

# مراحل و ابزارهای لازم برای پیاده‌سازی اثربخش PFMEA در سازمان‌های تولیدی

محمد باغبانی\* | سلیمان ایرانزاده\*\* | مجید باقرزاده\*\*\*



## چکیده

این پژوهش نتیجه یک پژوهش علمی در یک سازمان تولیدی به نام کارخانه قند کردستان است. هدف از این تحقیق، تبیین و تشریح مراحل، ابزارها و اقدامات لازم برای پیاده‌سازی اثربخش تکنیک تجزیه و تحلیل حالات خرابی و آثار آنها در فرایند (PFMEA) در سازمان‌های تولیدی است. مراحل پیاده‌سازی اثربخش PFMEA شامل: ایجاد ائتلاف راهنما و تیم پروژه، تعیین وضعیت تولید قبل از مداخلات به‌عنوان پیش‌آزمون، استخراج نقشه فرایندهای تولید، شناسایی خطاهای فرایند و تعیین عدد اولویت خطا (RPN)، تعیین خطاهای با اولویت بالا جهت حذف یا کاهش آثار آنها با ماتریس شدت-وقوع و جدول رتبه‌بندی ریسک، تکمیل کاربرگ‌های PFMEA برای خطاهای با اولویت بالا، ترسیم تحلیل درخت خطا، شناسایی دلایل و منشأ ایجاد خطاها، ارائه راه‌کارهای حذف خطاها و کاهش آثار آنها، پیاده‌سازی راه‌کارها و در نهایت به‌دست آوردن میزان پس‌آزمون جهت تعیین میزان اثربخشی اقدامات انجام شده است.

تاریخ دریافت مقاله:

۹۷۰۷۲۶

تاریخ بازنگری مقاله:

۹۷۰۸۱۴

تاریخ پذیرش مقاله:

۹۷۱۰۲۲

\* دانشجوی دکتری، گروه آموزشی مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران.  
\*\* دانشیار، گروه آموزشی مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران.  
\*\*\* استادیار، گروه آموزشی مدیریت، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران.

## واژگان کلیدی:

PFMEA، نقشه فرایندها، RPN، ماتریس شدت-وقوع، جدول رتبه‌بندی ریسک، تحلیل درخت خطا

## ۱. مقدمه

از جمله مشکلات اصلی سازمان‌های صنعتی می‌توان به نرخ بالای زمان‌های بیکاری و توقف‌های بلندمدت و متعدد ماشین‌آلات و تجهیزات و نیز تأخیرهای مختلف در فرایندهای تولید و عملیات، بروز خطاهای بزرگ و دردسرساز و ... اشاره نمود. در واقع اغلب مشکلات سازمان‌های تولیدی ناشی از وقوع اشتباه و خطاهای با ریسک و آثار بالا در فرایندهای 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 خدمات سازمان‌های مختلف خواهد شد [۱۳]. برای کاهش حالات خطا و کاهش تأثیر آنها معمولاً از ابزار تجزیه و تحلیل حالات خرابی و آثار آنها (FMEA) استفاده می‌شود [۷].

برای اینکه انواع خطاها و آثار آنها در بخش‌های مختلف یک سازمان تولیدی یا خدماتی مورد مطالعه قرار گیرد، از انواع متفاوتی از تکنیک FMEA<sup>۱</sup> استفاده می‌شود، یکی از انواع این ابزارها تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات ناشی آن در فرایند (PFMEA)<sup>۲</sup> است. متخصصان و محققان سازمانی در قالب مراحل و تکنیک‌های این ابزار حالات مختلف شکست و آثار آن را در فرایند، مورد بررسی و مطالعه قرار داده و با توجه به سه شاخص مهم شدت خطا، احتمال وقوع خطا و احتمال کشف خطا، اولویت‌بندی خطاها در فرایند و راه‌کارهای مناسب و عملی جهت کاهش خطرات بالقوه را مشخص می‌کنند. همچنین برای افزایش قابلیت اطمینان فرایند و کاهش سطح خطرات بالقوه فرایند از طریق پیاده‌سازی راه‌کارها، موجبات ارتقای شاخص‌های ارزیابی فرایند در جنبه‌های مختلف کارایی، اثربخشی، سودآوری و بهره‌وری را فراهم می‌سازند.

1. Failure Mode and Effect Analysis  
2. Process Failure Mode and Effect Analysis

در این تحقیق مراحل و تکنیک‌های لازم به‌عنوان پیش‌نیازها و لازمه‌های پیاده‌سازی اثربخش PFMEA در سازمان‌های تولیدی تشریح می‌شود.

## ۲ مراحل پیاده‌سازی اثربخش PFMEA

### ۱-۲ تشکیل کارگروه پیاده‌سازی PFMEA

ابتدا تیمی تحت عنوان تیم پیاده‌سازی PFMEA شامل کلیه مسئولین واحدها و بخش‌های درگیر در فعالیت‌های مرتبط به فرایندهای تولیدی کارخانه و با مشارکت صاحب<sup>۳</sup> فرایندها تشکیل شود و در قالب جلسات کارشناسانه و حضور در محیط تولیدی، فرایند کامل تولید به‌طور جامع مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

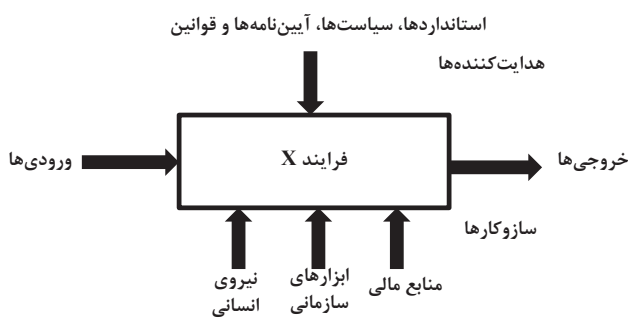
### ۲-۲ استخراج نقشه فرایندهای تولید و مستندسازی آن‌ها

فرایند را مجموعه‌ای از فعالیت‌ها می‌دانند که یک یا چند درون‌داد (ورودی) را گرفته و یک یا چند برون‌داد (خروجی) را به‌وجود می‌آورند که برای مشتری دارای ارزش است [۱۲]. مستندسازی فرایندها عبارت است از یک روش رسمی برقراری ارتباط میان ذی‌نفعان مختلف که بارزترین کارکردهای آن انتقال مقاصد میان آن‌ها، ثبات و یکپارچگی، یکنواختی اقدامات و لازمه اقدامات بهبود است [۵]. یکی از ابزارهایی که در این مرحله می‌توان استفاده کرد، استاندارد IDEF0<sup>۴</sup> است. IDEF0 یا "تعریف یکپارچه کارکردها" که به‌صورت "Integration Definition language 0" نیز نشان داده می‌شود، استاندارد است که در سال ۱۹۸۱ به درخواست نیروی هوایی ارتش آمریکا به‌عنوان یک استاندارد و متدولوژی عمومی برای تهیه مدل‌های یکنواخت و تعریف‌شده از چگونگی نمایش ارتباط بین فعالیت‌ها، کارکردها و وظایف، فرایندها و عملیات مختلف موردنیاز یک سیستم یا بنگاه و چگونگی پردازش اطلاعات آن‌ها، ایجاد شده و به تصویب نهادهای ذی‌ربط آن کشور رسیده است.

به‌کارگیری استاندارد IDEF0 در ساخت مدل‌های فرایندی در سطوح مختلف، می‌تواند در حصول اطمینان از پیش‌بینی نیازمندی‌های هر یک از سطوح فرایند یا کارکردها و توجه پیشاپیش به ارتباط بین فرایندهای اساسی و فرایندهای فرعی، ارتباط متقابل بین فعالیت‌های یک فرایند و امثال آن بسیار مفید باشد و نگرش کلان و جامع به مجموعه فرایندهای یک

سیستم و ارتباط متقابل آن‌ها را تأمین کند. گرچه در بیشتر منابع مرتبط با تهیه مدل فرایندها، IDEF0 را ابزاری برای نمایش سطح صفر فرایندها معرفی می‌کنند و سطوح بعدی را با مثلاً IDEF1، IDEF2 و غیره نشان می‌دهند، اما استاندارد مربوط برای اعداد مختلف پسوند، کاربردهای متفاوتی را پیش‌بینی کرده است [۱].

براساس متن این استاندارد، با استفاده از IDEF0، می‌توان مدلی سلسله‌مراتبی از نمودارها، نوشته‌ها و تعاریف ایجاد کرد که اطلاعات آن‌ها متقابلاً به هم ارجاع داده شوند. از IDEF0 برای ساخت مدل‌های اطلاعاتی و از IDEF2 برای ساخت مدل پویا استفاده می‌شود. شماره‌های پسوند به این سه شماره محدود نمی‌شوند و تا حدود ۱۸ سطح (در برخی موارد ۱۴ سطح) ادامه پیدا می‌کنند. در حال حاضر، از IDEF0 بیشتر برای ساخت مدل ارتباطات فرایندها به‌طور کلی استفاده می‌شود. شکل زیر، مدل عمومی IDEF0 در سطح صفر را نشان می‌دهد. ساختار این مدل تا پایین‌ترین سطوح باید به همین نحو تکرار شود. به‌عبارت دیگر، در این استاندارد، در ترسیم هر سطح از فرایند، بچه‌ای شبیه به مادر، با شکل و شمایل و مشخصات مشابه، متولد می‌شود. در داخل کادر این مدل (البته به‌صورت پنهان و جزو مشخصات)، معمولاً مواردی چون هدف از ایجاد مدل و نمودار و یا تعاریف، نکات و دیدگاه‌های حاکم بر آن نیز توضیح داده می‌شود (همان).



شکل ۱: مدل عمومی IDEF0

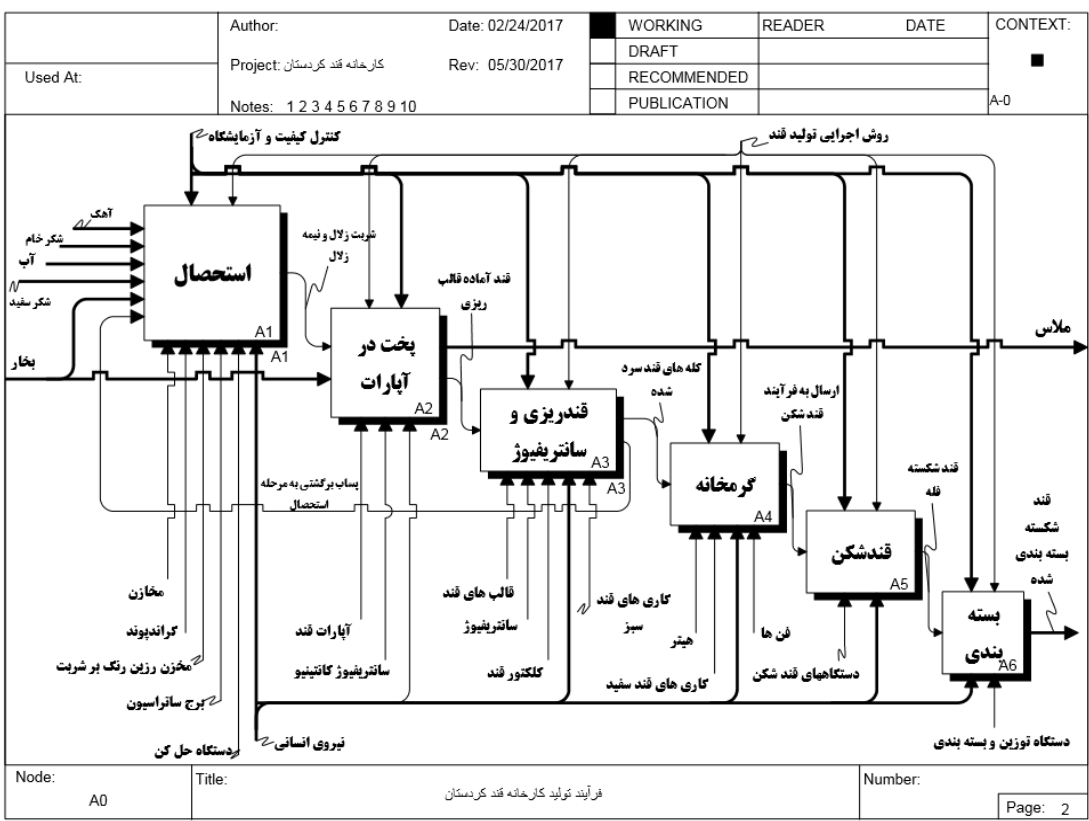
هنگام کار با نرم‌افزار IDEF0 و ترسیم مدل‌ها و نقشه‌های فرایندی اگر در هر سطحی از ترسیم مدل، باکس (مستطیل) نشان‌دهنده فرایند، دارای سایه باشد، بدین معنی است که این فرایند دارای یک‌سری فرایندها یا فعالیت‌های فرعی است که با کلیک بر روی آن و استفاده از فلش باز کردن جزئیات<sup>۵</sup> می‌توان زیر فرایندها/ زیرفعالیت‌های آن را مشاهده کرد و برعکس اگر

3. Process Owner  
4. Integration Definition for Function Modeling  
5. Open Decomposition



نقشه فرایندها پیاده‌روی<sup>۸</sup> در طول مراحل و فعالیت‌های فرایند است. تمامی مراحل فرایند باید به نوبت دنبال شود و در طول پیاده‌روی باید یادداشت‌برداری لازم صورت پذیرد. باید از رفتن به راه میان بر پرهیز کرد تا مراحل مهم فراموش نشود [۱۷]. در شکل (۲) تولید قند کردستان با استفاده از منطق IDEF0 آمده است:

در رده‌های پایین و زیرفرایندها باشیم می‌توان با کلیک بر روی فلش بازکردن والدین<sup>۶</sup> (اشاره به همان رابطه مادر فرزندی بین فرایندها) به رده‌ها و فرایندهای بالاتر رفت و بدین وسیله کلیه فعالیت‌ها و فرایندهای هر سازمانی را به‌صورت یکپارچه و منسجم و در قالب نقشه‌های سازمانی<sup>۷</sup> ترسیم و تهیه نمود. ماهیت سلسله‌مراتبی IDEF0 به سیستم اجازه می‌دهد تا به‌سادگی جزئیات بیشتری را استخراج کرده و تا حد لازم برای انجام تصمیم‌گیری مفید واقع شود. بهترین روش برای ایجاد



شکل ۲: مدل IDEF فرایند تولید قند در کارخانه قند کردستان

این ابزار به ارزیابی ضررها و اقدامات اصلاحی برای کاهش آن‌ها کمک می‌کند. اثربخشی کلی تجهیزات از سه مؤلفه نرخ دسترسی (A)، نرخ عملکرد (PR) و نرخ کیفیت (QR)<sup>۱۱</sup> تشکیل شده است [۲۲]. شکل (۳) نحوه محاسبه OEE را در سازمان‌های تولیدی نشان می‌دهد:

۲-۳ محاسبه اثربخشی کلی تجهیزات به‌عنوان پیش‌آزمون  
اثربخشی کلی تجهیزات (OEE) به‌عنوان یک ابزار سنجش عملکرد با کمترین محاسبات، وضعیت موجود تولید را نشان می‌دهد [۲۱]. کاربرد عام این ابزار در صنایع تولیدی است [۳].

سطح دسترسی (Availability)	کل زمان (A)		
	زمان در دسترس (B)		
عملکرد (Performance)	زمان تولید (C)		
	تولید واقعی (D)		توقف کوتاه و کاهش سرعت
کیفیت (Quality)	کل تولید (E)		
	تولید سالم (F)	ضایعات و دوباره کاریها	
$OEE = \frac{B}{A} * \frac{D}{C} * \frac{F}{E} \quad (1)$			

شکل ۳: نحوه محاسبه OEE در سازمان‌های تولیدی

6. Open Parent  
7. Organizational Map  
8. Walking  
9. Availability

10. Performance Rate  
11. Quality Rate

به‌عنوان مثال اگر داده‌های تولید در یک شیفت کارخانه‌ای به‌صورت زیر باشد:

جدول ۱: مثالی از نحوه محاسبه OEE

زمان توقفات کوتاه در هر شیفت: (۲۵ دقیقه)	مدت شیفت: (۴۸۰ دقیقه)
از کارافتادگی ماشین‌الات: (۲۰ دقیقه)	زمان صبحانه در هر شیفت: (۳۰ دقیقه)
نرخ ایده آل تولید در هر ساعت: (۴۰ محصول)	تولید در هر دقیقه: (۱ محصول)
کل تولید یک شیفت: (۲۰۰ محصول)	محصولات معیوب و برگشتی در یک شیفت: (۱۰ محصول)
<b>محاسبه متغیرهای OEE</b>	
زمان تولید برنامه ریزی شده: $480 - 25 - 30 = 425$	
زمان تولید واقعی: $425 - 20 = 405$	
محصولات سالم هر شیفت: $200 - 10 = 190$	
<b>محاسبه OEE</b>	
سطح دسترسی: $405 / 425 = 95,3\%$	
سطح عملکرد: $200 / ((405 / 60) * 40) = 74,7\%$	
سطح کیفیت: $190 / 200 = 95\%$	

میزان OEE برابر خواهد بود با:  $95,3\% \times 74,7\% \times 95\% = 67,4\%$

## ۲-۵ تهیه کاربرگ PFMEA برای خطاها

بعد از تعیین تمامی خطاهای بالقوه در فرایند تولید و آثار باید جهت مستندسازی آن‌ها را در کاربرگ‌های ویژه PFMEA وارد نمایید. در شکل زیر نمونه‌ای از کاربرگ‌های PFMEA آمده است، چنان که مشاهده می‌شود، در این کاربرگ مشخصات کامل فرایند از جمله نام فرایند موجود، عنوان فرایند قبلی، نام فرایند بعدی، ورودی‌ها و خروجی‌های فرایند به‌عنوان اطلاعات اصلی فرایند آمده است، در ادامه برای هر زیر فعالیت فرایند، خطاهای بالقوه و آثار وقوع خطا در کیفیت و کمی تولید و نیز اثرات آن روی سلامت و ایمنی نیروی انسانی، به‌صورت مکتوب و تشریحی خواهد آمد.

## ۲-۴ استخراج خطاهای فرایند بر مبنای منطق

### PFMEA

بعد از مستندسازی و شناخت کامل فرایند تولید باید خطاهای بالقوه موجود در فرایند در قالب کار تیمی و بر طبق تکنیک FMEA مشخص شود. یکی از اولین تکنیک‌های نظام‌مند برای تحلیل خطاست [۲۴]. به‌طور کلی می‌توان گفت این ابزار روشی برای پیشینه نمودن رضایت مشتریان به‌وسیله حذف یا کاهش مشکلات بالقوه یا شناخته شده است [۲۶]. هدف، روش‌شناسی و دیگر جزئیات این تکنیک بستگی به نوع آن دارد، در بیشتر متون مرتبط FMEA در قالب چهار نوع Service FMEA, Process FMEA, Design FMEA, System FMEA تقسیم‌بندی شده است. لازم به ذکر است این چهار نوع در مواردی با همدیگر ارتباط و تاحدودی همپوشانی دارند [۹].

تکنیک PFMEA برای تحلیل و ارزیابی شکست‌های بالقوه در فرایند تولید و مونتاژ کاربرد دارد [۱۶&۶,۲۶]. این ابزار اثر شکست‌ها را شناسایی و اقدام لازم برای حذف یا کاهش شکست‌ها را تعیین می‌کند. دلیل استفاده از PFMEA بهبود مستمر محصول و فرایند برای افزایش رضایت مشتری است. PFMEA به‌همراه دیگر ابزارهای کیفیت، اقدامات و فلسفه پیشگیری مشکلات و بهبود مستمر که از عوامل کلیدی مدیریت کیفیت جامع هستند را پشتیبانی می‌کند [۱۴].

فرآیند بعدی: گرمخانه					فرآیند قبلی: قندریزی					نام فرآیند: ساترفیوژ				
تاریخ تحلیل: ۱۳۹۶/۰۵/۰۱					خروجی فرآیند: کله های قند سفید دارای رطوبت					ورودی فرآیند: قالب های قند سبز				
نتیجه اقدامات انجام شده					تاریخ اقدام	مسئول	اقدامات پیشنهادی	نمره اولویت خطا (RPN)	احتمال کشف (D)	احتمال وقوع (O)	شدت اثر (S)	اثر(آثار) خطای یافته	خطای یافته	وظیفه سیستم نقطه کنترلی
RPN new	D	O	S	اقدامات انجام شده										
												عدم همخوانی سرعت دورانی و زمان ساترفیوژ با محصول گرمخانه و تأثیر بر روی هزینه های ت	خارج شدن پساب قند از سوراخ ته قالب با نیروی گریز از مرکز	

تصویب کننده:

تهیه کننده:

شکل ۴: نمونه ای از کاربرگ PFMEA

۱ تا ۱۰ است. RPN محاسبه شده نیز می تواند عددی بین ۱ تا ۱۰۰۰ شود، به عبارت دیگر:

$$RPN = S \times O \times D \quad (۲)$$

به طور کلی نحوه تعیین درجه بندی سه شاخص کمی شدت، احتمال وقوع و احتمال کشف به صورت جدول (۲) است [۲۶].

## ۲-۶ تعیین عدد اولویت خطاها (RPN)

میزان اولویت هر کدام از حالات خطا در FMEA را با محاسبه عدد اولویت ریسک (RPN) در قالب حاصل ضرب سه مؤلفه شدت خطا (S)، احتمال وقوع خطا (O) و احتمال کشف خطا (D) مشخص می کنیم [۱۹]. چون در این تکنیک درجه بندی هر کدام از سه مؤلفه مذکور براساس اعدادی بین

جدول ۲: نحوه تعیین درجه بندی سه شاخص کمی شدت، احتمال وقوع و احتمال کشف خطا

درجه	میزان شدت خطا	آثار خطا	نرخ احتمال خطر	احتمال رخداد خطر	میزان کشف	احتمال کشف خطا
۱	هیچ	بدون اثر	۱ از ۱,۵۰۰,۰۰۰	بعید - خطر نامحتمل است	تقریباً حتمی	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات حتمی است
۲	خیلی جزئی	اثر خیلی جزئی دارد	۱ از ۱۵۰,۰۰۰	کم - خطرهای نسبتاً نادر	بسیار بالا	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات خطا بسیار بالا است.
۳	اثرات جزئی	اثر جزئی بر جا می گذارد مثل خراش دست دست بهنگام تراشکاری	۱ از ۱۵,۰۰۰	متوسط - خطرهای موردی	بالا	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات خطا بالا است.
۴	خیلی کم	وخامت خیلی کم است ولی بیشتر افراد آن را احساس می کنند نشت جزئی گاز	۱ از ۲,۰۰۰	متوسط - خطرهای موردی	نسبتاً زیاد	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات خطا نسبتاً زیاد است.
۵	کم	وخامت کم است مانند ضرب دیدگی مسمومیت خفیف غذایی	۱ از ۴۰۰	متوسط - خطرهای موردی	متوسط	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات خطا متوسط است.
۶	متوسط	وخامت متوسط است مانند ضرب دیدگی، مسمومیت خفیف غذایی	۱ از ۸۰	متوسط - خطرهای موردی	کم	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات خطا کم است.
۷	بالا	وخامت زیاد است همانند آتش گرفتن تجهیزات سوختگی بدن	۱ از ۲۰	زیاد - خطرهای تکراری	خیلی کم	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات خطا خیلی کم است.
۸	خیلی بالا	وخامت جبران ناپذیر است - عدم توانایی انجام وظیفه اصلی از دست دادن یک عضو بدن	۱ از ۸	زیاد - خطرهای تکراری	ناچیز	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات خطا ناچیز است.
۹	خطرناک با هشدار	وخامت تاسف بار است اما همراه با هشدار است	۱ از ۲	بسیار زیاد - خطر تقریباً اجتناب ناپذیر	خیلی ناچیز	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات خطا بسیار ناچیز است.
۱۰	خطرناک بدون هشدار	وخامت تاسف بار است مثل خطر مرگ، تخریب کامل	۱ از ۱	بسیار زیاد - خطر تقریباً اجتناب ناپذیر	مطلقاً کم	مکانیسم کشف و پیامدهای حالات خطا قابل کشف نیست

12. Risk Priority Number
13. Severity
14. Likelihood of Occurrence
15. Detection

به‌عنوان مثال برای برخی از زیر فرایندهای تولید قند شکسته می‌توان خطاها و میزان پارامترهای آن‌ها را به‌صورت زیر محاسبه نمود:

جدول ۳: خطاهای موجود در فرایندهای تولید قند و منشا آن‌ها

زیر فرآیند	شاخص کنترلی/فعالیت	خطای بالقوه	کد خطا	شدت خطا	احتمال وقوع خطا	احتمال کشف خطا	RPN
حل کن شکر	شربت بریکس ۵۷ تا ۶۰	بریکس بالای ۶۰	F1	۳	۷	۸	۱۶۸
		بریکس پایین تر از ۵۷	F2	۳	۶	۶	۱۰۸
		کم بودن حجم شربت نسبت به حجم مورد نظر	F3	۲	۷	۲	۲۸
		زیاد بودن حجم شربت نسبت به حجم مورد	F4	۲	۶	۳	۳۶
تولید شیرآهک	حجم مورد نیاز شیرآهک در دیفیکاسیون کیفیت شیرآهک مورد نیاز در دیفیکاسیون (PH) و صاف بودن	کم بودن شیرآهک تولید شده	F5	۲	۵	۲	۲۰
		کیفیت نامناسب شیرآهک تولید شده	F6	۴	۱	۳	۱۲
آهک زنی به شربت	بومه حدود ۱۲ تا ۱۵	نبودن بومه در محدوده ۱۲ تا ۱۵	F7	۱	۷	۳	۲۱
		تأثیر منفی در PH مرحله اشباع (ساتراسیون)	F8	۲	۲	۷	۲۸
تولید گاز کربنیک	حجم گاز کربنیک مورد نیاز	کمبود گاز کربنیک تولید شده در دیگ های	F9	۴	۷	۴	۱۱۲
		انتقال گاز کربنیک کم به شربت	F10	۵	۷	۳	۱۰۵
ساتراسیون	کنترل PH بین ۸٫۳ تا ۸٫۶	انتقال گاز کربنیک زیاد به شربت	F11	۴	۸	۳	۹۶
		PH بالاتر از ۸٫۶	F12	۳	۹	۵	۱۳۵
صاف کردن توسط گراندپوند	کنترل رنگ شربت	PH پایین تر از ۸٫۳	F13	۶	۱۰	۳	۱۸۰
		زلال نشدن شربت	F14	۶	۸	۳	۱۴۴
فیلتر پرس	کنترل بریکس شربت بین ۴۹ تا ۵۱	بریکس بالاتر از ۵۱	F15	۲	۹	۵	۹۰
		بریکس پایین تر از ۴۹	F16	۵	۸	۲	۸۰
رنگبری شرب	زلال سازی دوباره شربت و استخراج CACO3	صحيح عمل نکردن فیلتر پرس و وجود CACO3 بیش از حد مجاز در خروجی	F17	۴	۱۰	۲	۸۰
		گرفتن رنگ شربت توسط رزین های آنیونی	F18	۵	۹	۳	۱۳۵
تولید بخار	ایجاد بخار برای پخت شربت	بخار ایجاد شده به اندازه کافی نباشد.	F19	۹	۸	۳	۲۱۶

## ۲-۷ تعیین خطاهای اولویت‌دار

معمولاً در بسیاری از تحقیق‌های گذشته برای تعیین خطاهای با اولویت بالاتر معمولاً از اصل پارتو (۲۰/۸۰) استفاده می‌شود، در خصوص نمره اولویت خطاها با استفاده از اصل پارتو می‌توان گفت مجموع ۲۰ درصد امتیاز خطاهای با نمره ریسک بالا منجر به ۸۰ درصد مشکلات و زیان‌ها در فرایند تولید می‌شوند. برخی از محققان معتقدند که استفاده از پارتو برای اولویت‌گذاری RPN، کاربرد نادرستی از مفهوم آنالیز پارتو است [۲].

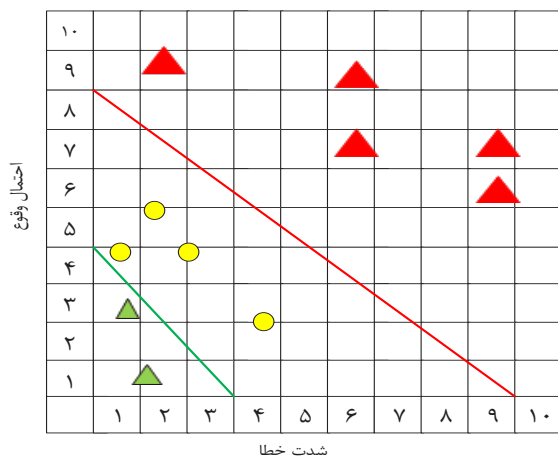
چون RPN حاصل ضرب سه درجه‌بندی است، شرایط متفاوت می‌تواند منجر به RPN یکسان و برابر شود، برای مثال هنگامی که RPN عدد ۱۰۰ می‌شود که شدت ۱۰، احتمال وقوع ۲ و

احتمال کشف ۵ باشد، همچنین اگر شدت ۱، احتمال وقوع ۱۰ و احتمال کشف ۱۰ و یا شدت ۴، احتمال وقوع ۵ و احتمال کشف ۵ باشد، درحالی‌که تخصیص وزن یکسان به سه خطای متفاوت مذکور مناسب نیست! لذا دو ابزار زیر برای تعیین خطاهای اولویت‌دار پیشنهاد می‌شود.

### ۲-۷-۱ ماتریس شدت/ وقوع<sup>۱۶</sup>

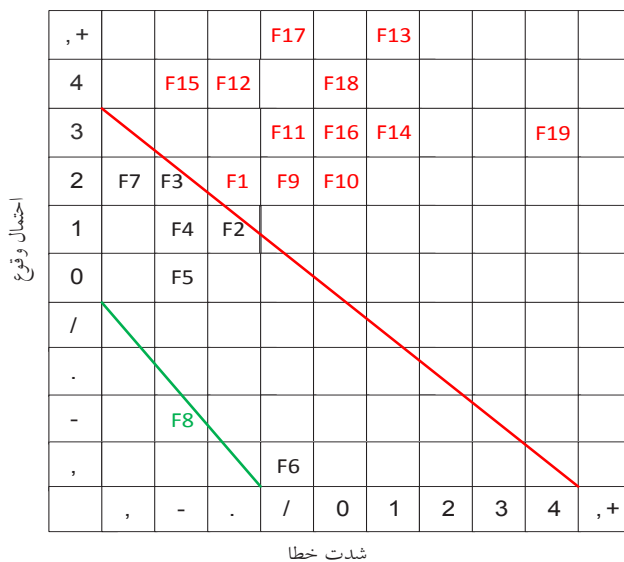
ماتریس شدت/ وقوع راه‌های دیگر یا روش‌های جایگزین در زمینه استفاده از مقیاس‌های رتبه‌بندی برای اولویت‌بندی مشکلات بالقوه فراهم می‌کند. در این ماتریس معیار وقوع عمودی و معیار شدت خطا به‌صورت محور افقی است. هر نقطه‌ای روی ماتریس نشان دهنده میزان درجه وقوع و شدت خطاست. تیم تحلیل می‌تواند در ماتریس محدوده‌هایی را

برای تعریف اولویت‌های بالا، متوسط و پایین تعریف کند. در شکل (۵) نمودار ماتریس آمده است، معمولاً برای اولویت بالا رنگ قرمز، اولویت متوسط رنگ زرد و اولویت پایین رنگ سبز انتخاب می‌شود [۸].



شکل ۵: ماتریس شدت-وقوع

برای اعداد اولویت خطاهای موجود در جدول (۳) در صفحه قبلی، ماتریس شدت-وقوع به صورت زیر خواهد شد:



شکل ۶: ماتریس شدت-وقوع برای خطاهای فرایند تولید قند

ضروری است [۲۳]. در شکل زیر نمونه ای از جدول رتبه‌بندی ریسک آمده است.

مطابق مثال فوق خطاهای:

F1-F9-F10-F11-F16-F14-F19-F15-F12-F18-F17-F13

جزو خطاهای با اولویت بالا، خطای F8 با اولویت پایین و سایر خطاها در گروه خطاهای با اولویت متوسط قرار گرفته اند.

### ۲-۷-۲ جدول رتبه‌بندی ریسک<sup>۱۷</sup>

در این جدول لزوم اقدام اصلاحی با توجه به ترکیب اعداد شدت، وقوع و احتمال کشف خطا مشخص می‌شود. شدت خطا در این ابزار به صورت 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

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

شکل ۷: مثالی از جدول رتبه‌بندی ریسک

شرح جدول: (N=اقدام اصلاحی لازم نیست؛ C=اقدام اصلاحی لازم است) در ادامه خطاهای موجود در جدول (۳) لازم است؛ در سایر خانه‌ها که اعداد وجود دارد؛ اگر مقدار احتمال کشف خطا بزرگ‌تر یا مساوی عدد مذکور بود؛ اقدام

شدت / وقوع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱				F6						
۲		F8								
۳										
۴										
۵		F5								
۶		F4	F2							
۷	F7	F3	F1	F9	F10					
۸				F11	F16	F14			F19	
۹			F15	F12	F18					
۱۰				F17		F13				

شکل ۸: ماتریس شدت- وقوع برای خطاهای فرایند تولید قند

درخت خطا (FTA) برای تحلیل بالا به پایین مناسب‌تر است، لذا اگر FMEA به صورت ابزار پایین به بالا باشد می‌تواند با استفاده از FTA آن را کامل و تقویت نمود و دلایل و حالات خطاهای بیشتری با علائم سطح بالا شناسایی نمود. تجزیه و تحلیل درخت خطا ممکن است به دنبال اجرای یک برنامه تحلیل ایمنی فرایند<sup>۱۸</sup> یا FMEA صورت گیرد هر چند که هیچ‌کدام از آن‌ها پیش‌نیازی برای اجرای FTA محسوب نمی‌شود. این ابزار روشی استقرایی است که با توجه به دلایل حادثه‌ها ایجاد می‌شود و هدف از آن تحلیل اثر خطا در یک سیستم پیچیده است [۴].

باتوجه به اعداد جدول (۳) اولویت خطاها در شکل (۸) نشان داده شده است، چنان که در شکل فوق آمده خطاهای F2-F3-F16 و F17 چون مقدار عدد کشف خطای آن‌ها کمتر از معیار مشخص شده است، در گروه خطاهای با اولویت متوسط قرار نمی‌گیرند. ضمناً اولویت خطای با کد ۱۹ بالاتر از سایر خطاها است.

## ۲-۸ استخراج درخت تحلیل خطا (FTA) برای خطاهای اولویت‌دار

چون FMEA یک ابزار پایین به بالاست، تنها می‌تواند حالات اصلی خطا را در سیستم شناسایی کند، درحالی‌که تحلیل



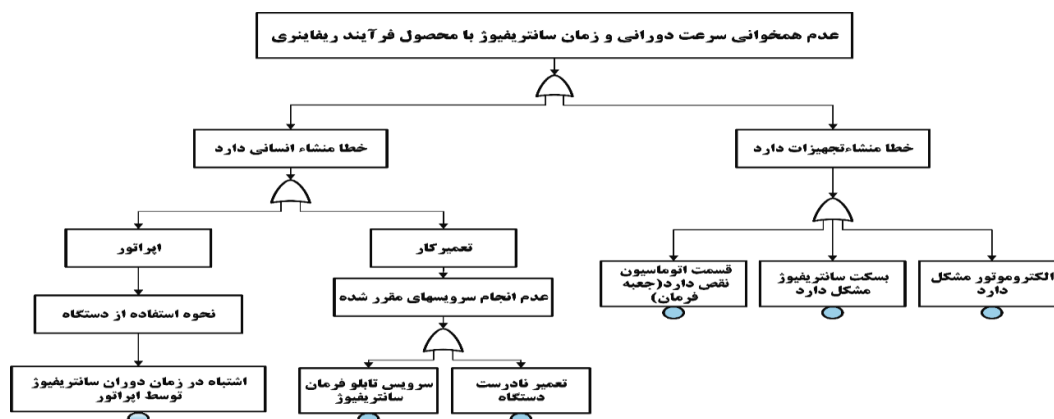
درخت تحلیل خطا ابزاری برای تحلیل، نمایش بصری و ارزیابی مسیرهای خطا در سیستم است، لذا مکانیزمی برای ارزیابی اثربخش سطح ریسک سیستم است [۱۱]. اگر FTA به‌طور مناسب به کار گرفته شود، در کنار FMEA در تشخیص روش‌های شناخت اتفاقات ناگوار در رأس مؤثر خواهد بود [۱۵]. تکنیک FTA را می‌توان خیلی ساده به‌عنوان یک روش تحلیلی در نظر گرفت که در آن وضعیت نامطلوبی از سیستم (معمولاً وضعیتی که از نقطه‌نظر ایمنی بحرانی تلقی می‌شود) مشخص شده و سیستم در زمینه محیطی و عملیاتی خود تحلیل می‌شود تا تمامی راه‌های واقعی که منجر به بروز این رویداد نامطلوب (رویداد رأس<sup>۱۹</sup>) می‌شوند، کشف شود [۱۸]. درخت تحلیل خطا برای پیش‌بینی اتفاقات مختلف در حالت بروز خطاهای متنوع

است [۱۰]. به‌عبارت دیگر برای ترسیم ارتباط بین اتفاقات مانند خطاهای زیرسیستم‌ها و دلایل خطاها کاربرد دارد [۲۰]. لذا استفاده از FTA تا حدودی از کاستی‌های FMEA می‌کاهد. می‌توان گفت تحلیل درخت خطا متشکل از کلیه علل منطقی است که می‌توانند هر یک به تنهایی یا مجموعاً منجر به یک حادثه نهایی شوند [۲]. شناسه‌های درخت خطا، گیت‌هایی<sup>۲۰</sup> هستند که منطق جاری در درخت را مشخص می‌کنند. گیت‌ها ارتباط منطقی بین رویدادهای پایین دست (ورودی گیت) و بالادست (خروجی گیت) را مشخص می‌کنند [۱۸]. در جدول (۴) نمادهایی که در برای ترسیم FTA به کار می‌رود به‌همراه شرح آن‌ها آمده است.

جدول ۴: رویدادها و نمادهای مورد استفاده در درخت تحلیل خطا

نماد رویداد	شرح رویداد
	رویداد پایه: یک خطای آغازین پایه که نیازی به توسعه بیشتر آن نیست.
	رویداد بسط نیافته: رویدادی که به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات و یا دلیل نارسا بودن پیامدها بسط داده نمی‌شود.
	رویداد شرطی: شرایط خاص یا محدودیت‌هایی که به هر گیت منطقی اعمال می‌شود
	رویداد خانه: رویدادی که انتظار می‌رود در شرایط عادی، حتماً اتفاق بیفتد.
	AND (و منطقی): خطاهای خروجی وقتی رخ می‌دهد که تمامی خطاهای ورودی همزمان اتفاق بیافتند.
	OR (یا منطقی): خطاهای خروجی وقتی رخ می‌دهد که حداقل یکی از خطاهای ورودی رخ بدهد.
	COMBINATION (ترکیب): خطاهای خروجی وقتی اتفاق می‌افتد که n تا از خطاهای ورودی رخ بدهند.
	PRIORITY AND (و همراه با اولویت): خطاهای خروجی وقتی اتفاق می‌افتد که تمامی خطاهای ورودی به ترتیب خاصی رخ بدهند.
	EXCLUSIVE OR (یا انحصاری): خطای خروجی وقتی روی می‌دهد که دقیقاً یکی از خطاهای ورودی رخ بدهد.
	TRANSFER IN (انتقال به): نشان‌دهنده انتقال بخشی از درخت خطا به جایی که با نماد TRANSFER OUT مشخص شده است. (به‌عنوان مثال انتقال به صفحه دیگر)
	TRANSFER OUT (انتقال از): نشان‌دهنده این است که این بخش از درخت بایستی به نماد TRANSFER IN مشابه خود متصل شود.

در شکل (۹) نمونه‌ای از درخت تحلیل خطا در فرایند تولید قند از شکر خام آمده است:



شکل ۹: درخت خطا برای خطای "عدم همخوانی سرعت دورانی و زمان سانتریفیوژ با محصول فرآیند ریفاینری" در فرایند تولید قند از شکر خام

## ۹-۲ استخراج راه کارهای حذف خطاها یا کاهش آثار آنها

پس از اولویت بندی خطاهای فرایند تولید و استخراج درخت تحلیل خطا در قالب کار تیمی، راه کارهای مناسب برای کاهش یا حذف خطاهای موجود در فرایندها پیشنهاد و پس از تأیید نهایی در کاربرگ PFMEA درج خواهد شد.

## ۱۰-۲ پیاده سازی راه کارهای پیشنهاد شده در فرایند تولید

راه کارهای پیشنهادی تیم پروژه برای حذف یا کاهش آثار خطاهای بالقوه در فرایند تولید بهتر است در ماتریس واگذاری

مسئولیت (RACI)<sup>(۲)</sup> ثبت شود. در این ماتریس مسئولیت های افراد مختلف برای تصمیم گیری و یا اقدام مشخص می شود. مسئول (R) کسی است که انجام فعالیت را برعهده خواهد داشت. مقام تصمیم گیرنده (A) کسی است که مسئولیت نهایی تصمیم یا فعالیت را بر عهده دارد، مشاور (C) فردی متخصص است که باید قبل از تصمیم گیری یا اقدام نهایی با او مشاوه صورت پذیرد و فرد مطلع یا آگاه (I) کسی است که بعد از اقدام یا تصمیم او را مطلع می سازند [۲۵]. در شکل (۱۰) مثالی از ماتریس مسئولیت آمده است:

شرح خطا: عدم همخوانی سرعت دورانی و زمان سانتریفیوژ با محصول فرآیند ریفریتری	مشاغل			اقدامات پیشنهادی برای کاهش یا حذف خطا	اقدام
	مدیر عامل	مدیر تولید	مسئول کنترل کیفیت		
	I	A	R	افزایش تعداد بازرسی های دوره ای	۱
	I	A	R	تغییر روش بازدید از حالت صداسنجی	۲
	I	A	R	آمپرگیری به صورت شیفی و منظم	۳
	I	A	R	بازرسی منظم مجموعه سانتریفیوژ	۴
	I	A	R	تست و راه اندازی بعد از هر تعمیر دوره ای و اتفاقی	۵
	I	R		آموزش تخصصی بهره برداری دستگاه سانتریفیوژ برای همه اپراتورهای مرتبط	۶

شکل ۱۰: نمونه ای از ماتریس مسئولیت

## ۱۱-۲ تعیین اثربخشی مداخلات انجام شده از طریق پس آزمون

پس از پیاده سازی راه کارهای پیشنهادی باید نسبت به میزان تأثیر و اثربخشی اقدامات و مداخلات انجام شده در فرایند تولید بررسی لازم صورت پذیرد، می توان میزان خطاهای فرایند تولید را بعد از مداخلات تعیین نمود، آن ها را با میزان RPN قبل از مداخلات مقایسه نمود و در صورت کاهش عدد اولویت خطاها، نتیجه گرفت مداخلات انجام شده اثربخش بوده است. اما چون پارامترهای شدت خطا، احتمال وقوع خطا و احتمال کشف خطا به وسیله کارکنان و تیم پروژه تعیین می شود و به صورت واژه های زبانی است، پیشنهاد می شود میزان OEE که نتیجه محاسبات دقیق وضعیت خط تولید است، به عنوان پس آزمون محاسبه شود و نتیجه آن با پیش آزمون مورد مقایسه قرار گیرد و در صورت رشد OEE اثربخشی مداخلات را استنتاج نمود.

## ۳ نتیجه گیری

با توجه به مراحل مختلف و یافته های تحقیق می توان موارد

زیر را به عنوان نتایج تحقیق ذکر نمود:  
الف: استخراج نقشه فرایندها و درخت تحلیل خطا موجب بهتر شدن دیدگاه و نگرش فرایندی و در نتیجه درک فراگیر کلیه فرایندها و فعالیت ها در راستای پیاده سازی PFMEA خواهد شد. به عبارت دیگر می توان گفت استخراج مدل شماتیک فرایندها با یکی از تکنیک های مدل سازی (مانند IDEF0)، یکی از لازمه های پیاده سازی و اجرای PFMEA است.  
ب: انجام دقیق مراحل مختلف پیاده سازی PFMEA در قالب کار تیمی موجب ایجاد تفاهم و هم صدایی در ارائه و اجرای راه کارهای پیشنهادی جهت کاهش یا حذف خطاهای فرایندهای سازمانی می شود.  
پ: دو ابزار ماتریس شدت/ وقوع و جدول رتبه بندی ریسک خروجی قابل استنادتری از اولویت بندی خطاها را نسبت به اصل پارتو ارائه می دهند.  
ت: استخراج درخت تحلیل خطا برای هر کدام از خطاهای اولویت دار منجر به شناخت کامل عوامل و منشاها ایجاد خطاهای بالقوه در فرایند تولید می شود و در نتیجه ارائه راه کارهای اجرایی و مناسب برای کاهش یا حذف خطاهای

ary ). Quality Risk Management –Understanding and Control the Risk in Pharmaceutical Manufacturing Industry. International Journal of Pharmaceutical Science Invention, Volume 4(Issue 1), PP.29-41.

9. Căndeaa, G., Kifor, S., & Constantinescu, C. (2014). Usage of case-based reasoning in FMEA-driven software. 8th International Conference on Digital Enterprise Technology (pp. 93-99). det: CIRP.

10. Chen, Z., Wu, X., & Qin, J. (2014). Risk assessment of an oxygen-enhanced combustor using a structural model based on the FMEA and fuzzy fault tree. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 32, 349e357.

11. Clifton, A; Ericsonor ;. (1999). Fault tree analysis- A history. 17th International system safety conference, (p. p1). seattle , Washington.

12. Hammer, M., & Champy, J. (1993). Reengineering the Corporation:A Manifesto for Buseness Revolution. New york: HarperCollins.

13. 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.

14. Johnson, K., & Khan, M. (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, 348–356.

15. Long, A. ( 2010). Beauty & the Beast – Use and Abuse of Fault Tree as a Tool. fault-tree.net.

16. Lundgren, M., Hedlind, M., & Kjellberg, T (2016). Model Driven Manufacturing Process Design and Managing Quality. 26th CIRP Design Conference. 50, p. 301. Procedia CIRP

17. McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. R. (2009). THE BASICS OF FMEA (2nd Edition ed.). New York: Productivity Press Taylor & Francis

بالقوه، تسهیل می شود.

ث: محاسبه میزان OEE به عنوان پیش آزمون و پس آزمون به دلیل اینکه نیازمند محاسبات دقیق داده های تولیدی است، بهتر از هر ابزار دیگری میزان اثربخشی مداخلات انجام شده را نشان می دهد.

## منابع

۱. رحمان زاده هروی، محمد. (۱۳۸۲). سازمان های فرایندگرا و پارادایم های سازمانی. تهران: نشر دفتر مطالعاتی- انتشاراتی اجتماع.

۲. رضایی، کامران؛ سیدی، مجید؛ نوری، بهروز (۱۳۸۴). تجزیه و تحلیل حالات خطا و اثرات ناشی از آن، چاپ دوم، تهران: آتنا.

3. Afefy, I. H (2013). Implementation of Total Productive Maintenance and Overall Equipment Effectiveness Evaluation. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 13, 69.

4. Akbari, M., P. Khazaei, Sabetghadam, & P. Karimifard. (2013). Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Power Transformers. 28th Power System Conference, (pp. 1-7). tehran.

5. Aldowaisam, T., & Gafar, L. (1999, Jannury). Business Process Reengineering an approach for process mapping. Omega, 27, 515-524.

6. Asan, U., & Soyer, A. (2016). Chapter 10:Failure Mode and Effects Analysis Under Uncertainty: A Literature Review and Tutorial. In C. Kahraman, & S. Yanik, Intelligent Decision Making in Quality Management, (p. p266). Switzerland: Intelligent Systems Reference Library 97.

7. Banduka, N., Mačužić, I., Stojkić, Ž., Bošnjak, I., & Peronja, I. (2016). Using 80/20 Principle To Improve Decision Making At Pfmea. 27th Daaam International Symposium On Intelligent Manufacturing And Automation (pp. pp.0487-0492). Vienna, Austria: Published by DAAAM International.

8. Bhattacharya, J., Pharm, M., & Phil, M. (2015, Janu-

sis: FMEA from theory to execution (Second Edition ed.). New York, Milwaukee: ASQ Quality Press.

Group.

18. NASA. (2002). Fault Tree Handbook with Aerospace application. (V. 1.1, Ed.) Washington: Prepared for NASA Office of Safety and Mission Assurance; NASA Headquarters. Retrieved 09 18, accessed 2017, from [https://elibrary.gsfc.nasa.gov/\\_assets/doclibBidder/tech\\_docs/25.%20NASA\\_Fault\\_Tree\\_Handbook\\_with\\_Aerospace\\_Applications%20-%20Copy.pdf](https://elibrary.gsfc.nasa.gov/_assets/doclibBidder/tech_docs/25.%20NASA_Fault_Tree_Handbook_with_Aerospace_Applications%20-%20Copy.pdf)

19. Nuchpho, P., Nansaang, S., & A. P. (2014). Risk Assessment in the organization by using FMEA Innovation: A Literature Review. 7 th International Conference on Educational Reform, (p. 781).

20. Peeters, J., Basten, R., & Tinga, T. (2017). Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner. (E. T. Universiteit, Ed.) Vol. 528. Retrieved from [https://pure.tue.nl/ws/files/60891304/wp\\_528.pdf](https://pure.tue.nl/ws/files/60891304/wp_528.pdf)

21. Raguram, R. (2014). Implementation of Overall Equipment Effectiveness (OEE). Middle-East Journal of Scientific Research, 20(5), 568.

22. Relkar, A., & Nandurkar, K (2012). Optimizing & Analysing Overall Equipment Effectiveness(OEE) Through Design Experimente(DOE). Procedia Engineering, 38, 2973.

23. Rivera, S. S., & McLeod, J. E. (2009). Recommendations Generated about a Discontinuous Distillation Plant of Biofuel. Proceedings of the World Congress on Engineering, (p. P3). London.

24. 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, VOL5(ISSUE 1), 135-139.

25. Smith, Michael (2005). Role & Responsibility Charting (RACI) . Project Management Forum. p. 5.

26. Stamatis, D. (2003). Failure mode and effect analy-