸: نتیجه آزمون نرمال بودن متغیرهای مستقل و وابسته

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		اثربخشی کلی تجهیزات	کیفیت	عملکرد	دسترسی	عدد اولویت خطا	کشف	وقوع	شدت
	تعداد	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸	۸
پارامترهای نرمال a,b	میانگین	۰/۵۶۶۹	۰/۶۸۷۹	۰/۷۷۹۲	۰/۹۳۹۶	۸/۴۱۸۷	۱/۷۶۴۳	۱/۸۳۵۱	۲/۵۷۴۲
	انحراف از استاندارد	۰/۰۴۴۵۵	۰/۰۲۱۷	۰/۰۳۰۶	۰/۰۳۹۱	۱/۶۳۹۰	۰/۰۹۷۹	۰/۱۳۸۹	۰/۲۳۲۲
Most Extreme Differences	مطلق	۰/۲۵۱	۰/۲۱۰	۰/۱۷۲	۰/۲۲۶	۰/۱۹۰	۰/۲۲۳	۰/۱۹۴	۰/۲۸۰
	مثبت	۰/۲۵۱	۰/۱۸۵	۰/۱۲۲	۰/۲۲۶	۰/۱۵۸	۰/۲۲۳	۰/۱۹۴	۰/۱۷۵
	منفی	-۰/۱۴۷	-۰/۲۱۰	-۰/۱۷۲	-۰/۲۰۲	-۰/۱۹۰	-۰/۱۱۳	-۰/۱۵۱	-۰/۲۸۰
آزمون آماری		۰/۲۵۱	۰/۲۱۰	۰/۱۷۲	۰/۲۲۶	۰/۱۹۰	۰/۲۲۳	۰/۱۹۴	۰/۲۸۰
سطح معنی داری دو طرفه		۰/۱۴۸[c]	۰/۲۰۰[c,d]	۰/۲۰۰[c,d]	۰/۲۰۰[c,d]	۰/۲۰۰[c,d]	۰/۲۰۰[c,d]	۰/۲۰۰[c,d]	۰/۰۶۵[c]

a. Test distribution is Normal. *b. Calculated from data.*

C. Lilliefors Significance Correction. *d. This is a lower bound of the true significance.*

با توجه به نتایج آزمون آماری مقدار سطح معنی‌داری همه متغیرها بزرگتر از مقدار ۰/۰۵ است، لذا توزیع فراوانی مقادیر RPN ، OEE و پارامترهای آنها در ۸ هفته‌ی مورد بررسی، دارای توزیع نرمال است. در نتیجه برای تعیین میزان همبستگی متغیرها باید از آزمون پارامتریک پیرسون استفاده گردد. در این آزمون اگر سطح معنی‌داری بزرگتر از مقدار ۰/۰۵ باشد، فرضیه H_0 یعنی عدم وجود همبستگی میان متغیرها را قبول می‌کنیم و در صورتیکه مقدار معنی‌داری کمتر از ۰,۰۵ باشد، فرضیه H_0 را رد و فرضیه H_1 ، یعنی وجود همبستگی میان متغیرها مورد پذیرش قرار می‌گیرد.

$$\begin{cases} H_0: \rho = 0 & \text{بین } RPN \text{ و } OEE \text{ رابطه معناداری وجود ندارد} \\ H_1: \rho \neq 0 & \text{بین } RPN \text{ و } OEE \text{ رابطه معناداری وجود دارد} \end{cases}$$

جدول ۹: ضریب همبستگی بین RPN و OEE

همبستگی ها			
		RPN فازی	اثربخشی کلی تجهیزات
RPN فازی	همبستگی پیرسون	۱	-۰/۹۰۰**
	معنی داری(دو طرفه)		۰/۰۰۲
	تعداد	۸	۸

**همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار است.

با توجه به داده‌های فوق بین نمره فازی اولویت خطا و اثربخشی کلی تجهیزات همبستگی معنی‌داری وجود دارد، چرا که سطح معنی‌داری بدست آمده (Sig =0/002) کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، لذا فرض H_0 رد می‌شود. در جدول زیر نتیجه آزمون t، ارتباط بین نمره اولویت خطا و اثربخشی کلی تجهیزات آمده است.

جدول۱۰: نتیجه آزمون t، ارتباط بین RPN و OEE

Coefficients [a]					
مدل	ضرایب غیراستاندارد		ضرایب استاندارد	t	معنی‌داری
	B	خطای استاندارد	Beta		
ثابت	۰/۷۷۳	۰/۰۴۱		۱۸/۶۴۴	۰/۰۰۰
RPN فازی	-۰/۰۲۴	۰/۰۰۵	-۰/۹۰۰	-۵/۰۴۸	۰/۰۰۲

a: متغیر وابسته: OEE

متغیر وارد شده درمعادله‌ی رگرسیونی هسته اصلی رگرسیون می‌باشد که در جدول فوق آمده است. معادله‌ی رگرسیونی را می‌توان با استفاده از ستون ضرایب استاندارد نشده به شرح زیر محاسبه نمود.

$$OEE= 0.773-0.024*RPN$$

یعنی با کاهش یک واحد RPN، میزان اثربخشی کلی تجهیزات ۰/۰۲۴ بیشتر خواهد شد و برعکس با افزایش یک واحد RPN، میزان اثربخشی کلی تجهیزات ۰/۰۲۴ کمتر خواهد شد.

۵-بحث و نتیجه گیری

برای تعیین میزان اثربخشی مداخلات انجام شده در قالب پیاده‌سازی ابزارهای مختلف جهت بهبود وضعیت و ارتقای تولید در صنایع مختلف، می‌توان از پیش‌آزمون و پس‌آزمون استفاده کرد. در این تحقیق برای اطمینان از صحت و اثربخشی اقدامات و مداخلات انجام شده در قالب پیاده‌سازی تکنیک PFMEA، از تکنیک OEE بعنوان پیش‌آزمون و پس-آزمون استفاده شد. باتوجه به اینکه پیاده‌سازی PFMEA بصورت فازی، موجب افزایش اثربخشی کلی تجهیزات گردید، می‌توان گفت اجرای پروژه پیاده‌سازی PFMEA بصورت یک کار تیمی و با مشارکت صاحبان فرآیندهای مرتبط و در قالب یک سلسله فعالیت‌های منسجم و یکپارچه موجب ارتقای وضعیت تولید و دستیابی به نتایج بهتر و اثربخش‌تر خواهد شد. ضمناً در این تحقیق رابطه بین اعداد اولویت خطا و مقادیر اثربخشی کلی تجهیزات منفی بود، به عبارت دیگر پیاده‌سازی مناسبِ اقدامات اصلاحی، موجب کاهش میانگین عدد اولویت خطاها می‌شود و این کاهش هم به نوبه خود منجر به افزایش میزان اثربخشی کلی تجهیزات خواهد شد.

References

1-Afefy, I. H. (2013). Implementation of Total Productive Maintenance and Overall Equipment Effectiveness Evaluation. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 13(01), 69-75.
2-Ahire, C., & Relkar, A. (2012). Correlating Failure Mode Effect Analysis (FMEA) & Overall Equipment Effectiveness (OEE). Procedia Engineering, 38, 3482-3486. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.402
3-Aldian, A. (2003). Analysis of Travel Demand in Developing Countries: A Fuzzy Multiple Attribute Decision-Making Approach. Paper presented at the 26th Australasian Transport Research Forum, Wellington New Zeland https://atrf.info/papers/2003/2003_Aldian.pdf
4-Asan, U., & Soyer, A. (2015). Failure Mode and Effects Analysis Under Uncertainty: A Literature Review and Tutorial. In S. Y. Cengiz Kahraman (Ed.), Intelligent Decision Making in Quality Management (pp. 266). Switzerland: Atlantis Press.
5-Banduka, N., Mačužić, I., Stojkić, Ž., Bošnjak, I., & Peronja, I. (2016). Using 80/20 Principle to Improve Decision Making At PFMEA. Paper presented at the 27TH Daaam International Symposium On Intelligent Manufacturing And Automation, Vienna, Austria.
6-Basu, S. (2017). Guided Word Hazard Analysis Plant Hazard Analysis and Safety Instrumentation Systems (pp. 276): Academic Press.
7-Baynal, K., Sarı, T., & Akpınar, B. (2017). Risk management in automotive manufacturing process based on FMEA and grey relational analysis:A case study. Advances in Production Engineering & Management, 13(1), 69–80. doi: https://doi.org/10.14743/apem2018.1.274
8-Bhattacharya, J., Pharm, M., & Phil, M. (2015). Quality Risk Management – Understanding and Control the Risk in Pharmaceutical Manufacturing Industry. International Journal of Pharmaceutical Science Invention, 4(1), 29-41.
9-Cândeaa, G., Kifor, S., & Constantinescu, C. (2014). Usage of case-based reasoning in FMEA-driven software. Paper presented at the 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 –Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution.
10-Catelani, M., Ciani, L., & Venzi, M. (2018). Failure modes, mechanisms and effect analysis on temperature redundant sensor stage. Reliability Engineering & System Safety, 180, 425-433. doi: 10.1016/j.ress.2018.08.013
11-Chang, K.-H., & Wen, T.-C. (2010). A novel efficient approach for DFMEA combining 2-tuple and the OWA operator. Expert Systems with Applications, 37(3), 2362-2370. doi: 10.1016/j.eswa.2009.07.026

12-Chen, S.-H. (1985). Ranking fuzzy numbers with maximizing set and minimizing set. Fuzzy Sets and Systems, 17(2), 113-129. doi: 10.1016/0165-0114(85)90050-8
13-Chen, S. J., & Hwang, C. L. (1992). Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
14-Elahi, B. (2018). Risk Analysis Techniques Safety Risk Management for Medical Devices (1st Edition ed., pp. 67): Academic Press.
15-Fattahi, R., & Khalilzadeh, M. (2018). Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. Safety Science(102), 290–300. doi: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.018
16-Foulloy, L., Clivillé, V., & Berrah, L. (2019). A fuzzy temporal approach to the Overall Equipment Effectiveness measurement. Computers & Industrial Engineering 127 103–115. doi: https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.043
17-H.S, H., Pavani, S., & Gangadhar, P. V. S. S. (2013). Evaluating Teachers Ranking Using Fuzzy AHP Technique. International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), 2(6), 485-488.
18-H.S., H., Singhai, S. K., & Shukla, R. (2012). Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Method in Software Engineering Scenario. International Journal of Computer Applications 57(21), 45-50.
19-Hassan, A., Siadat, A., Yves Dantan, J., & Martin, P. (2010). Conceptual process planning – an improvement approach using QFD, FMEA,and ABC methods. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 26, 392–401.
20-Helvacioglu, S., & Ozen, E. (2014). Fuzzy based failure modes and effect analysis for yacht system design. Ocean Engineering, 79, 131-141. doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.12.015
21-Jahangoshai Rezaee, M., Yousefi, S., Valipour, M., & Mehdi Dehdar, M. (2018). Risk analysis of sequential processes in food industry integrating Multi-stage fuzzy cognitive map and process failure mode and effects analysis. Computers & Industrial Engineering, https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.1007.1012.
22-Johnson, K. G., & Khan, M. K. (2003). A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK. Journal of Materials Processing Technology, 139(1-3), 348-356. doi: 10.1016/s0924-0136(03)00542-9
23-Keshavarzi, R., & Abooie, M. H. (2016). Performance Evaluation of Continuous Production Process by Triangular Fuzzy Process Capability Indices. International Journal of Industrial Engineering & Production Research, 27(2).

24-Kianfar, F., Najmi, M., & Ebrahimi, M. (2004). Calculating the Risk Priority Level in the FMEA Model Using Fuzzy Theory. Paper presented at the Second International Management Conference, Tehran.
25-Li, X., He, M., & Wang, H. (2017). Application of failure mode and effect analysis in managing catheter-related blood stream infection in intensive care unit. Medicine (Baltimore), 96(51), e9339. doi: 10.1097/MD.0000000000009339
26-Liu, H.-C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. Expert Systems with Applications, 40(2), 828-838. doi: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010
27-Liu, H. C., Liu, L., & Lin, Q. L. (2013). Fuzzy Failure Mode and Effects Analysis Using Fuzzy Evidential Reasoning and Belief Rule-Based Methodology. IEEE Transactions on Reliability, 62(1), 25.
28-Liua, H.-C., You, J.-X., & Duan, C.-Y. (2019). Αν ιντεγρατεδ αππροαχη φορ φαιλυρε μοδε ανδ εφφεχτ αναλψσισ υνδερ ιντερϖαλϖαλυεδ ιντυιτιονιστιχ φυζζψ ενϖιρονμεντ. International Journal of Production Economics(207), 163–172. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.008
29-Lo, H.-W., Lioub, J. J. H., Huang, C.-N., & Chuang, Y.-C. (2019). A novel failure mode and effect analysis model for machine tool risk analysis. Reliability Engineering and System Safety(183), 173–183. doi: https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.018
30-Lundgren, M., Hedlind, M., & Kjellberg, T. (2016). Model Driven Manufacturing Process Design and Managing Quality Paper presented at the 26th CIRP Design Conference.
31-McDermott, R. E., Mikulak, p. J., & Beauregard, M. R. (2009). THE Basics OF FMEA. NewYork: Productivity Press Taylor & Francis Group.
32-Mentes, A., Akyildiz, H., Yetkin, M., & Turkoglu, N. (2015). A FSA based fuzzy DEMATEL approach for risk assessment of cargo ships at coasts and open seas of Turkey. Safety Science, 79, 1-10. doi: 10.1016/j.ssci.2015.05.004
33-Nuchpho, P., Nansaarng, S., & Pongpullponsak, A. (2014). Risk Assessment in the organization by using FMEA Innovation: A Literature Review Paper presented at the 7th International Conference on Educational Reform. https://pdfs.semanticscholar.org/ce07/6544e64c69f656f7b0daf4bf08948fd63d29.pdf
34-Raguram, R. (2014). Implementation of Overall Equipment Effectiveness (OEE). Middle-East Journal of Scientific Research, 20(5), 567-576. doi: 10.5829/idosi.mejsr.2014.20.05.11336
35-Relkar, A. S., & Nandurkar, K. N. (2012). Optimizing & Analysing Overall Equipment Effectiveness (OEE) Through Design of Experiments (DOE). Procedia Engineering, 38, 2973-2980. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.347

36-Reza Abroshan, M., & Hayati, M. (2017). Risk Assessment using Fuzzy FMEA (Case Study: Tehran Subway Tunneling Operations). Indian Journal of Science and Technology, 10(9), 1-9. doi: 10.17485/ijst/2017/v10i9/110157
37-Rezaei, K., Sidi, M., & Nouri, B. (2005). Analysis of Errors and Effects of It. Tehran: Athena(in persian).
38-Rinaldi, G., Thies, P. R., Walker, R., & Johanning, L. (2017). A decision support model to optimise the operation and maintenance strategies of an offshore renewable energy farm. Ocean Engineering 145 250–262. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.019
39-Rivera, S. S., & Mc Leod, J. E. (2009). Recommendations Generated about a Discontinuous Distillation Factory of Biofuel. Paper presented at the Proceedings of the World Congress on Engineering, London.
40-Rouhparvar, M., Mazandarani Zadeh, H., & Nasirzadeh, F. (2014). Quantitative Risk Allocation in Construction Projects: A Fuzzy-Bargaining Game Approach. International Journal of Industrial Engineering & Production Research, 25(2), 83-94.
41-Sangeetha, V., & Saravanan, P. (2016). An innovated method using Failure mode and effects analysis for improving quality of the software International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 5(1), 135-139.
42-Shahin, A. (2004). Integration of FMEA and the Kano model: An exploratory examination. International Journal of Quality & Reliability Managemen, 21, 731–746.
43-Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. Milwaukee: American Society for Quality, Quality Press.
44-T.J, R. (2009). Fuzzy Logic with Engineering Applications: John Wiley & Sons, Ltd.
45-Wang, W., Liu, X., Qin, Y., & Fuc, Y. (2018). A risk evaluation and prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral. Safety Science(110), 152–163. doi: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.009
45-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. doi: 10.1016/j.eswa.2007.11.028
46-Yazdi, M., Daneshvar, S., & Setareh, H. (2017). An extension to Fuzzy Developed Failure Mode and Effects Analysis (FDFMEA) application for aircraft landing system. Safety Science, 98, 113-123. doi: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.06.009
47-Yazdi, M., Nedjati, A., & Abbassi, R. (2018). Fuzzy dynamic risk-based maintenance investment optimization for offshore process facilities. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 57, 194-207. doi: 10.1016/j.jlp.2018.11.014