Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(8) (2021) 1099-1102
DOI: 10.22060/mej.2021.19020.6943

# An Improved Failure Modes and Effects Analysis as a New Framework to perform the Function Analysis Phase of products in the Value Engineering

M. Fazli, M. Kazerooni*

Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** Increasing product value is a topic that is always a concern for manufacturers. In the case one of the best methodologies is value engineering. There are different steps for performing value engineering in different sources. One of the important and primary phases in performing value engineering is the functional analysis phase. According to this paper, it is possible to perform the product function analysis phase in the proposed improved failure modes and effects analysis framework that is one of the ways of the correct performance analyzing of the products in the National Standard of America. Using of proposed framework not only performs the function analysis process step by step but also reveals one of the hidden factors which are effective on the value of the product functions. In this way, failure risk is revealed in order to calculate the real value and recognize the low-value functions for introducing to the value engineering creativity phase. On the other hand one of the advantages of using the framework presented in this paper is that due to the symmetry of the time to run failure modes and effects analysis and implement value engineering, it integrates a part of the implementation of failure modes and effects analysis and value engineering.

**Review History:**

Received: Sep, 28, 2020
Revised: Feb. 03, 2021
Accepted: Apr. 10, 2021
Available Online: Apr. 23, 2021

**Keywords:**

Value engineering
Function analysis
Failure modes and effects analysis
Reliability

## 1. INTRODUCTION

Producers should be able to sell their products with the increasing competitive ability to stay in the market. Value engineering seeks to satisfy customers and increase the competitiveness of the product by enhancing its value in order to increase product sales in the market. This is done by identifying and eliminating low-value and unnecessary product functions and finding low-cost creative solutions to provide other types of product functions in a quality manner. There are various phases in different standards and resources for value engineering [1-3]. One of the main phases of value engineering is the product function analysis phase that during it, every product function should be identified, analyzed, and decided about. Correct performing of this phase plays an effective and important role in the final result of value engineering performance. But when the worth of each function should be determined separately in the product function analysis phase, the customer cannot influence it in determining the product function worth, because failure risk and reliability of each function are not understandable for the customer. This can distort the worth set for the functions and consequently the value set for them. As this determined value for functions is the basis of the decision to continue the value engineering process, ultimately, the expected improvement from the implementation of value engineering for the product is not achieved. The presented method in this paper can reveal the reliability and failure risk of each product function and interfere with it to determine the real worth of the product. So in this paper, a new framework has been presented to perform the product function analysis phase by improving the traditional Failure Modes and Effects Analysis. (FMEA) is one of the methods to analyze the failure risk of the product in American National Standard and also it is one of the ordinary ways to identify factors and analyze possible failure effects on the products [4, 5]. Improvement of the traditional FMEA and combination of it with other methods and techniques is an issue that some research is done about it. In each of these studies, the purpose of FMEA improvement is getting the new capabilities and advantages. For example research on the combination of Fault Tree Analysis (FTA) and FMEA methods. Because the full implementation of each of these methods on one product is very time consuming. Therefore, in each of these studies, a combined method is presented to perform the analysis of product exhaustion risk with less time [6-8]. Also, there are some researches about the combination of FMEA and Quality Function Deployment (QFD) as an ordinary way in quality engineering. This way some limitations are covered and a new method is examined in quality control [9, 10]. In this paper, a framework has been offered to perform the product function analysis phase by improving traditional FMEA. FMEA and value engineering are two methods separate from each other that the purpose of one of them is increasing reliability and another one is

*Corresponding author's email: Kazerooni@kntu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

**Table 1. Sample table of the proposed improved FMEA**

| Item / Function | Potential failure Mode | Potential Effect(s) of Failure | Severity | Potential Cause(s) / Mechanism(s) of Failure | Occurrence | Current Design Controls Preventive | Current Design Controls Detective | Detection | *RPN* | Function Type (*FT*) | Function Cost (*FC*) | Function Worth (*FW*) | Function Failure Risk (*FFR*) | Function Modified Worth (*FMW*) | Modified Value Index (*MVI*) | Recommended Actions | Severity | Occurrence | Detection | *RPN* | *MVI* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

increasing product value which are done independently. This paper offers a framework to perform the product function analysis phase in the FMEA framework, by the combination of value engineering basics and FMEA.

## 2. METHODOLOGY

In this research by improving the traditional FMEA, a framework is presented to perform the value engineering product function analysis phase. By use of the proposed improved FMEA, all goals of the product function analysis phase are achieved. In addition, the use of this framework has some advantages that were mentioned before. The most important advantage is the disclosure of failure risk of each function which is difficult to apply in estimating the worth of functions because it is not tangible to the consumer. Using the proposed framework, this parameter is made visible and applied in calculating the real worth of product functions and their real worth is used to identify low-value product functions to introduce to the value engineering creativity phase. In this method, new columns have been added to the ordinary FMEA table which includes:

· Function Type (*FT*) coefficient

· Function Worth (*FW*) coefficient from the customer's viewpoint

· Function Cost (*FC*) coefficient

· Function Failure Risk (*FFR*) coefficient

The above coefficients are determined using the provided supporting tables...

· Function Modified Worth (*FMW*) coefficient

The amount of this column for each row is defined as follow:

$$FMW = FW \times FFR \tag{1}$$

· Modified Value Index (*MVI*)

Using the function modified worth coefficient and its cost coefficient, a parameter is calculated that can be used as modified value index to decide whether to continue studying the value for the relevant function.

$$MVI = FMW \times FC \tag{2}$$

It is necessary to a threshold be defined for MVI based on the company policies. Table 1 shows an example of the table used in the improved FMEA.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

To complete the above table for a sample product that is a surgical chair, first the columns of the ordinary FMEA up to *RPN* calculation for each row completed. By completing the improved FMEA table, after identifying high-cost functions on the basis of the Pareto rule, *FMW* and *MVI* were calculated and the rows whose *MVI* is below the threshold defined by The manufacturer were identified. These functions are in fact costly and low value product functions that had to be decided about in the analysis phase of the product functions. Therefore, by examining the value of *FT* for this category of product functions, for cases where *FT* equals 0, that is, we are faced with a costly and low-value but removable function. Therefore, the removal of the relevant function from the product is recommended, as a result of which the overall value of the product is somewhat upgraded and the risk of failure is reduced to some extent. When *FT* equals 1, it means we confront high-cost, low-value and irremovable functions. These functions are introduced to the creativity phase to continue the value engineering process and find creative actions for value increase

## 4. CONCLUSIONS

In the presented method in this paper, without the need to perform the function analysis phase of value engineering separately which will be time-consuming and costly, by performing the proposed improved FMEA framework, a criterion named *MVI* as an index is used to decide about each product function. As mentioned before after identifying the costly functions of the product according to Pareto law, the

amount of *FMW* and *MVI* calculated for them and according to the values of *FT*, *MVI,* and *RPN* and based on the provided auxiliary table, the appropriate action to continue studying the value of each function is determined. On the other hand, one of the advantages of using the framework presented in this paper is that due to the symmetry of the right time to implement FMEA and the right time to implement value engineering, unifies part of the work of implementing FMEA and implementing value engineering. This way causes to decrease parallel work, save time and cost, and increase the speed of product development and its offering to the market. As mentioned before, about the sample product, by completing the improved FMEA, the appropriate action to continue studying the value of each function is determined. Also, the main part of failure risk analysis and value engineering product function analysis phase are done at the same time by using this framework that causes to offer products to the market fast and also decrease their prices.

## REFERENCE


[1] S.S. Iyer, Value engineering a how to manual, New Age Internat. Limited Publ., New Dehli [u.a., 2009.

[2] A.J. Dell'Isola, A.J. Dell'Isola, Value engineering: practical applications --for design, construction, maintenance & operations, R. S. Means Company, Kingston, Mass, 1997.

[3] R.J. Park, Value engineering: a plan for invention, St. Lucie Press, Boca Raton, Fla, 1999.

[4] S.o.A. Engineers, Potential Failure Mode And Effects Analysis In Design (Design FMEA) And Potential Failure Mode And Effects Analysis InManufacturing AND Assembly Processes (Process FMEA Reference Manual), in: Submitted for recognition as an American National Standard (SAE J1739), U.S.A., 1994.

[5] R.E. McDermott, R.J. Mikulak, M.R. Beauregard, The basics of FMEA, CRC Press, New York, 2009.

[6] Z. Bluvband, R. Polak, P. Grabov, Bouncing failure analysis (BFA): the unified FTA-FMEA methodology, 2005.

[7] X. Han, J. Zhang, A combined analysis method of FMEA and FTA for improving the safety analysis quality of safety-critical software, in: 2013 IEEE International Conference on Granular Computing (GrC), 2013, pp. 353-356.

[8] J.F.W. Peeters, R. Basten, T. Tinga, Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner, Reliability Engineering & System Safety, 172 (2017).

[9] A. Hassan, A. Siadat, J.-Y. Dantan, P. Martin, Conceptual process planning – an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 26 (2010) 392-401.

[10] Q. Guo, K. Sheng, Z. Wang, X. Zhang, h. Yang, R. Miao, Research on Element Importance of Shafting Installation Based on QFD and FMEA, Procedia Engineering, 174 (2017) 677-685.



**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

*M. Fazli, M. Kazerooni, An Improved Failure Modes and Effects Analysis as a New Framework to perform the Function Analysis Phase of products in the Value Engineering , Amirkabir J. Mech Eng., 53(8) (2021) 1099-1102.*

**DOI:** 10.22060/mej.2021.19020.6943

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۸، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۶۶۵ تا ۴۶۹۰
DOI: 10.22060/mej.2021.19020.6943

# توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول با هدف ارائه چارچوبی جهت اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول در مهندسی‌ارزش

محمد فضلی، مهرداد کازرونی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

**خلاصه:** تولیدکنندگان همواره بر سر تناسب بیشتر کارکردهای ارائه‌شده توسط محصول و کیفیت آن‌ها، با قیمت محصول در مقایسه با محصولات سایر رقبا و به عبارتی ارزش بیشتر محصول در حال رقابت هستند. یکی از بهترین متدولوژی‌ها برای افزایش ارزش محصولات و پروژه‌ها، اجرای فرایند مهندسی ارزش است. یکی از فازهای اولیه و مهم در اجرای مهندسی ارزش، فاز تحلیل کارکردهای محصول است. در این مقاله، با توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول که یکی از روش‌های تحلیل ریسک عملکرد نادرست محصول در استاندارد ملی آمریکا است، چارچوبی برای اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول در بستر این روش فراهم می‌شود. مزیت مهم این چارچوب این است که ضمن اجرای گام به گام و قاعده‌مند فرآیند تحلیل کارکردهای محصول، ریسک واماندگی کارکردها که یکی از عوامل پنهان تاثیرگذار بر ارزش کارکردهای محصول است را آشکارسازی کرده و در محاسبه ارزش واقعی کارکردها جهت شناسایی کارکردهای کم ارزش، برای معرفی به فاز خلاقیتِ مهندسی ارزش دخالت می‌دهد. استفاده از این چارچوب همچنین می‌تواند باعث کاهش زمان و هزینه توسعه محصول جدید و ارائه آن به بازار و پیش‌دستی نسبت به رقبا شود. چارچوب پیشنهادی این مطالعه می‌تواند در کلیه صنایع مرتبط با طراحی و ساخت محصولات مورد استفاده قرار گیرد.

**تاریخچه داوری:**
دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۰۳

**کلمات کلیدی:**
مهندسی ارزش
تحلیل کارکردها
تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول
قابلیت اطمینان

## ۱- مقدمه

تولیدکنندگان برای بقای در بازار تولید، باید بتوانند در رقابتی تنگاتنگ، محصول خود را بفروشند. در بازارهایی که از هرنوع محصول، تنوع بالایی در دسترس مصرف‌کننده است، تولیدکننده‌ای می‌تواند برنده این رقابت باشد که بتواند ترکیب مناسبی از سه عامل کارکرد، کیفیت و قیمت را در محصول خود ارائه نماید. به‌عبارتی چیزی که مشتری را جذب می‌کند صِرف کیفیت خیلی بالا و یا کارکردهای متنوع محصول نیست. بلکه آنچه مهم است، تناسب بین هزینه پرداختی برای محصول و کیفیت و کارکرد دریافتی از آن است که این تناسب در مفهوم ارزش محصول ارزیابی می‌شود. هرچه ارزش محصول بالاتر باشد، مورد اقبال بیشتر مشتریان خواهد بود. لذا رقابت بین تولیدکنندگان در حقیقت رقابت برای ارزش‌آفرینی بیشتر برای محصولات آن‌ها است. از اینجا می‌توان به جایگاه و اهمیت مهندسی ارزش پی‌برد.

به طور خلاصه مهندسی ارزش به دنبال ارتقاء ارزش محصول از طریق شناسایی و حذف کارکردهای کم ارزش و غیرضروری محصول یا پروژه و یافتن راه حل‌های خلاقانه برای برآورده‌سازی باکیفیت و کم هزینه سایر انواع کارکردهای آن‌ها است. کار طراحی و تدوین این روش در سال ۱۹۴۷ میلادی در شرکت جنرال الکتریک آغاز شد و به تدریج شرکت‌های دیگر و برخی سازمان‌های دولتی در امریکا نیز این روش جدید را به‌عنوان ابزاری برای کاستن از هزینه‌های خود به کار بستند [۱]. در منابع مختلف مراحل پیاده‌سازی مهندسی ارزش به شکل‌های مختلفی بیان‌شده‌است [۴-۲]. یکی از فازهای اصلی مهندسی ارزش، فاز تحیل کارکردهای محصول مورد نظر است که اجرای صحیح آن تأثیر مستقیم بر نتیجه اجرای مهندسی ارزش

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: kazerooni@kntu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

خواهد داشت. در این مقاله، مدلی از توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول[1] ارائه می‌شود که امکان اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول در بستر آن را فراهم می‌کند.

روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول، یکی از بسترهای مناسب برای تحلیل ریسک واماندگی محصول در استاندارد ملی آمریکا است [۵]. این روش اولین‌بار به‌طور رسمی در اواسط دهه ۱۹۶۰ میلادی در صنعت هوا و فضای آمریکا استفاده شد و به‌طور خاص بر موضوعات مرتبط با ایمنی تمرکز داشت و به سرعت تبدیل به یک مفهوم زیرساخت کلیدی جهت بهبود ایمنی در محصول شد و به مرور جای خود را در سایر صنایع باز کرد. هدف از انجام این روش جستجو برای تمامی راه‌هایی است که می‌تواند منجر به شکست یا واماندگی یک محصول یا فرآیند شود [۶].

چارجوب تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی این مقاله، ضمن اجرای گام به گام و قاعده‌مند فرآیند تحلیل کارکردهای محصول، مزیت مهمی را فراهم می‌کند و آن آشکارسازی یکی از عوامل پنهان تاثیرگذار بر ارزش کارکردهای محصول است. در این روش ریسک واماندگی کارکردها بعنوان یکی از عوامل مؤثر بر بهاء کارکردها و پنهان از منظر مشتری آشکارسازی و در تصمیم مشتری در تعیین بهای کاکردها جهت شناسایی کارکردهای کم ارزش محصول برای معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش دخالت داده می‌شود که این موضوع در تحقیقات قبلی مشاهده نشده است. به این ترتیب امکان تصمیم‌گیری در مورد ارزش کارکردها براساس بهای اصلاح شده آن‌ها فراهم می‌شود. یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از چارچوب ارائه شده در این مقاله این است که با توجه به متقارن بودن زمان مناسب برای اجرای روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و زمان مناسب برای پیاده‌سازی مهندسی ارزش، بخشی از کار اجرای آن‌ها را تجمیع می‌کند که این امر سبب کاهش کار موازی و درنتیجه صرفه‌جویی در زمان و هزینه و افزایش سرعت توسعه محصول جدید و ارائه آن به بازار می‌شود.

## ۱-۱- پیش‌زمینه

### ۱-۱-۱- معرفی مهندسی ارزش

در یک تعریف مختصر می‌توان ارزش را به صورت نسبت کارکرد و کیفیت به هزینه تعریف کرد. برای نشان دادن کمی ارزش هم می‌توان از پارامتری به نام شاخص ارزش که برمبنای همین تعریف محاسبه می‌شود استفاده نمود [۷].

$$\text{شاخص ارزش} = \frac{\text{بهای}\left(\text{کارکرد + کیفیت}\right)}{\text{هزینه}\left(\text{کارکرد + کیفیت}\right)} \qquad (۱)$$

هدف اصلی از انجام فرایند مهندسی ارزش آن است که با استفاده از انجام یکسری گام‌های مشخص، نقطه تعادلی بین کیفیت، کارکرد و هزینه مشخص شود و شاخص ارزش را افزایش دهد [۸]. به‌این منظور در طی این فرایند کارکردهای کم‌ارزش، غیرضروری و پرهزینه شناسایی و حذف شده و با استفاده از خلاقیت گروهی و هم‌افزایی تیم مطالعه ارزش، برای کارکردهای پرهزینه، ضروری و با ارزش کم یا متوسط، راه‌های برآورده‌سازی کم هزینه‌تر و با کیفیت‌تر جایگزین می‌شود [۹]. متدولوژی مهندسی ارزش ارائه شده توسط صاحب نظرانِ مختلف، به‌ظاهر متفاوت است و طی فازهای مختلفی صورت می‌گیرد [۴]. اما این تفاوت در تعداد فازها، جنبه ظاهری دارد و فعالیت‌های ضروری و تقدم و تاخرشان در تمامی روش‌ها مشابه است. استاندارد انجمن بین‌المللی مهندسین ارزش[2] سه مرحه اصلی برای مهندسی ارزش بیان می‌کند. مراحل اصلی مهندسی ارزش بر اساس این استاندارد در شکل ۱ آمده است [۱۰ و ۱۱].

مرحله مطالعه ارزش شامل شش فاز است و دربرگیرنده فازهای عملیاتی پیاده‌سازی متدولوژی ارزش است و بهترین نتیجه زمانی حاصل می‌شود که فازهای این مرحله به‌ترتیب به‌کار گرفته شوند [۱۲]. فاز تحلیل کارکردهای محصول یکی از فازهای اصلی این مرحله مهندسی ارزش است که در این مقاله در مورد آن صحبت خواهد شد.

### ۱-۱-۲- معرفی روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول

روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول یکی از روش‌های تحلیل ریسک عملکرد صحیح محصول پیشنهاد شده توسط استاندارد ملی آمریکا می‌باشد [۵]. این روش، یک روش سیستماتیک برای شناسایی و پیشگیری از واماندگی محصولات و فرآیندها پیش از وقوع آن‌ها است که بر پیشگیری عیب‌ها، افزایش ایمنی و افزایش رضایت مشتری متمرکز است. طی انجام این روش، جستجو برای

1 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

2 Save Int.

**شکل ۱. مراحل اصلی مهندسی ارزش بر اساس استاندارد استاندارد انجمن بین‌المللی مهندسین ارزش**

**Fig. 1. The main stages of value engineering based on the SAVE int.**

**جدول ۱. ساختار جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول**

**Table1. Sample traditional FMEA table**

| ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۷ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| جزء محصول / کارکرد | واماندگی بالقوه | اثرات بالقوه واماندگی | شدت اثر (S) | علت‌های بالقوه خرابی | احتمال وقوع (O) | روش‌های جاری کنترل | روش‌های جاری کنترل | توان تشخیص (D) | عدد اولویت ریسک | اقدامات اصلاحی | مسئول اجراء و زمان | اقدامات انجام شده | S | O | D | RPN |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

تمامی راه‌هایی که می‌تواند منجر به شکست یا واماندگی یک محصول یا فرآیند شود انجام می‌پذیرد [۶]. روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول یک روش جدولی ارائه داده‌ها است. این بدان معناست که محتویات تحلیل‌ها بصورت بصری در سطرها و ستون‌های یکسری کاربرگ نمایش داده می‌شود. جدول ۱، نشان‌دهنده ساختار یک جدول تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول است [۱۳]. این جدول برای محصول مورد نظر با استفاده از جداول کمکی تعیین ضرایب موجود در استانداردهای مربوطه از جمله استاندارد ملی آمریکا [۵]، توسط گروه متخصص مربوطه کامل می‌شود. در ستون ۱۷ جدول حاصل‌ضرب اعداد ثبت‌شده در سه ستون شدت اثر، احتمال وقوع و تشخیص، محاسبه شده و به‌عنوان عدد اولویت ریسک واماندگی[1] برای جزء/کارکرد مربوطه ثبت می‌شود. این عدد بین یک تا هزار بوده و معیاری برای اولویت‌بندی حالت‌های واماندگی می‌باشد. در هر سازمان تولیدی یک سطح $RPN$ قابل قبول، براساس‌سیاست‌های آن سازمان تعریف می‌شود که در صورتی که در مورد یک جزء-کارکرد، $RPN$ بیش از سطح مجاز باشد باید یکسری اقدامات اصلاحی در طراحی توصیه شود. در ستون‌های بعدی جدول این اقدامات اصلاحی و مسئول پیاده‌سازی آن‌ها ذکر شده و مقادیر ضرایب بعد از پیاده‌سازی آن‌ها محاسبه‌شده و دوباره $RPN$ بدست می‌آید و این‌کار تا رسیدن $RPN$ به سطح مجاز ادامه می‌یابد.

### ۱-۲- مرور ادبیات تحقیق

همانطور که پیشتر بیان شد در این مقاله با هدف افزایش کارآمدی فاز تحلیل کارکردهای محصول که یکی از فازهای اصلی مرحله مطالعه ارزش از مراحل مهندسی ارزش می‌باشد، روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه داده شده‌است. لذا در این بخش ابتدا به مرور ادبیات تحقیق در بحث مهندسی ارزش پرداخته و پس از آن ادبیات تحقیق روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول بررسی می‌شود.

#### ۱-۲-۱- مهندسی ارزش

تحقیقات در زمینه مهندسی ارزش را می‌توان در چند گروه دسته‌بندی کرد:

##### ۱-۲-۱-۱- اجرای مهندسی ارزش برای یک محصول و یا در یک پروژه و بررسی نتایج حاصل از آن

سنای و نیازی [۱۴] به تشریح نحوه استفاده از مبانی مهندسی ارزش در پروژه‌های ساخت و ساز پرداخته و مزایای حاصله از آن را که هم به صورت کاهش هزینه‌ها و هم کاهش طول انجام

1 Risk Priority Number (RPN)

پروژه بوده است به صورت موردی در یک پروژه راه‌سازی مورد بررسی قرار داده‌است. تینگ جود و همکاران [۱۵] در مطالعه خود، ارتقاء پایداری سطوح شیبدار از طریق طراحی بهتر و کم هزینه‌تر زهکش‌های افقی با استفاده از مهندسی ارزش را دنبال کردند. استاسیاک بتلجوسکا [۱۶] به ارائه یافته‌های پژوهشی در مورد منافع اقتصادی حاصل از به‌کارگیری مهندسی ارزش در برنامه‌های توسعه بزرگراهی صنعت حمل و نقل آمریکا پرداخت. مصطفایی پور [۱۷] کار اصلاح طراحی یک دستگاه خنک کننده براساس‌نتایج حاصل از مهندسی ارزش را با هدف کاهش هزینه‌های غیر ضروری و افزایش کیفیت محصول ارائه کرد. فرایند مهندسی ارزش استفاده شده در این مطالعه هشت مرحله‌ای می‌باشد. هرالوا [۱۸] امکان‌پذیری به‌کارگیری‌مهندسی ارزش در انجام پروژه‌های ساخت بزرگراه را بررسی می‌کند. نویسنده معتقد است سه نقطه ضعف معمول در پروژه‌های راهسازی عبارتند از عدم دستیابی به اهداف مورد انتظار پروژه، عدم تحویل به‌موقع پروژه در بازه زمانی مورد قبول و عدم همراستایی هزینه‌های پروژه با محدوده بودجه اختصاص داده شده که مهندسی ارزش می‌تواند با تعدیل هزینه‌ها و اصلاح زمانبندی و محدوده پروژه از طریق ارائه راهکارهای جایگزین خلاقانه به حل این نقاط ضعف کمک نماید. البته این کاهش هزینه قابل توجه در هزینه پروژه و بهبود اجرای کارکردها زمانی قابل دستیابی است که مهندسی ارزش بصورت مناسب و به‌موقع اجرا شود. میلادی راد و یمینی [۱۹] در تحقیق خود مهندسی ارزش را به عنوان ابزاری کارآمد جهت غلبه بر چالش‌ها و پیچیدگی‌های موجود در پروژه‌های عمرانی، از ابتدای مطالعات تا پایان پروسه طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری بیان می‌کند و به معرفی مختصر مفهوم و روند اجرایی آن در این پروژه‌ها پرداخته و در ادامه به مقایسه روش‌های ارزیابی کارکردهای پروژه رایج با مهندسی ارزش می‌پردازد. نالوسامی و همکاران [۲۰] به‌صورت موردی روی یک پمپ تک بلوک مهندسی ارزش را پیاده‌سازی نمودند و نتایج حاصل از آن در بهبود طراحی و کاهش هزینه‌ها را ارزیابی کردند. در طی این فرایند سه جزء از اجزاء پمپ در فاز خلاقیت مورد بازنگری قرار گرفت و با اعمال تغییرات به‌نحوی که کیفیت و کارکرد محصول قربانی نشود، حدود بیست و پنج درصد کاهش هزینه حاصل شد.

### ۱-۲-۱-۲- ارائه روش‌های نوآورانه جهت ارتقاء و بهبود پیاده‌سازی فازهای مختلف مهندسی ارزش

موفقیت کارگروه مهندسی ارزش وابسته به فاکتورهای به‌هم وابسته زیادی است که معمولاً همه آن‌ها مورد توجه تیم مهندسی ارزش قرار نمی‌گیرند. تانگ چن و همکاران [۲۱] با تحلیل پرسشنامه‌های توزیع شده بین افراد متخصص و باتجربه در زمینه مهندسی ارزش و تحلیل آن‌ها با استفاده از روش تحلیل فاکتورها و فرایند تحلیل سلسله مراتبی فاکتورها[1] به ارائه یک مدل ارزیاب عملکرد کارگروه مهندسی ارزش می‌پردازد و مدل ارائه شده برای ارزیابی عملکرد دو کارگروه مهندسی ارزش در دو پروژه ساخت و ساز به‌کار گرفته‌شد. زرندی و همکاران [۲۲] یک سیستم استدلال مبتنی بر مورد[2] فازی برای استفاده در فاز خلاقیت مهندسی ارزش ارائه نمودند که هدف آن کمک به متخصصین تیم مهندسی ارزش برای استفاده از تجربیات گذشته و اجتناب از تکرار تجربیات در محدوده خاص بوده است. بنکه و همکاران [۲۳] مدلی برای مهندسی ارزش یکپارچه ارائه نمودند. مدل آن‌ها با لحاظ‌کردن فرایندهای ساخت و همچنین شبکه‌های زنجیره تأمین در مهندسی ارزش توسعه داده شده است. چراکه از نظر آن‌ها عوامل درگیر در فرایند تولید و زنجیره تأمین بر نسبت منفعت بر هزینه محصول اثرگذار است و پارامترهای مربوطه برای ارتقاء ارزش محصول باید مورد توجه قرارگیرند. بوک و پوتز [۲۴] یک شیوه جدید کنترل کیفیت‌گرا برای مهندسی ارزش ارائه نمودند. این شیوه بر مبنای هزینه هدف و قیمت هدف، برنامه کیفیت اجزاء اصلی محصول مربوطه و مرحله تولیدی مربوطه را معین می‌کند.

### ۱-۲-۲- روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول

با بررسی مطالعات انجام شده در زمینه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول، می‌توان آن‌ها را در چند گروه دسته‌بندی نمود:

#### ۱-۲-۲-۱- استفاده از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول برای تحلیل ریسک واماندگی محصولی خاص

وزدانی و همکاران [۲۵] در این مقاله با استفاده از مزایای

1 Analytic Hierarchy Process (AHP)
2 Case Based Reasoning (CBR)

تکنیک‌های فرایند تحلیل سلسله مراتبی، روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و روش دلفی برای شناسایی و ارزیابی ریسک‌های زیست محیطی مخازن ذخیره‌سازی میعانات گازی استفاده کردند. مخاطرات یا ریسک‌های شناسایی شده با کمک فرایند تحلیل سلسله مراتبی وزن دهی و سپس با استفاده از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول مورد ارزیابی و اولویت بندی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از مخازن ذخیره سازی نشان داد که ریسک آتش سوزی بر اثر حملات تروریستی و رعد و برق و استنشاق بخارات حین تعمیرات در رده بالای ریسک قرار گرفته و به منظور کاهش وقوع و اثرات ریسک‌ها راهکارهای اصلاحی پیشنهاد گردید. روانستان و همکاران [۲۶] در تحقیق خود به مطالعه و بررسی زنجیره تأمین تاب آور شرکت ایرانخودرو پرداختند. هدف این تحقیق ارتقای تاب آوری‌زنجیره تأمین ایران خودرو درمقابل آشفتگی‌های محیطی می‌باشد. به همین منظور استراتژی‌هایی که بتواند از وقوع توقفات درخطوط تولید ایران خودرو جلوگیری کرده و یا در صورت توقف، با کمترین زمان ممکن به حالت قبل از شکست یا مطلوبتر از آن بازیابی شود، تعیین شدند و روابط علت و معلولی بین این استراتژی‌ها نیز مشخص شدند. در این تحقیق کلیه حالات شکست که پتانسیل توقف خطوط تولید ایران خودرو را دارند (۱۲حالت شکست) ازطریق تئوری تحقیق و نظرات خبرگان شناسایی شده‌است. جامعه آماری این تحقیق مدیران وکارشناسان واحدهای لجستیک و برنامه ریزی شرکت ساپکو بوده‌است. در این تحقیق از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول برای تعیین استراتژی‌های تاب آوری در زنجیره تأمین قبل از بروز شکست و تکنیک جدید تحلیل شکست پس از وقوع[1] برای تعیین استراتژی‌های تاب آوری زنجیره تأمین بعد از وقوع شکست استفاده شده‌است. بعلاوه جهت تأثیرات متقابل بین آن‌ها مشخص شدند. خبرگان از طریق روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول چهار حالت شکست را که دارای بیشترین نمره اولویت ریسک بوده‌اند، را انتخاب و تعداد۲۱ استراتژی برای تاب آور ساختن زنجیره تأمین ایرانخودرو برای مقابله با این حالات شکست معرفی کردند. از طریق تکنیک تحلیل شکست پس از وقوع نیز تعداد۶ استراتژی جهت تاب‌آور ساختن زنجیره تأمین نسبت به شکست تعیین شدند. تشرعی و همکاران ]۲۷[ در پژوهش خود به شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های بالقوه بخش مراقبت‌های ویژه بخش جراحی قلب باز و پیشنهاد روش‌هایی برای حذف یا کاهش آن‌ها با استفاده از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول پرداخته‌اند. به علاوه برای رسیدن به نتایجی دقیق‌تر، از روش‌های تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول فازی و تکنیک رتبه‌بندی اولویت‌ها براساس شباهت به راهکار ایده‌آل فازی نیز استفاده شده و نتایج به‌دست آمده از این سه روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. رویکرد پیشنهادی مقاله در بخش مراقبت‌های ویژه قلب باز بیمارستان کوثر سمنان اجرایی شد و در نهایت ۱۹ عامل به عنوان اصلی‌ترین عوامل خطر شناسایی شده و برای تمامی عوامل خطر شناسایی شده راهکارهایی نیز تعیین شد تا باتوجه به اولویت‌های تعیین شده پیگیری شوند. ویسی و همکاران [۲۸] در پژوهش خود با توجه به حجم وسیع کاربرد فرآیندهای ماشین‌کاری با ماشین‌های کنترل عددی در صنایع قطعه‌سازی، به شناسایی و اولویت‌بندی عوامل شکست اجزای مکانیکی ماشین کنترل عددی که موجب وقفه در عملکرد آن می‌شوند با استفاده از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصولدر دو حالت مرسوم و فازی برای ارزیابی ریسک اجزای مکانیکی ماشین کنترل عددی تراش پرداخته و نتایج آن را مقایسه کردند. طبق نظرات کارشناسان برای اجزای مکانیکی ماشین کنترل عددی تراش در مجموع ۷ سیستم مهم و ۳۰ زیر سیستم وجود دارد که حالت‌های خرابی عمدتاً در آن‌ها اتفاق می‌افتد. پس از ارزیابی مشخص شد که ۲ سیستم اجزای محور و روان‌کاری حالت‌های خرابی‌شان در اولویت اول برای اقدامات کنترلی و اصلاحی قرار دارد .نتایج نشان داد رتبه‌بندی دقیق‌تر در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول فازی موجب بهبود اولویت‌بندی شده و در نتیجه بستر مناسب‌تری برای برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات فراهم می‌کند. ستوده [۲۹] یک روش عملی جهت استفاده از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول برای شیرهای توپی خط لوله صادرات نفت ارائه داد. او از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول برای تجزیه و تحلیل حالت‌های خرابی مربوط به چهار جزء شیرهای خط لوله، یعنی مقر، بدنه، توپ و محرک استفاده کرد. بدین ترتیب پنج خرابی محتمل مرتبط با شیرهای توپی خط لوله را شناسایی و شدت اثر و احتمال وقوع هریک تعریف کرده و به هر خرابی احتمالی اختصاص داد و برای هر حالت شکست، عدد اولویت ریسک محاسبه کرد. بر این اساس دو

1 Failure Analysis After Occurrence (FAAO)

مورد بحرانی با ریسک خطر بالا را شناسایی و راه حل‌هایی برای به حداقل رساندن خطر واماندگی آن‌ها کرد. ماسیا و همکاران [۳۰] به تشریح این که چگونه می‌توان روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول را به عنوان ابزاری برای بهبود عملکرد در زمینه تحقیقات غیرمنظم، بخصوص در یک فرآیند تحقیق علوم زیستی پایه به‌کار برد، پرداختند. در این مقاله، آن‌ها روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول را در یک فرآیند آزمایشی خاص در علوم زیستی، یعنی انتخاب آپتامرها که یک فرایند چند مرحله‌ای، شامل چندین رویه، تجهیزات و مهارت‌های انسانی است به‌کار بردند. آن‌ها همچنین ابزاری مفید جهت ارزیابی ریسک فرآیندهای تحقیقاتی و خروجی آن‌ها به نام کاربرگ نواریروش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول ارائه دادند. این ابزارها می‌توانند به دانشمندانی که در تحقیقات غیرمنظم کار می‌کنند، جهت نیل به مدیریت کیفیت و ارزیابی ریسک روش‌ها و فرآیندهای علمی کلیدی با هدف نهایی افزایش و کنترل بهتر کارایی و اثر بخشی تحقیقاتشان کمک کند.

### ۱-۲-۲-۲- ارائه روشی جدید برای اولویت‌بندی ریسک واماندگی

براگلیا و همکاران [۳۱] یک روش چند شاخصه شبیه به تکنیک رتبه‌بندی اولویت‌ها براساس شباهت به راهکار ایده‌آل[1] برای روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول ارائه کرده‌اند. گارسیا و همکاران [۳۲] یک روش تحلیل پوششی داده‌ها بصورت فازی برای روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول پیشنهاد کردند. در این روش فاکتورهای رایج ارزیابی ریسک واماندگی، یعنی $O$، $S$ و $D$ به صورت مجموعه‌های فازی مدل می‌شوند و از مدل احتمال تحلیل پوششی داده‌های فازی برای مشخص کردن شاخص‌ها در حالت‌های واماندگی استفاده می‌شود. چین و همکاران [۳۳] یک روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول بر مبنای تحلیل پوششی داده‌ها پیشنهاد کردند که در آن وزن اهمیت نسبی فاکتورهای ریسک را نیز در محاسبات و رتبه بندی دخالت می‌داد. بارندز و همکاران [۳۴] در تحقیق خود با جایگزین کردن فراوانی نسبی تخمینی برای تعیین مقدار ضریب نرخ وقوع[2]، $O$، و ضریب تشخیص[3]، $D$، به جای مقادیر قطعی در محاسبه $RPN$، به ارائه نوع اصلاح‌شده احتمالاتی روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول[4] اقدام نموده‌اند. در این روش ضریب شدت اثر[5]، S، همچنان بصورت قطعی و براساس جداول موجود در استانداردهای مربوطه تعیین می‌شود. براساس مطالعه آن‌ها استفاده از این روش درک نتایج حاصل از تحلیل ریسک را بهبود می‌دهد. کوتلو و اکمکسیوگلو [۳۵] یک روش فازی را که با یکپارچه‌سازی تکنیک رتبه‌بندی اولویت‌ها براساس شباهت به راهکار ایده‌آل فازی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی[6] فازی، که امکان استفاده از متغیرهای زبان شناختی برای تعیین مقادیر پارامترهای روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول را می‌دهد، بررسی کردند. ساتریسنوا و همکاران [۳۶] با الگوگیری از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول، مدلی را برای محاسبه هزینه نگهداری ارائه می‌کنند و مشابه عدد اولویت ریسک، عدد اولویت هزینه نگهداری را تعریف می‌نمایند. ثابت مطلق و همکاران [۳۷] در مقاله خود با ترکیب روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و روش‌های تصمیم گیری چند شاخصه تلاش کرده‌اند روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول را بهبود دهند. بدین منظور ابتدا بااستفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی برای هر کدام از سه شاخص شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص، وزنی تعیین شد. از آن‌جایی که تصمیم گیرندگان در بیشتر مواقع با شرایط مبهم مواجه می‌شوند که تعیین نسبت‌ها بر مبنای استاندارد برای آن‌ها مشکل است، به همین منظور از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی در محیط فازی استفاده شد تا ترجیحات خبرگان را به صورت کارآمدتری در نظر گیرد. پس از تعیین وزن شاخصهای شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص، با استفاده از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول تعدیل شده، حالت‌های شکست یا خرابی رتبه‌بندی شد. آن‌ها معتقدند این روش به تیم ارزیابی کمک می‌کند تا در مواقعی که دو یا چند حالت شکست دارای نمره اولویت یکسانی هستند بتوانند بدون اختلاف نظر حالت‌های شکست را ارزیابی نمایند.

آنچه در این تحقیق مدنظراست، تشریح نحوه توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول، که در استانداردهایی مانند استاندارد ملی ایالات متحده معرفی‌شده، با استفاده از اصول مهندسی ارزش جهت اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول می‌باشد.

1 Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
2 Occurrence
3 Detection
4 Modified Probabilistic FMEA
5 Severity
6 Analytic Hierarchy Process (AHP)

لذا هدف این مقاله حل مشکلات استفاده از $RPN$ متداول برای اولویت بندی ریسک کارکردهای محصول نبوده‌است. بلکه با استفاده از چارچوب کلاسیکروش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول ، به دنبال تشریح مفهوم اساسی موردنظر این پژوهش می‌باشد. بررسی توسعه سایر تکنیک‌های اولویت‌بندی ریسک واماندگی محصول که در چنین تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته‌است با استفاده ازمفاهیم مهندسی ارزش می‌تواند به عنوان موضوعات پژوهشی پیش‌رو مورد توجه قرار گیرد.

### ۱-۲-۲-۳- توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول از طریق ترکیب آن با سایر روش‌های مورد استفاده در طراحی و افزایش کیفیت جهت ایجاد مزیت‌ها و قابلیت‌های جدید

توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول و ترکیب آن با سایر روش‌ها و تکنیک‌ها موضوعی است که در تعدادی از مطالعات به آن پرداخته شده‌است. در هرکدام از این مطالعات هدف از توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول دستیابی به مزیت‌ها و قابلیت‌های جدید بوده‌است. از این میان می‌توان به تحقیقاتی در مورد ترکیب روش‌های تحلیل درخت نقص[1] و تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول اشاره کرد. از آنجا که پیاده‌سازی کامل هریک از آن‌ها روی یک محصول بسیار زمان‌بر است، در هریک از این مطالعات، روشی ترکیبی ارائه شده تا با صرف زمان کمتر تحلیل ریسک انجام شود. بلوباند و همکاران [۳۸] نیز با ترکیب روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و تحلیل درخت نقص، چارچوب جدیدی بنام تحلیل واماندگی قدرتمند[2] ارائه نمودند. یو و همکاران [۳۹] یک روش ترکیبی از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و تحلیل درخت نقص ارائه کردند که در آن روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسط تحلیل درخت نقص هدایت می‌شود. هان و ژانگ [۴۰] روش جدید برای تحلیل ایمنی نرم افزارهای حیاتی و مهم با ترکیب دو روش یاد شده ارائه کردند. پیترز و همکاران [۴۱] در روش پیشنهادی خود، با اجرای بخش‌هایی از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول که یک روش تحلیل ریسک پایین به بالا است و تحلیل درخت نقص که یک روش تحلیل بالا به پایین است بصورت ترکیبی و بازگشتی، روشی ساختارمند جهت تحلیل ریسک با صرف زمان کمتر ارائه کرده‌اند.

همچنین مواردی از مطالعات در زمینه ترکیب روش‌هایتحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و گسترش تابع کیفیت[3] وجود دارد. حسن و همکاران [۴۲] با ترکیب روش گسترش تابع کیفیت، روش هزینه‌یابی بر مبنای فعالیت[4]و روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول، یک روش تحلیل واماندگی توسعه‌یافته بنام روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول برمبنای هزینه[5] ارائه کردند که برای تخمین هزینه طراحی فرایند[6]حین یک طراحی فرایند مفهومی[7] که نقش مهمی در تعیین قابلیت تولید و هزینه طراحی مفهومی یک محصول در مراحل اولیه تولید آن دارد، استفاده می‌شود. جیوئو و همکاران [۴۳] در تحقیقی بیان می‌کنند که با ترکیب روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و روش گسترش تابع کیفیت به‌عنوان روش‌های رایج در تکنولوژی مهندسی کیفیت می‌توان برخی محدودیت‌های هریک از آن‌ها را پوشش داده و به شیوه جدیدی در کنترل کیفیت دست‌یافت. آن‌ها روش پیشنهادی خود را برای شناسایی اهمیت ارکان مؤثر بر نصب محور در صنایع کشتی‌سازی جهت کنترل کیفیت آن بکار گرفتند. گو و همکاران [۴۴] در تحقیق خود یک روش رتبه بندی ریسک واماندگی برمبنای تکنیک مرتب‌سازی رتبه براساس شباهت به پاسخ ایده‌آل به منظور فراهم سازی امکان محاسبه فازی عدد اولویت ریسک در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول پیشنهاد کردند. در این مقاله یک مدل تجزیه و تحلیل یکپارچه بر اساس روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و روش گسترش تابع کیفیت پیشنهاد شد تا تعامل بین حالت‌های مختلف شکست ومیزان رضایت مشتری را به طور کامل در نظر بگیرد در این مقاله سازگاری و مکمل بودن روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و روش گسترش تابع کیفیت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و مدل یکپارچه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و روش گسترش تابع کیفیت ایجاد شده‌است. در این روش، میزان اهمیت ویژگی‌های فنی محصول استخراج شده از فاز اول روش گسترش تابع کیفیت، به ضریب تصحیح ارزیابی کارکردها در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول تبدیل می‌شود تا

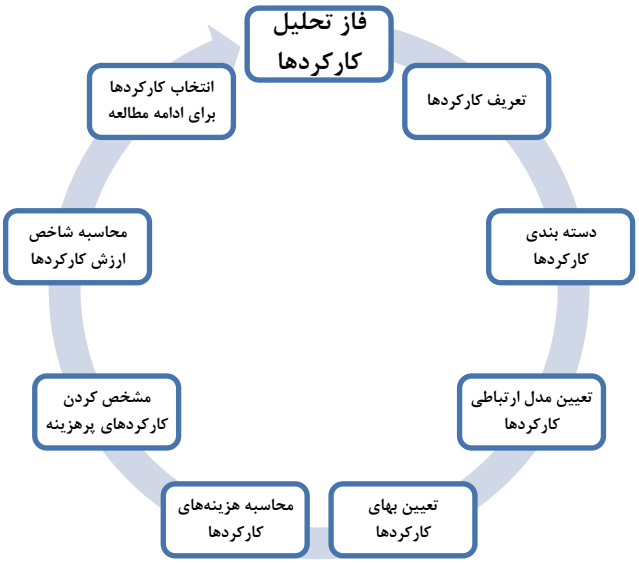
1 Fault Tree Analysis (FTA)
2 Bouncing Failure Analysis (BFA)
3 Quality Function Deployment (QFD)
4 Activity-Based Costing (ABC)
5 Cost-Based FMEA
6 Process Planning (PP)
7 Conceptual Process Planning (CPP)

میزان مضربودن نسبی هر حالت شکست به دست آید. این روش کمک می‌کند تا الزامات مشتری و ویژگی‌های فنی به عنوان پایه‌ای برای قضاوت در مورد اولویت‌های بهبود حالات شکست استفاده شود. در مقایسه با تحقیق حاضر، در این مقاله اهمیت آیتم‌ها را در برآوردن نیازهای مشتری با کمک روش گسترش تابع کیفیت بصورت ضریبی در $RPN$ اعمال می‌کند. درحالیکه ما با کمک روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول، ریسک واماندگی هر فانکشن را در محاسبه بهای واقعی هر کارکرد در مهندسی ارزش اعمال کرده تا بخش پنهان ولی اثر گذار بر بهای کارکردها از منظر مشتری، در تعیین بهای واقعی آن‌ها آشکارسازی شود.

سوا و همکاران [۴۵] در تحقیق خود، عواملی را که مسئول تأخیر در روند کار بالینی پرتودرمانی هستند با استفاده از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول شناسایی و ارزیابی کردند. آن‌ها با معرفی دو عامل جدید، یعنی اثر اجتماعی و اثر اقتصادی در رتبه‌بندی براساس $RPN$ برای ارزیابی حالتهای خرابی، مفهوم جدیدی به نام $RPN_SE\text{-}EE$ ارائه دادند. منظور از $SE$ ضریب تأثیر بر حسن شهرت بیمارستان و منظور از $EE$ ضریب تأثیر بر درآمد بیمارستان است. آن‌ها ادعا کردند که بررسی همزمان $RPN$ و مفهوم پیشنهادی جدید $RPN_SE\text{-}EE$ می‌تواند به طور کلی عملکرد روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول در تحلیل ریسک فرایند پرتودرمانی یا مراقبت‌های بهداشتی را بهبود دهد. سوبریادی و همکاران [۴۶] پایداری هردو روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول و توسعه‌یافته را در ارزیابی ریسک فناوری اطلاعات بررسی کردند.روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی آن‌ها دارای چهار مرحله اصلی شامل تعیین الزامات ارزیابی ریسک (شناسایی زمینه، شناسایی فرآیند، تشکیل تیم پیاده‌سازی، تعیین روش‌های ارزیابی و آموزش)، شناسایی ریسک (شناسایی واماندگی‌های محتمل با طوفان فکری، تشکیل لیست ثبت ریسک)، تجزیه و تحلیل ریسک، و ارزیابی (ارزیابی ریسک هر پارامتر، محاسبه $RPN$، اولویت بندی ریسک و توصیه‌های کنترلی) بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که سازگاری روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول بهبود یافته آن‌ها نسبت به روش متداول بیشتر است.

میکالاکودیس و همکاران [۴۷] در تحقیق خود یک متدولوژی برای اجرای همزمان روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و مهندسی ارزش ارائه و ادعا کردند که این رویکرد جدید می‌تواند کارایی منابع و اثربخشی هر دو فرآیند را به طور قابل توجهی افزایش دهد. در این مقاله با توجه به اینکه هر دو روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و مهندسی ارزش، شامل تجزیه و تحلیل کارکردهای محصول و اهمیت آن‌ها برای کاربر نهایی آن است، یک فرایند واحد با خروجی دوگانه پیشنهاد شده‌است: یکی شناسایی جزء/کارکردهای پرخطر (بالاترین مقادیر $RPN$) برای اهداف بهبود قابلیت اطمینان و دیگری مشخص کردن اجزاء بیش ایمن (پایین‌ترین مقادیر $RPN$) که می‌تواند آن‌ها افت کیفیت دهد تا هزینه را کم کند. همان طور که مشخص است در این مقاله محوریت تصمیم گیری در مورد ارزش کارکردها صرفاً بحث ریسک واماندگی آن‌ها است و از ریسک واماندگی بعنوان معیاری جهت تعیین شاخص ارزش کارکردها استفاده شده و نظر مشتری در تعیین بهای کارکردها نادیده گرفته شده‌است. در حالیکه در مقاله حاضر ریسک واماندگی کارکردها تنها بعنوان یکی از عوامل مؤثر بربهاء و پنهان از منظر مشتری آشکارسازی و در تصمیم مشتری در تعیین بهای آن‌ها دخالت داده می‌شود و محوریت با تصمیم مشتری است. همچنین دراین مقاله تفاوتی بین کارکردهای پرهزینه و کم هزینه برای اختصاص منابع فاز خلاقیت درنظر گرفته نشده‌است که این موضوع نیز در مقاله حاضر مورد توجه قرار گرفته‌است.

در مقاله حاضر چارچوبی جهت اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصولِ مهندسی ارزش در بستر روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول ارائه‌شده‌است. پرسش مهمی که می‌تواند مطرح شود این است که چارچوب ارائه شده در این مقاله چه مزیت و قابلیت جدیدی به همراه می‌آورد. مهندسی ارزش در تمام مراحل یک پروژه قابل اجرا است، اما تأخیر در انجام آن فرصت‌های بالقوه برای ایجاد تغییرات را کاهش می‌دهد. لذا میزان صرفه‌جویی حاصل از اجرای مهندسی ارزش با پیشرفت فازهای عملیاتی پروژه و یا طراحی و ساخت محصول کاهش می‌یابد. لذا بهترین زمان برای اجرای آن در مراحل اولیه طراحی محصول است. از طرفی پیاده‌سازی روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول نیز بیشتر در زمان طراحی محصول انجام می‌شود تا با کمترین مقدار هزینه، اصلاحات لازم در طراحی محصول اِعمال‌شده و ریسک واماندگی کاهش یابد. یکی از مزیت‌های استفاده از چارچوب ارائه شده در این مقاله اینست که با




**شکل ۲. اقدامات لازم در فاز تحلیل کارکردها**

**Fig. 2. Necessary actions in the function analysis phase**

توجه به متقارن بودن زمان مناسب برای اجرای روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و زمان مناسب برای پیاده‌سازی مهندسی ارزش، بخشی از کار تحلیل واماندگی محصول و پیاده‌سازی مهندسی ارزش را تجمیع می‌کند که این امر سبب کاهش کار موازی و درنتیجه صرفه‌جویی در زمان و هزینه و افزایش سرعت توسعه محصول جدید و ارائه آن به بازار می‌شود. علاوه بر این، روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه یافته پیشنهادی این مقاله، ضمن اجرای گام به گام و قاعده‌مند فرآیند تحلیل کارکردها، مزیت مهمی را فراهم می‌کند و آن آشکارسازی یکی از عوامل پنهان تاثیرگذار بر ارزش کارکردهای محصول است. در این روش ریسک واماندگی کارکردهای محصول آشکارسازی و در محاسبه ارزش واقعی آن‌ها و شناسایی کارکردهای کم ارزش محصول برای معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش دخالت داده می‌شود.

## ۲- توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول برای اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول در مهندسی ارزش

یکی از فازهای اصلی مهندسی ارزش، فاز تحیل کارکردهای محصول مورد نظر است. شکل ۲، اقدامات لازم در فاز تحلیل کارکردها را نشان می‌دهد.

این اقدامات به‌روش‌های مختلفی می‌تواند انجام شود. چیزی که در این بخش ارائه می‌شود توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول به‌منظور انجام فاز تحلیل کارکردهای محصول است. مجموعه اقدامات و اهداف فاز تحلیل کارکردها با استفاده از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی به شیوه‌ای قاعده‌مند انجام‌پذیر است. علاوه بر این، استفاده از این چارچوب مزیت‌هایی را نیز به‌همراه می‌آورد. مزیت اول عبارت است از تجمیع بخش مهمی از فرآیند تحلیل ریسک واماندگی محصول و فاز تحلیل کارکردهای مهندسی ارزش، که این امر کاهش هزینه و زمان توسعه محصول را به‌دنبال دارد. اما مهم‌ترین مزیت آن عبارتست از آشکارسازی یکی از پارامترهای بسیار مهم در تعیین بهای واقعی کارکردهای محصول که اِعمال آن در تخمین بهای کارکردها به دلیل ملموس نبودن برای مصرف‌کننده، امری دشوار است. این پارامتر که همان ریسک واماندگی است، در تعیین بهای کل محصول از منظر مشتری اعمال می‌شود. چراکه این مفهوم برای مشتری در مورد کل محصول قابل درک است. اما وقتی بررسی بهای تک‌تک کارکردهای محصول، جهت ارتقاء بهای کل محصول مورد نظر است، نادیده گرفته می‌شود. این موضوع باعث می‌شود نتیجه‌ی مورد انتظار از تجمیع بهبود ارزش کارکردهای کم‌ارزش، بر ارزش کلی محصول حاصل نشود. چراکه یکی از پارامترهای مهم در تعیین بهای محصول، در تعیین بهای کارکردها نادیده گرفته شده‌است. این امر در چارچوب پیشنهادی این مقاله برای اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول، مورد توجه قرار می‌گیرد. با استفاده از چارچوب ارائه شده، این پارامتر

قابل رویت شده و در محاسبه بهای واقعی کارکردهای محصول اِعمال و از بهای واقعی آن‌ها، برای شناسایی کارکردهای کم ارزش محصول جهت معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش استفاده می‌شود.

### ۲-۱- ساختار جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته موردنظر

ستون‌های جدیدی که در این روش به جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول اضافه شده‌است عبارتند از:

• ضریب نوع کارکرد[1]:

کارکردهایی که یک محصول ارائه می‌کند در دسته‌های مختلفی جای می‌گیرند. ضروریست تیم پیاده‌سازی با بررسی دقیق کارکردها، نوع آن‌ها را مشخص نموده و با استفاده از جدول کمکی مربوطه این ستون را کامل کند.

• ضریب بهای کارکرد مورد نظر از نگاه مشتری[2] ($FW$):

با استفاده از یک جدول کمکی که نمونه‌ای از آن در ادامه می‌آید، متناسب با میزان هزینه‌ی قابل قبول برای کارکرد موردنظر از دیدگاه مصرف‌کننده، ضریبی به‌این ستون اختصاص می‌یابد.

• ضریب هزینه ایجاد کارکرد مورد نظر در محصول توسط تولیدکننده[3] ($FC$):

متناسب با هزینه ایجاد کارکرد مورد نظر توسط تولید کننده و با کمک جدولی که نمونه‌ای از آن ارائه خواهدشد، ضریبی در این ستون ثبت می‌شود.

• ضریب ریسک واماندگی کارکرد[4] ($FFR$):

با استفاده از جدول کمکی که در ادامه خواهد آمد متناسب با مقدار $RPN$ هر کارکرد، ضریبی برای اصلاح بهای کارکرد از نگاه مصرف کننده تعیین و در این ستون قرار می‌گیرد.

• ضریب بهای تعدیل‌شده کارکرد[5] ($FMW$):

همانطور که پیشتر بیان شد در تعیین بهای کارکردها از نگاه مصرف‌کننده، یکی از پارامترهای مهم که همان ریسک واماندگی محصول است در نظر گرفته نمی‌شود. چراکه قابلیت اطمینان خود محصول برای مصرف کننده ممکن است ملموس باشد ولی ریسک واماندگی تک‌تک کارکردها برای مصرف‌کننده قابل لمس نیست. از طرفی بهای تعیین شده در مورد هر کارکرد در فاز تحلیل کارکردها نقش مهمی در ادامه فرآیند مهندسی ارزش و نتیجه حاصله نهایی در افزایش ارزش محصول خواهد داشت، لذا باید سعی شود بهای تعیین شده توسط مصرف‌کننده تا حد امکان تعدیل شده و به بهای واقعی نزدیک شود. به‌همین منظور یکی از ستون‌های جدول به شاخص بهای تعدیل شده کارکردها اختصاص می‌یابد.

مقدار این ستون برای هر سطر بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$FMW = FW \times FFR \qquad (۲)$$

• شاخص ارزش تعدیل شده کارکرد[6] ($MVI$):

با استفاده از شاخص‌های بهای تعدیل‌شده کارکرد و هزینه کارکرد، پارامتری محاسبه می‌شود که بعنوان شاخص ارزش تعدیل شده، برای تصمیم‌گیری در مورد چگونگی ادامه مطالعه ارزش برای کارکرد مربوطه قابل استفاده است.

$$MVI = FMW \times FC \qquad (۳)$$

لازم است برای $MVI$ یک حد آستانه براساس سیاست‌های شرکت سازنده و برای استفاده در مراحل بعدی تعریف شود. جدول ۲ ساختار جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه یافته مورد نظر را نشان می‌دهد. برای تکمیل ستون‌های جدید باید از جداول تعیین ضرایب کمک گرفت. این ضرایب ممکن است به‌صورت‌های متفاوتی قابل تعریف باشند که در ادامه نمونه‌ای از آن ارائه می‌شود. جداول ضرایب و مقیاس‌های ارائه شده یک نقطه آغازین خوب برای این روش است و ستون‌های کاربرگ روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و مقیاس‌های رتبه بندی ریسک باید برای هر محصول و شرکتی مناسب سازی شود.

1 Function Type(FT)
2 Function Worth (FW)
3 Function Cost (FC)
4 Function Failure Risk (FFR)
5 Function Modified Worth (FMW)
6 Modified Value Index (MVI)

**جدول ۲. ساختار جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته موردنظر**
**Table 2. Sample table of the proposed improved FMEA**

| جزء محصول/کارکرد | واماندگی بالقوه | اثرات بالقوه واماندگی | شدت اثر (*S*) | علت‌های بالقوه خرابی | احتمال وقوع (*O*) | روش‌های جاری کنترل و تشخیص | توان تشخیص (*D*) | RPN | نوع کارکرد (*FT*) | هزینه ایجاد کارکرد برای تولید کننده (*FC*) | بهای کارکرد از نظر مشتری (*FW*) | ریسک واماندگی کارکرد (*FFR*) | بهای تعدیل شده کارکرد (*FMW*) | شاخص ارزش تعدیل شده (*MVI*) | پیشنهادهای اصلاحی | *S* (جدید) | *O* (جدید) | *D* (جدید) | *RPN* (جدید) | *MVI* (جدید) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

**جدول ۳. جدول کمکی تعیین ضریب نوع کارکرد (*FT*) متناسب با نوع کارکرد**
**Table 3. Suggested function type coefficient (*FT*)**

| ضریب نوع کارکرد (*FT*) | نوع کارکرد |
|---|---|
| ۱ | اصلی |
| ۱ | اجباری یا قانونی |
| ۱ | کارکردهای زمینه ساز یا پشتیبان کارکردهای اصلی و |
| ۰ | سایر کارکردها |

## ۲-۲- چگونگی تکمیل و به‌کارگیری روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی برای استفاده در فاز تحلیل کارکرد محصول

برای کامل کردن جدول فوق ابتدا ستون‌های جدول روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول تا محاسبه *RPN* برای هر سطر کامل می‌شود. جدول ۳، جدول کمکی تعیین ضریب نوع کارکرد (*FT*) متناسب با نوع کارکردهای اجزاء محصول است. تیم اجرای مهندسی ارزش پس از بررسی دقیق کارکردها و تعیین نوع آن‌ها و یافتن وابستگی بین کارکردهای اصلی و اجباری با سایر انواع کارکردها، با استفاده از این جدول ضریب متناسب را انتخاب و در سطر و ستون مربوطه قرار می‌هند.

پس از تخمین بهای هریک از کارکردها به صورت درصدی از هزینه تولید محصول توسط تیم اجرای مهندسی ارزش و با استفاده از جدول ۴، ستون *FW* جدول کامل می‌شود.

پس از آن با استفاده از جدول ۵ و تخمین هزینه هر کارکرد بصورت درصدی از هزینه تولید محصول، جاگذاری ضرایب مربوطه در ستون *FC* از جدول انجام می‌شود.

با استفاده از *RPN* محاسبه‌شده برای هر جزء-کارکرد، با استفاده از جدول ۶ و همچنین با توجه به مقدار آستانه *RPN* تعریف شده توسط شرکت سازنده، ستون *FFR* در جدول کامل می‌شود. لازم به‌ذکر است اگر برای هر جزء-کارکرد بیش از یک *RPN* در جدول وجود داشته‌باشد، *RPN* بزرگ‌تر برای آن جزء-کارکرد در نظر گرفته می‌شود.

سپس سطرهای جدول براساس مقدار *FC* و بصورت صعودی مرتب می‌شوند. طبق قانون پارتو هشتاد درصد هزینه‌های یک محصول صرف برآورده‌سازی بیست درصد کارکردها می‌شود. این قانون که به قانون هشتاد - بیست نیز معروف است توسط آلفردو پارتو[1] مطرح

1 Alfredo Pareto (1843-1923)

جدول ۴. جدول کمکی تعیین ضریب بهای کارکرد (*FW*)

**Table 4. Suggested function worth coefficient (*FW*)**

| ضریب بهای کارکرد (*FW*) | بهای کارکرد (درصد از هزینه تولید محصول) |
|---|---|
| ۱ | ۰ تا ۹/۹۹ |
| ۲ | ۱۰ تا ۱۹/۹۹ |
| ۳ | ۲۰ تا ۲۹/۹۹ |
| ۴ | ۳۰ تا ۳۹/۹۹ |
| ۵ | ۴۰ تا ۴۹/۹۹ |
| ۶ | ۵۰ تا ۵۹/۹۹ |
| ۷ | ۶۰ تا ۶۹/۹۹ |
| ۸ | ۷۰ تا ۷۹/۹۹ |
| ۹ | ۸۰ تا ۸۹/۹۹ |
| ۱۰ | ۹۰ به بالا |

جدول ۵. جدول کمکی تعیین ضریب هزینه کارکرد (*FC*)

**Table 5. Suggested function cost coefficient (*FC*)**

| ضریب هزینه کارکرد (*FC*) | هزینه کارکرد (درصد از هزینه تولید محصول) |
|---|---|
| ۱ | ۰ تا ۹/۹۹ |
| ۰/۵ | ۱۰ تا ۱۹/۹۹ |
| ۰/۳۳ | ۲۰ تا ۲۹/۹۹ |
| ۰/۲۵ | ۳۰ تا ۳۹/۹۹ |
| ۰/۲ | ۴۰ تا ۴۹/۹۹ |
| ۰/۱۷ | ۵۰ تا ۵۹/۹۹ |
| ۰/۱۴ | ۶۰ تا ۶۹/۹۹ |
| ۰/۱۲۵ | ۷۰ تا ۷۹/۹۹ |
| ۰/۱۱ | ۸۰ تا ۸۹/۹۹ |
| ۰/۱ | ۹۰ تا ۱۰۰ |

جدول ۶. جدول کمکی تعیین ضریب ریسک واماندگی کارکرد (*FFR*)

**Table 6. Suggested function failure coefficient (*FFR*)**

| ضریب ریسک واماندگی کارکرد (*FFR*) | *RPN* (درصد از مقدار آستانه تعریف شده در شرکت |
|---|---|
| ۱/۵ | ۰ تا ۱۹/۹۹ |
| ۱/۴ | ۲۰ تا ۳۹/۹۹ |
| ۱/۳ | ۴۰ تا ۵۹/۹۹ |
| ۱/۱ | ۶۰ تا ۷۹/۹۹ |
| ۰/۹ | ۸۰ تا ۹۹/۹۹ |
| ۰/۸۵ | ۱۰۰ تا ۱۱۹/۹۹ |
| ۰/۸ | ۱۲۰ تا ۱۳۹/۹۹ |
| ۰/۷ | ۱۴۰ تا ۱۶۹/۹۹ |
| ۰/۶ | ۱۷۰ تا ۱۹۹/۹۹ |
| ۰/۵ | ۲۰۰ تا ۲۵۰ |
| ۰/۴ | مقادیر بیشتر |

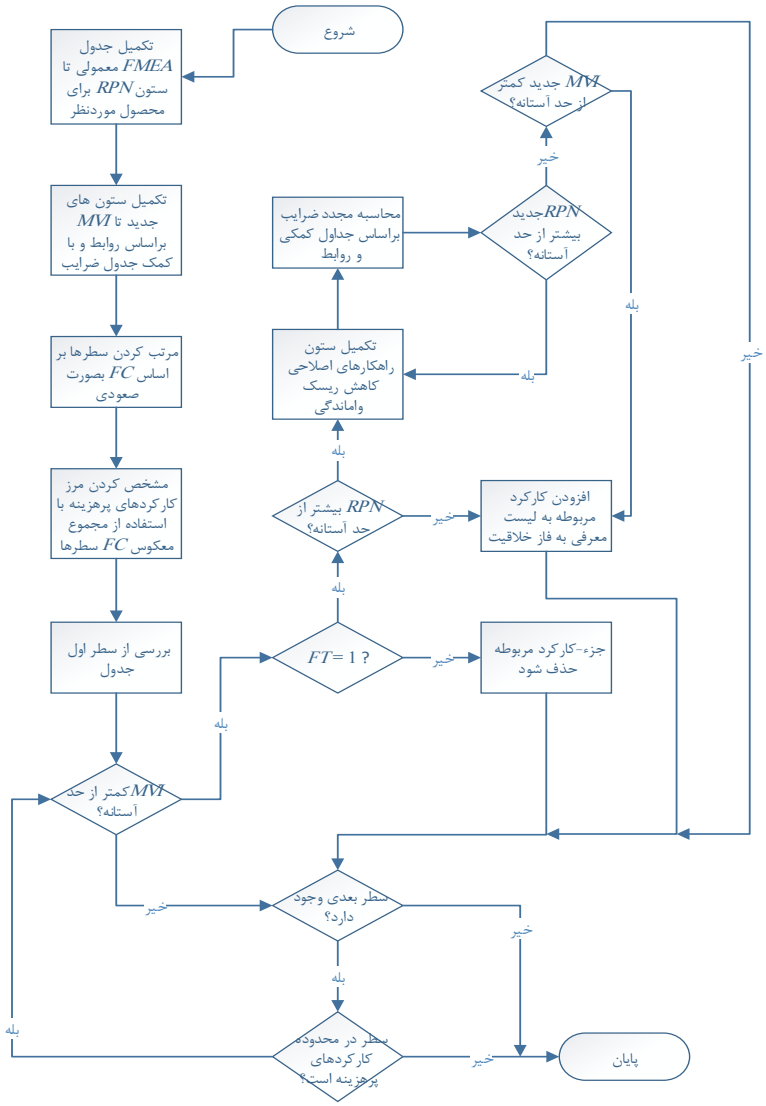
شد و در مسائل اقتصادی و بسیاری از تکنیک‌های مهندسی صنایع، بخصوص در مباحث مرتبط با کیفیت و فنون آماری بسیار کاربرد دارد [۴۸]. در مهندسی ارزش تمرکز بر روی همین بخش پرهزینه کارکردها است. به‌همین منظور سطرهای جدول از ابتدا تا جایی که مجموع $1/FC$ سطرها به بیش از عدد ۸ برسد مشخص می‌شوند. باید دقت شود هر جزء از محصول فقط یک‌بار در این محاسبه دخالت داده شود. حال براساس‌روابطی که پیشتر برای محاسبه مقدار ضریب بهای تعدیل شده و ارزش تعدیل شده ارائه شد، ستون‌های $FMW$ و $MVI$ برای سطرهای مشخص شده کامل می‌شود و سپس سطرهایی که $MVI$ آن‌ها کمتر از حد آستانه تعریف شده توسط شرکت سازنده باشد معین می‌شوند. این کارکردها درحقیقت کارکردهای پرهزینه و کم‌ارزش محصول هستند که ادامه کار مهندسی ارزش متمرکز بر آن‌ها است. اگر مقدار $FT=1$ باشد یعنی با کارکردی پرهزینه و کم ارزش اما غیرقابل حذف مواجه هستیم. برای این دسته از کارکردها باید اقدامات خلاقانه جهت افزایش ارزش انجام پذیرد. در مهندسی ارزش به‌طور معمول، این دسته از کارکردها جهت ادامه مطالعه ارزش به فاز خلاقیت منتقل می‌شد. اما با بکارگیری روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی در این پژوهش برای اجرای فاز تحلیل کارکردها، این قابلیت وجود دارد که پیش از ارجاع به فاز خلاقیت، $RPN$ کارکرد را بررسی کنیم و اگر ریشه بی‌ارزشی کارکرد ناشی از ریسک واماندگی بالای آن است در همین مرحله اصلاح انجام شود و زمان و منابع تیم خلاقیت صرف یافتن راهکارهای افزایش ارزش نشود. پس برای این کارکردها اگر $RPN$ بیش از حد آستانه مجاز بود ستون پیشنهادهای اصلاحی را تکمیل و دوباره مقادیر $O, S, D, RPN, FFR, FMW$ و $MVI$ محاسبه می‌شود. حال اگر $MVI$ جدید به حد آستانه رسیده بود دیگر نیاز به معرفی به فاز خلاقیت وجود ندارد. ولی اگر همچنان $MVI$ کمتر از حد آستانه بود به همراه سایر کارکردهای پرهزینه و کم‌ارزش که $RPN$ آن‌ها کمتر از حد آستانه بود به فاز خلاقیت، جهت ارائه راهکارهای افزایش ارزش معرفی می‌شوند. البته در مورد کارکردهایی که $RPN$ کمتر از حد مجاز دارند ولی شدت اثر یکی از واماندگی‌های بالقوه آن‌ها بیش از عدد ۸ می‌باشد نیز مشابه کارکردهای با $RPN$ بیش از حد آستانه برخورد می‌شود. چراکه به دلیل داشتن شدت اثر بالا، بطور استثناء جزء کارکردهای با اولویت ریسک بالا به حساب آورده می‌شوند [۴۹].

اگر برای کارکرد مورد بررسی $FT=0$ بود، با کارکردی پرهزینه، کم ارزش و قابل حذف مواجه هستیم. لذا با حذف کارکرد مربوطه از محصول، ارزش کلی محصول ارتقاء و ریسک واماندگی آن نیز کاهش می‌یابد. تا اینجای کار عملیات تحلیل کارکردهای محصول تکمیل شده و همزمان تحلیل ریسک واماندگی محصول با لحاظ‌کردن صرفه اقتصادی، به‌طور همزمان برای کارکردهای پرهزینه و کم‌ارزش به‌انجام رسیده‌است و بخشی از ارتقاء ارزش و کاهش ریسک واماندگی محصول محقق شده‌است. شکل ۳، جریان کار روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی برای اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصولِ مهندسی ارزش را نشان می‌دهد.

می‌توان با ادامه تحلیل ریسک برای کارکردهای پرهزینه و با ارزش بالا و همچین کارکردهای کم هزینه، کار تحلیل ریسک واماندگی محصول را نیز به‌طور کامل به‌انجام رساند. بدین ترتیب با استفاده از روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته، همزمان با اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول برای مهندسی ارزش، تحلیل ریسک واماندگی آن هم انجام می‌شود. شکل ۴، جریان کار روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی برای اجرای فاز تحلیل کارکردهای مهندسی ارزش، همزمان با تحلیل ریسک واماندگی محصول را نشان می‌دهد.

## ۳- بررسی به‌کارگیری روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته برای اجرای فاز تحلیل کارکردهای یک محصول نمونه

در ادامه نحوه به‌کارگیری روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی، جهت انجام فاز تحلیل کارکردهای یک محصول نمونه بررسی می‌شود. محصول مورد نظر یک صندلی جراحی است. در بخش اول روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول برای محصول مورد نظر تکمیل و براساس آن بالاترین $RPN$ هریک از جزء-کارکردهای محصول موردنظر شناسایی می‌شود. در بخش دوم روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه یافته پیشنهادی برای جزء-کارکردهای محصول کامل شده و در ادامه نتایج حاصله و نحوه نتیجه‌گیری از آن‌ها ارائه می‌شود.




**شکل ۳. جریان کار روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته برای اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول مهندسی ارزش**

**Fig. 3. The improved FMEA workflow to perform the product function analysis phase**

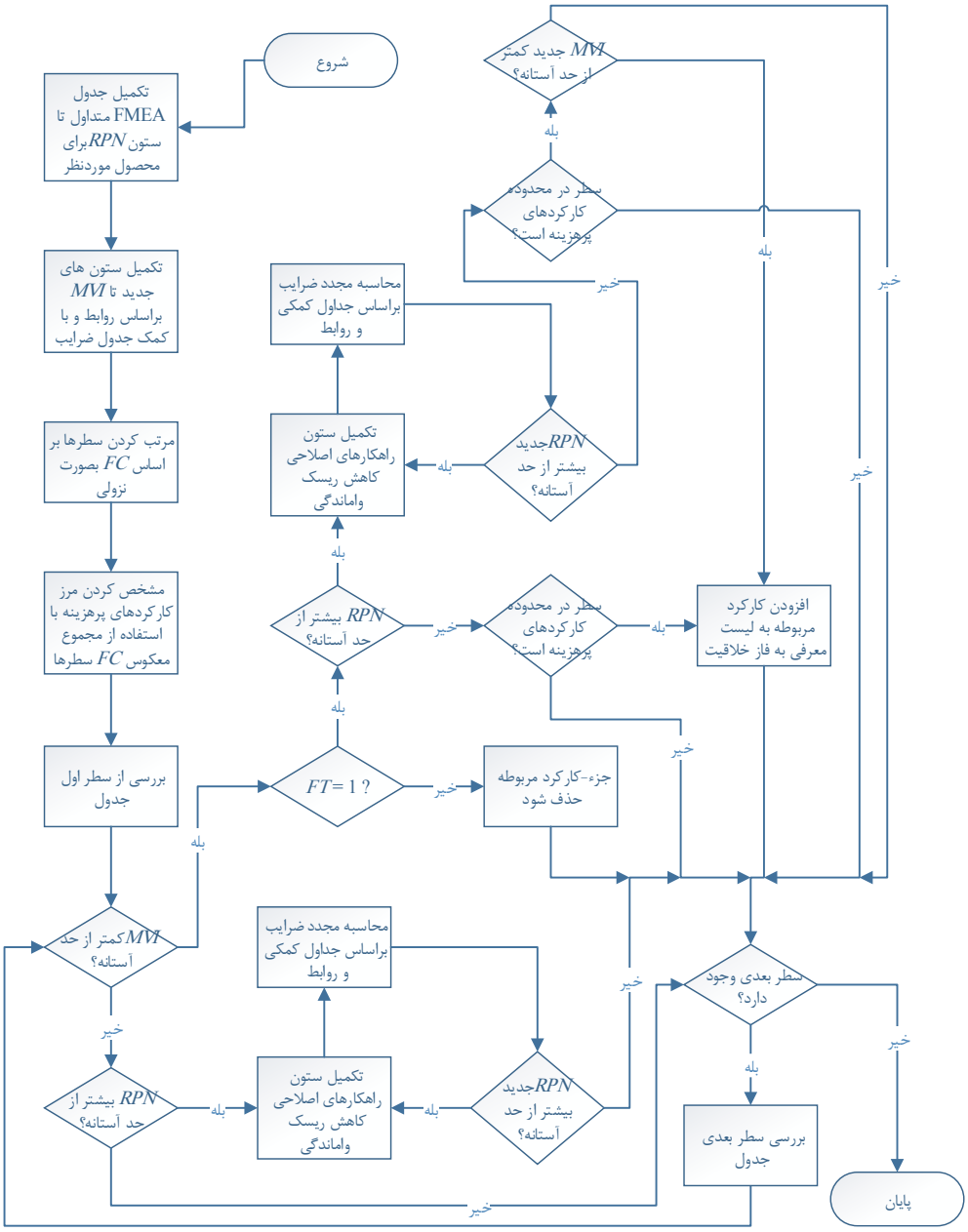
### ۳-۱- اجرای روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول رایج برای محصول مورد نظر

جدول ۷، جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول کامل شده برای محصول مورد نظر را نشان می‌دهد. به دلیل حجم بالای داده‌ها و جهت رعایت اختصار، بخشی از جدول آمده‌است.

### ۳-۲- اجرای روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی برای محصول مورد نظر

در ادامه با استفاده از روابط و جداول بیان شده، جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی را کامل می‌کنیم. از جدول ۷، بیشترین مقدار $RPN$ برای هر جزء-کارکرد محصول مشخص و در ادامه بعنوان $RPN$ آن جزء-کارکرد در محاسبه مقدار $MVI$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدول ۸ جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه داده‌شده برای محصول مورد نظر را نشان می‌دهد.

برای تکمیل ستون‌های جدید این جدول، ابتدا براساس رویه‌ای که پیشتر بیان‌شد با تکمیل ستون $FC$، کارکردهای پرهزینه براساس قانون پارتو معین شدند. تکمیل سایر ستون‌های جدید جدول برای کارکردهای کم‌هزینه نیاز نیست. از آنجا که مجموع $FC$ ۱/ سطرهای جدول به بیش از عدد ۸ نمی‌رسد، تمامی کارکردهای موجود در جدول جزء کارکردهای پرهزینه محسوب می‌شوند. لذا برای تمامی سطرهای




**شکل ۴. جریان کار روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصولتوسعه‌یافته برای اجرای فاز تحلیل کارکرد مهندسی ارزش، همزمان با تحلیل ریسک واماندگی محصول**

**Fig. 4. The improved FMEA workflow to perform the value engineering function analysis and the product failure risk analysis**

جدول، ستون‌های جدید کامل و مقدار $MVI$ محاسبه شده‌است. در ادامه نتایج حاصل از روش ارائه شده و نحوه تصمیم‌گیری برمبنای آن‌ها ارائه شده است.

## ۴- نتایج و بحث

با کامل شدن اجرای روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه یافته پیشنهادی، برای هریک از کارکردهای محصول مقدار شاخص ارزش اصلاح شده یا همان $MVI$ بدست آمد. چنانکه در جدول ۹ مشخص است این روش به درستی اثر $RPN$ کارکردهای محصول را بر شاخص ارزش آن‌ها منعکس و آن را اصلاح نموده است. در شکل ۵ مقدار و جهت درصد تغییرات شاخص ارزش کارکردهای محصول ناشی از اعمال اثر ریسک واماندگی آن‌ها با اجرای روش ارائه

**جدول ۷. جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول کامل شده برای محصول مورد نظر**
**Table 7. Completed traditional FMEA table for the intended product**

| جزء محصول / کارکرد | واماندگی بالقوه | اثرات بالقوه واماندگی | شدت اثر (S) | علت‌های بالقوه خرابی | احتمال وقوع (O) | روش‌های جاری کنترل طراحی پیشگیرانه | روش‌های جاری کنترل طراحی تشخیصی | توان تشخیص (D) | عدد اولویت ریسک (RPN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تکیه‌گاه پشت صندلی / تغییر زاویه بین تکیه‌گاه صندلی و نشیمن‌گاه صندلی با توجه به سیگنال اپراتور و در محدوده ۹۰ تا ۱۷۰ درجه | عدم پاسخ به سیگنال اپراتور و یا پاسخ با تأخیر بیش از ۳ ثانیه | عدم قطعیت اپراتور در فشردن دکمه<br>اپراتور نمی‌تواند به موقعیت مورد نظر خود برسد | ۸ | وجود اشکال در مدار الکتریکی | ۵ | مونتاژ اتصالات الکتریکی مطابق با رویه تعریف شده مونتاژ<br>شبیه سازی سیستم الکتریکی[1] قبل از تأیید طرح محصول | تست سیستم الکتریکی | ۴ | ۱۶۰ |
| | | آسیب دیدن دکمه در اثرفشردن متوالی یا با نیروی بیش از حد توسط اپراتور | ۸ | وجود اشکال در اتصالات الکتریکی | ۵ | تأمین اتصال الکتریکی مطابق با برنامه مدون تست کیفیت | تست سلامت نهایی صندلی جراحی | ۵ | ۲۰۰ |
| | | | ۸ | وجود اشکال در عملگر | ۴ | تأمین عملگر مطابق با برنامه مدون تست کیفیت | تست اعتبارسنج ی نهایی صندلی جراحی | ۴ | ۱۲۸ |
| تکیه‌گاه پشت صندلی / باقی ماندن گشتاور بستن براکت اتصال عملگرها در محدوده ۲۳ نیوتن‌متر تا ۲۷ نیوتن‌متر و برای براکت اتصال لیمیت سوئیچ‌ها در محدوده ۱۷ نیوتن‌متر تا ۱۹ | کمتر شدن گشتاور بستن براکت اتصال عملگرها از ۱۶ نیوتن‌متر و برای براکت اتصال لیمیت سوئیچ‌ها از ۱۳ نیوتن‌متر | تولید صدا با جغجغه و لرزش<br>ایجاد لرزش در تکیه‌گاه و زیرپایی صندلی (از طریق براکت اتصال) | ۶ | گشتاوربستن نامناسب در مونتاژ | ۵ | تنظیم گشتاور بستن مطابق با رویه تعریف شده طراحی و مونتاژ | چک کردن گشتاور بستن پس از تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۴ | ۱۲۰ |
| | | امکان آسیب به سایر اتصالات رزوه‌دار | ۶ | خارج بودن ابزارهای اعمال گشتاور | ۶ | کالیبره کردن ابزار اتصالات (مانند آچار الکتریکی پیچ و | چک کردن گشتاور بستن پس از تست | ۴ | ۱۴۴ |

[1] CAE / ECAD

**ادامه جدول ۷. جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول کامل شده برای محصول مورد نظر**

**Continued Table 7. Completed traditional FMEA table for the intended product**

| جزء محصول / کارکرد | واماندگی بالقوه | اثرات بالقوه واماندگی | شدت اثر (S) | علت‌های بالقوه خرابی | احتمال وقوع (O) | روش‌های جاری کنترل طراحی پیشگیرانه | روش‌های جاری کنترل طراحی تشخیصی | توان تشخیص (D) | عدد اولویت ریسک (RPN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| نیوتن‌متر پس از چرخه گسترش-عقب نشینی | | | | بستن از کالیبراسیون | | مهره) در فواصل زمانی مناسب | صحت نهایی صندلی جراحی | | |
| تکیه‌گاه صندلی / آب بندی عملگر برای جلوگیری از نشت و آلودگی محیط جراحی | نشتی عملگر | آلودگی محیط جراحی<br>امکان آسیب به اجزاء الکتریکی (مانند اتصال کوتاه) | ۸ | خرابی درپوش آب بندی عملگر و اورینگ | ۶ | تأمین عملگر مطابق با برنامه مدون تست کیفیت | کنترل چشمی‌حین مونتاژ<br>تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۴ | ۱۹۲ |
| | | | ۸ | ترک روی دیوار عملگر | ۶ | تأمین عملگر مطابق با برنامه مدون تست کیفیت | کنترل چشمی حین مونتاژ<br>تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۵ | ۲۴۰ |
| سیستم تهویه مطبوع / ثابت نگه داشتن دمای بین بدن بیمار و تکیه‌گاه صندلی در محدوده بین ۱۸ تا ۲۲ درجه سانتیگراد | افزایش دما به بالاتر از ۲۷ درجه سانتیگراد | تعریق بیمار<br>حرکات بیمار (در صورت مشکل ساز بودن) | ۷ | از کار افتادگی فن | ۵ | تأمین فن مطابق با برنامه مدون تست کیفیت<br>مونتاژ اتصالات الکتریکی فن مطابق با رویه تعریف شده<br>مونتاژ شبیه سازی سیستم الکتریکی قبل از تأیید طرح محصول | تست سیستم الکتریکی<br>تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۵ | ۱۷۵ |
| | | | ۷ | عدم کارکرد صحیح فن | ۶ | تأمین فن مطابق با برنامه مدون تست کیفیت | تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۶ | ۲۵۲ |

**ادامه جدول ۷. جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول کامل شده برای محصول مورد نظر**

**Continued Table 7. Completed traditional FMEA table for the intended product**

| جزء محصول / کارکرد | واماندگی بالقوه | اثرات بالقوه واماندگی | شدت اثر (S) | علت‌های بالقوه خرابی | احتمال وقوع (O) | روش‌های جاری کنترل طراحی پیشگیرانه | روش‌های جاری کنترل طراحی تشخیصی | توان تشخیص (D) | عدد اولویت ریسک (RPN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ۷ | عملکرد نادرست سیستم گرمایشی | ۶ | تنظیم نقشه سیستم الکتریکی مطابق با طرح مونتاژ اتصالات الکتریکی مطابق با رویه تعریف شده مونتاژ شبیه سازی سیستم الکتریکی قبل از تأیید طرح محصول | تست سیستم الکتریکی تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۵ | ۲۱۰ |
| | | | ۷ | خرابی سیستم ارسال / دریافت سیگنال (از جمله دکمه‌های کنترل) | ۶ | تأمین سیستم ارسال / دریافت سیگنال مطابق با برنامه مدون تست کیفیت مونتاژ اتصالات الکتریکی مطابق با رویه تعریف شده مونتاژ شبیه سازی سیستم الکتریکی قبل از رسم انتشار | تست سیستم الکتریکی تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۵ | ۲۱۰ |
| زیرپایی / باقی ماندن گشتاور بستن براکت اتصال عملگرها در محدوده ۲۳ نیوتن‌متر تا ۲۷ نیوتن‌متر و برای براکت اتصال | کمتر شدن گشتاور بستن براکت اتصال عملگرها از ۱۶ نیوتن‌متر و برای براکت اتصال لیمیت سوئیچ‌ها از | تولید صدا با جغجغه و لرزش ایجاد لرزش در تکیه‌گاه پشت و تکیه‌گاه پای صندلی (از طریق براکت اتصال) | ۶ | گشتاوربستن نامناسب در مونتاژ | ۵ | تنظیم گشتاور بستن مطابق با رویه تعریف شده طراحی و مونتاژ | چک کردن گشتاور بستن پس از تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۴ | ۱۲۰ |
| لیمیت سوئیچ‌ها در محدوده ۱۷ نیوتن‌متر تا ۱۹ نیوتن‌متر پس از | ۱۳ نیوتن‌متر | امکان آسیب به سایر اتصالات رزوه‌دار | ۶ | خارج بودن ابزارهای اعمال گشتاور | ۶ | کالیبره کردن ابزار اتصالات (مانند آچار الکتریکی پیچ و | چک کردن گشتاور بستن پس از تست | ۴ | ۱۴۴ |

**ادامه جدول ۷. جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول کامل شده برای محصول مورد نظر**

**Continued Table 7. Completed traditional FMEA table for the intended product**

| جزء محصول / کارکرد | واماندگی بالقوه | اثرات بالقوه واماندگی | شدت اثر (S) | علت‌های بالقوه خرابی | احتمال وقوع (O) | روش‌های جاری کنترل طراحی پیشگیرانه | روش‌های جاری کنترل طراحی تشخیصی | توان تشخیص (D) | عدد اولویت ریسک (RPN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| چرخه گسترش-عقب نشینی | | | | بستن از کالیبراسیون | | مهره) در فواصل زمانی مناسب | صحت نهایی صندلی جراحی | | |
| زیرپایی / آب بندی عملگر برای جلوگیری از نشت و آلودگی محیط جراحی | نشتی عملگر | آلودگی محیط جراحی<br>امکان آسیب به اجزاء الکتریکی (مانند اتصال کوتاه) | ۸ | خرابی درپوش آب بندی عملگر و اورینگ | ۶ | تأمین عملگر مطابق با برنامه مدون تست کیفیت | کنترل چشمی حین مونتاژ<br>تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۴ | ۱۹۲ |
| | | | ۸ | ترک روی دیوار عملگر | ۶ | تأمین عملگر مطابق با برنامه مدون تست کیفیت | کنترل چشمی حین مونتاژ<br>تست صحت نهایی صندلی جراحی | ۵ | ۲۴۰ |

شده در مقاله نشان داده شده‌است.

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش $RPN$ تغییرات شاخص ارزش در جهت مثبت و با کاهش $RPN$ تغییرات شاخص ارزش در جهت منفی پیش می‌رود. این تغییرات، شاخص ارزش را به واقعیت نزدیک‌تر می‌کند. چراکه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه یافته پیشنهادی، ریسک واماندگی کارکردها که یکی از عوامل پنهان تاثیرگذار بر ارزش کارکردهای محصول است را آشکارسازی کرده و در محاسبه ارزش واقعی کارکردها و شناسایی کارکردهای کم ارزش، برای معرفی به فاز خلاقیتِ مهندسی ارزش دخالت می‌دهد. مزیت مهم استفاده از این روش برای اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول، انتخاب دقیق‌تر کارکردهای واجد شرایط جهت تخصیص هزینه فاز خلاقیت مهندسی ارزش با استفاده از پارامتر شاخص ارزش اصلاح‌شده به جای پارامتر شاخص ارزش کارکردهای محصول است که منجر به ارزش آفرینی بیشتر برای محصول خواهد شد.

با بررسی مقادیر $MVI$، $RPN$ و $FT$ کارکردهای محصول و مقایسه آن‌ها با مقادیر آستانه تعریف شده توسط تولیدکننده برای $MVI$ و $RPN$، اقدام مقتضی برای هریک از کارکردهای محصول جهت ارتقاء ارزش محصول تعیین می‌شود. این اقدامات برای هریک از کارکرهای محصول مورد نظر در جدول ۹ بیان شده‌است.

برای محصول مورد نظر مقدار آستانه $RPN$ برابر ۱۸۰ در نظر گرفته شده‌است که به این شکل بیست درصد موارد بیش از حد

**جدول ۸. جدول مورد استفاده در روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی برای محصول مورد نظر**

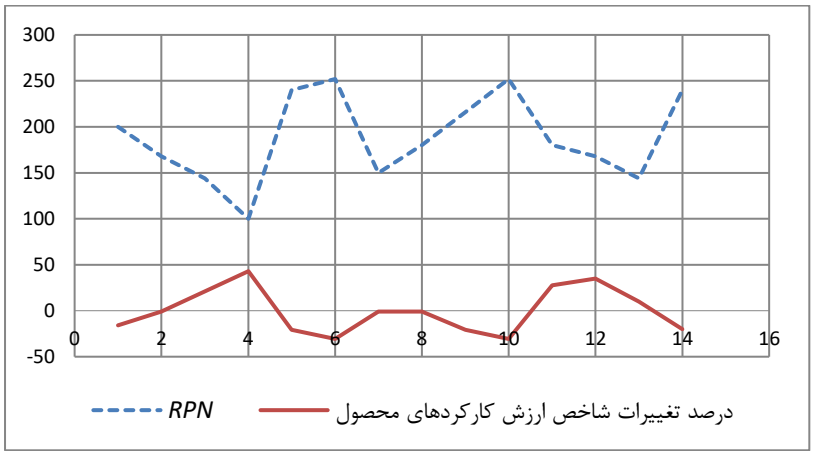
**Table 8. Completed the improved FMEA table for the intended product**

| ردیف | جزء محصول / کارکرد | عدد اولویت ریسک (RPN) | نوع کارکرد (FT) | هزینه ایجاد کارکرد برای تولید کننده (FC) | بهای کارکرد از نظر مشتری (FW) | ریسک واماندگی کارکرد (FFR) | بهای تعدیل شده کارکرد (FMW) | شاخص ارزش تعدیل شده (MVI) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | تکیه‌گاه پشت صندلی / تغییر زاویه بین تکیه‌گاه صندلی و نشیمن‌گاه صندلی با توجه به سیگنال اپراتور و در محدوده ۹۰ تا ۱۷۰ درجه | ۲۰۰ | ۱ | ۰/۳۳ | ۳ | ۰/۸۵ | ۲/۵۵ | ۰/۸۴۱۵ |
| ۲ | تکیه‌گاه پشت صندلی / حرکت با سطح نویز زیر ۲۵ دسی‌بل | ۱۶۸ | ۱ | ۰/۳۳ | ۲ | ۰/۹ | ۱/۸ | ۰/۵۹۴ |
| ۳ | تکیه‌گاه پشت صندلی / باقی ماندن گشتاور بستن براکت اتصال عملگرها در محدوده ۲۳ نیوتن‌متر تا ۲۷ نیوتن‌متر و برای براکت اتصال لیمیت سوئیچ‌ها در محدوده ۱۷ نیوتن‌متر تا ۱۹ نیوتن‌متر پس از چرخه گسترش- عقب نشینی | ۱۴۴ | ۱ | ۰/۳۳ | ۲ | ۱/۱ | ۲/۲ | ۰/۷۲۶ |
| ۴ | تکیه‌گاه پشت صندلی / قرارگیری کامل سر دکمه‌ای پیچ اتصال در نشیمن‌گاه حفره پیچ | ۱۰۰ | ۰ | ۰/۳۳ | ۲ | ۱/۳ | ۲/۶ | ۰/۸۵۸ |
| ۵ | تکیه‌گاه صندلی / آب بندی عملگر برای جلوگیری از نشت و آلودگی محیط جراحی | ۲۴۰ | ۱ | ۰/۳۳ | ۳ | ۰/۸ | ۲/۴ | ۰/۷۹۲ |
| ۶ | سیستم تهویه مطبوع / ثابت نگه داشتن دمای بین بدن بیمار و تکیه‌گاه صندلی در محدوده بین ۱۸ تا ۲۲ درجه سانتیگراد | ۲۵۲ | ۱ | ۰/۳۳ | ۳ | ۰/۷ | ۲/۱ | ۰/۶۹۳ |
| ۷ | سیستم تهویه مطبوع / ارائه جریان هوای ثابت در هر سطح از سرعت فن | ۱۵۰ | ۱ | ۰/۳۳ | ۲ | ۰/۹ | ۱/۸ | ۰/۵۹۴ |
| ۸ | سیستم تهویه مطبوع / کار با سطح نویز زیر ۲۵ دسی‌بل | ۱۸۰ | ۱ | ۰/۳۳ | ۲ | ۰/۹ | ۱/۸ | ۰/۵۹۴ |
| ۹ | سیستم تهویه مطبوع / تغییر سرعت فن منطبق با سیگنال ارسالی اپراتور | ۲۱۶ | ۱ | ۰/۳۳ | ۳ | ۰/۸ | ۲/۴ | ۰/۷۹۲ |
| ۱۰ | سیستم تهویه مطبوع / تغییر و تثبیت دما منطبق با سیگنال ارسالی اپراتور در کمتر از ۵۰ ثانیه (برای سیستم گرمایش) | ۲۵۲ | ۱ | ۰/۳۳ | ۳ | ۰/۷ | ۲/۱ | ۰/۶۹۳ |
| ۱۱ | زیرپایی / تغییر فاصله بین زیرپایی و تکیه‌گاه پای صندلی منطبق با سیگنال ارسالی اپراتور و در محدوده ۱ تا ۱۰۰ میلی متر | ۱۸۰ | ۰ | ۰/۵ | ۱ | ۰/۸۵ | ۰/۸۵ | ۰/۴۲۵ |
| ۱۲ | زیرپایی / حرکت با سطح نویز زیر ۲۵ دسی‌بل | ۱۶۸ | ۰ | ۰/۵ | ۱ | ۰/۹ | ۰/۹ | ۰/۴۵ |
| ۱۳ | زیرپایی / باقی ماندن گشتاور بستن براکت اتصال عملگرها در محدوده ۲۳ نیوتن‌متر تا ۲۷ نیوتن‌متر و برای براکت اتصال لیمیت سوئیچ‌ها در محدوده ۱۷ نیوتن‌متر تا ۱۹ نیوتن‌متر پس از چرخه گسترش- عقب نشینی | ۱۴۴ | ۱ | ۰/۵ | ۲ | ۱/۱ | ۲/۲ | ۱/۱ |
| ۱۴ | زیرپایی / آب بندی عملگر برای جلوگیری از نشت و آلودگی محیط جراحی | ۲۴۰ | ۱ | ۰/۵ | ۲ | ۰/۸ | ۱/۶ | ۰/۸ |
| ۱۵ | زیرپایی / قرارگیری کامل سر دکمه‌ای پیچ اتصال در نشیمن‌گاه حفره پیچ | ۱۰۰ | ۰ | ۰/۵ | ۱ | ۱/۱ | ۱/۱ | ۰/۵۵ |

جدول ۹. اقدام مقتضی برای هریک از کارکردهای محصول جهت ارتقاء ارزش

**Table 9. Appropriate action for each of the product functions to enhance the value**

| شماره جزء محصول/کارکرد براساس جدول ۹ | عدد اولویت | شاخص ارزش تعدیل شده | درصد تغییرات شاخص ارزش با اعمال تأثیر ریسک | نوع کارکرد ($FT$) | درصد تغییرات شاخص ارزش با اعمال تأثیر ریسک | اقدام پیشنهادی برای بهبود ارزش |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | **۲۰۰** | ۰/۸۴۱۵ | -۱۵/۸۵ | ۱ | -۱۵/۸۵ | عدم معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش |
| ۲ | ۱۶۸ | **۰/۵۹۴** | -۱ | ۱ | -۱ | معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش |
| ۳ | ۱۴۴ | **۰/۷۲۶** | ۲۱ | ۱ | ۲۱ | معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش |
| ۴ | ۱۰۰ | ۰/۸۵۸ | ۴۳ | ۰ | ۴۳ | عدم معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش |
| ۵ | **۲۴۰** | **۰/۷۹۲** | -۲۰/۸ | ۱ | -۲۰/۸ | ارائه راهکارهای کاهش $RPN$ و محاسبه مجدد $MVI$ و انتخاب نوع اقدام پیشنهادی براساس وضعیت جدید |
| ۶ | **۲۵۲** | **۰/۶۹۳** | -۳۰/۷ | ۱ | -۳۰/۷ | ارائه راهکارهای کاهش $RPN$ و محاسبه مجدد $MVI$ و انتخاب نوع اقدام پیشنهادی براساس وضعیت جدید |
| ۷ | ۱۵۰ | **۰/۵۹۴** | -۱ | ۱ | -۱ | معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش |
| ۸ | **۱۸۰** | **۰/۵۹۴** | -۱ | ۱ | -۱ | ارائه راهکارهای کاهش $RPN$ و محاسبه مجدد $MVI$ و انتخاب نوع اقدام پیشنهادی براساس وضعیت جدید |
| ۹ | **۲۱۶** | **۰/۷۹۲** | -۲۰/۸ | ۱ | -۲۰/۸ | ارائه راهکارهای کاهش $RPN$ و محاسبه مجدد $MVI$ و انتخاب نوع اقدام پیشنهادی براساس وضعیت جدید |
| ۱۰ | **۲۵۲** | **۰/۶۹۳** | -۳۰/۷ | ۱ | -۳۰/۷ | ارائه راهکارهای کاهش $RPN$ و محاسبه مجدد $MVI$ و انتخاب نوع اقدام پیشنهادی براساس وضعیت جدید |
| ۱۱ | **۱۸۰** | **۰/۴۲۵** | ۲۷/۵ | ۰ | ۲۷/۵ | حذف کارکرد |
| ۱۲ | ۱۶۸ | **۰/۴۵** | ۳۵ | ۰ | ۳۵ | حذف کارکرد |
| ۱۳ | ۱۴۴ | ۱/۱ | ۱۰ | ۱ | ۱۰ | عدم معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش |
| ۱۴ | **۲۴۰** | ۰/۸ | -۲۰ | ۱ | -۲۰ | عدم معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش |
| ۱۵ | ۱۰۰ | **۰/۵۵** | ۶۵ | ۰ | ۶۵ | حذف کارکرد |




شکل ۵. درصد تغییرات شاخص ارزش کارکردهای محصول ناشی از اعمال اثر ریسک واماندگی آن‌ها

**Fig. 5. Percentage of changes in the value index of product functions due to the exertion their failure risk effect**

جدول ۱۰. انواع مختلف اقدامات پیشنهادی برای کارکردهای محصول

**Table 10. Description of the types of proposed measures for the various functions of the product**

| اقدامات پیشنهادی | توضیح وضعیت کارکرد |
|---|---|
| عدم معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش | کارکردهای کم هزینه |
| عدم معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش<br>حذف کارکرد | کارکردهای پرهزینه و پرارزش<br>کارکردهای پرهزینه کم ارزش قابل حذف |
| ارائه راهکارهای کاهش $RPN$ و محاسبه مجدد $MVI$ و انتخاب نوع اقدام پیشنهادی براساس وضعیت جدید | کارکردهای پرهزینه کم ارزش غیرقابل حذف با $RPN$ بیش از حد آستانه |
| معرفی به فاز خلاقیت مهندسی ارزش<br>ارائه راهکارهای کاهش $S$ و محاسبه مجدد $MVI$ و انتخاب نوع اقدام پیشنهادی براساس وضعیت جدید | کارکردهای پرهزینه کم ارزش غیرقابل حذف با $RPN$ کمتر از حد آستانه<br>کارکردهای پرهزینه کم ارزش غیرقابل حذف با $RPN$ کمتر از حد آستانه و با شدت اثر بزرگتر از ۸ |
| ارائه راهکارهای کاهش $S$ و محاسبه مجدد $MVI$ و انتخاب نوع اقدام پیشنهادی براساس وضعیت جدید | کارکردهای پرهزینه پر ارزش با $RPN$ کمتر از حد آستانه و با شدت اثر بزرگتر از ۸ |

آستانه است. همچنین مقدار $MVI$ آستانه نیز برابر ۰/۸ اعمال شده‌است. البته نحوه تعیین $RPN$ و $MVI$ آستانه در شرکت‌های مختلف و برای محصولات مختلف می‌تواند متفاوت باشد. در جدول ۹ مقادیر $MVI$ کمتر از حد آستانه‌ی تعریف شده توسط شرکت سازنده و همچنین مقادیر $RPN$ بیشتر از حد آستانه‌ی تعریف شده توسط شرکت سازنده، برجسته شده‌است. جدول ۱۰ نحوه تعیین نوع اقدامات پیشنهادی برای کارکردهای محصول در شرایط مختلف را خلاصه کرده‌است.

در قسمت مرور ادبیات، تحقیق مشابهی که توسط میکالاکودیس و همکاران [۴۷] برای اجرای همزمان روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و مهندسی ارزش ارائه شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. مزیت روش ارائه شده در این مقاله نسبت به روش ارائه شده در مقاله مذکور این است که در آن مقاله محوریت تصمیم‌گیری در مورد ارزش کارکردها صرفاً براساس ریسک واماندگی آن‌ها است و از ریسک واماندگی بعنوان معیار اصلی جهت تعیین شاخص ارزش کارکردها استفاده شده و نظر مشتری در تعیین بهای کارکردها اعمال نشده‌است. درحالی که در مقاله حاضر ریسک واماندگی کارکردها تنها بعنوان یکی از عوامل مؤثر بربهای آن‌ها و پنهان از منظر مشتری آشکارسازی شده و اثر آن بر بهای تعیین شده توسط مشتری اعمال می‌شود. همچنین در مقاله ذکر شده تفاوتی بین کارکردهای پرهزینه و کم هزینه برای اختصاص منابع فاز خلاقیت درنظر گرفته نشده‌است که این موضوع نیز در مقاله حاضر مورد توجه قرار گرفته‌است. بعلاوه اینکه در آن مقاله تنها کارکردهای با ریسک واماندگی کم به فاز خلاقیت مهندسی ارزش معرفی می‌شوند که برخلاف رویه مهندسی ارزش است. این موضوع نیز در مقاله حاضر مورد توجه قرار گرفته و تمامی کارکردهای محصول برای حضور در فاز خلاقیت مهندسی ارزش مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

## ۵- نتیجه‌گیری

مهندسی ارزش، افزایش قابلیت رقابت محصول از طریق ارتقاء ارزش آن را دنبال می‌کند. این کار از طریق شناسایی و حذف کارکردهای کم ارزش و غیرضروری محصول و یافتن راه‌حل‌های خلاقانه برای برآورده‌سازی کم هزینه و باکیفیت سایر انواع کارکردهای محصول انجام می‌شود. برای مهندسی ارزش در استانداردها و منابع مختلف مراحل و فازهای متنوعی ارائه شده‌است. یکی از مراحل اصلی مهندسی ارزش فاز تحلیل کارکردهای محصول است که طی آن تک‌تک کارکردهای محصول باید شناسایی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و اقدام مناسب برای ادامه مطالعه ارزش در مورد آن‌ها پیشنهاد شود. اجرای صحیح این فاز، در نتیجه‌ی نهایی حاصل از اجرای مهندسی ارزش نقش بسیار مهم و اثرگذاری دارد. تعیین

صحیح مقدار بهای محصول و بهای هرکدام از کارکردهای آن در فاز تحلیل کارکردها و خروجی آن بسیار مهم است.

روش ارائه شده در این مقاله این قابلیت را برای فاز تحلیل کارکردهای محصول فراهم کرده‌است که قابلیت اطمینان یا ریسک واماندگی تک‌تک کارکردهای محصول را آشکارسازی کرده و در تعیین بهای واقعی کارکردهای محصول دخالت دهد. به این منظور در این مقاله با توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول، چارچوب جدیدی برای اجرای فاز تحلیل کارکردهای محصول ارائه شده‌است. توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول و ترکیب آن با سایر روش‌ها و تکنیک‌ها موضوعی است که در تعدادی از مطالعات به آن پرداخته شده‌است. در هرکدام از این مطالعات، هدف از توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول دستیابی به مزیت‌ها و قابلیت‌های جدید بوده‌است. از این جمله می‌توان به تحقیقاتی در مورد ترکیب روش‌های تحلیل درخت نقص و روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول اشاره کرد که پیاده‌سازی کامل هریک از این روش‌ها بر روی یک محصول بسیار زمان‌بر است. لذا در هریک از این مطالعات، روشی ترکیبی ارائه شده تا با صرف زمان کمتر تحلیل ریسک واماندگی محصول انجام شود. همچنین مواردی از مطالعات در زمینه ترکیب روش‌های تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و گسترش تابع کیفیت به‌عنوان روش‌های رایج در تکنولوژی مهندسی کیفیت وجود دارد که بدین ترتیب برخی محدودیت‌های هریک از آن‌ها پوشش داده‌شده و شیوه جدیدی در کنترل کیفیت ایجاد شده‌است.

مهندسی ارزش و روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول دو روش مستقل از هم هستند که یکی با هدف افزایش قابلیت اطمینان و دیگری با هدف افزایش ارزش محصول به‌طور مستقل از هم اجرا می‌شوند. در این مقاله با توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول، چارچوبی جهت اجرای فاز تحلیل کاکردهای محصولِ مهندسی ارزش در بستر روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول ارائه شده‌است. همانطور که پیشتر بیان شد استفاده از این چارچوب، ضمن اجرای گام به گام و قاعده‌مند فرآیند تحلیل کارکردها، مزیت مهمی را فراهم می‌کند و آن آشکارسازی یکی از عوامل پنهان تاثیرگذار بر ارزش کارکردهای محصول است. در این روش ریسک واماندگی کارکردها، آشکارسازی و در محاسبه ارزش واقعی کارکردها و شناسایی کارکردهای کم ارزش، برای معرفی به فاز خلاقیتِ مهندسی ارزش دخالت داده می‌شود. در روش ارائه شده در این مقاله، بدون نیاز به انجام فاز تحلیل کارکردهای مهندسی ارزش بصورت جداگانه که زمان‌بر و هزینه‌بر خواهدبود، با اجرای چارچوب روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی، معیاری به‌نام $MVI$ که بیانگر شاخص ارزش اصلاح شده کارکردها با احتساب ریسک واماندگی آن‌هاست، جهت تصمیم‌گیری درمورد هریک از کارکردهای محصول برای ادامه فرایند مهندسی ارزش حاصل شده‌است. همانطور که برای محصول نمونه مشاهده شد، با کامل کردن جدول روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی این مقاله، پس از شناسایی کارکردهای پرهزینه محصول براساس قانون پارتو، مقدار $FMW$ و $MVI$ برای آن‌ها محاسبه شده و براساس مقادیر $FT$، $MVI$ و $RPN$ نوع اقدام مقتضی برای ادامه مطالعه ارزش هریک از کارکردها مشخص شد.

یکی دیگر از مزیت‌های استفاده از چارچوب ارائه شده در این مقاله، اینست که با توجه به یکی بودن زمان مناسب برای اجرای روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول و زمان مناسب برای پیاده‌سازی مهندسی ارزش، بخشی از کار اجرای آن‌ها را تجمیع می‌کند. مهندسی ارزش در تمام مراحل یک پروژه قابل اجرا است، اما تأخیر در انجام آن فرصت‌های بالقوه برای ایجاد تغییرات را کاهش می‌دهد. لذا میزان صرفه‌جویی حاصل از اجرای مهندسی ارزش با پیشرفت فازهای عملیاتی پروژه و یا طراحی و ساخت محصول کاهش می‌یابد. لذا بهترین زمان برای اجرای آن در مراحل اولیه طراحی محصول است. از طرفی پیاده‌سازی روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول نیز بیشتر در زمان طراحی محصول انجام می‌شود تا با کمترین مقدار هزینه، اصلاحات لازم در طراحی محصول اِعمال‌شده و ریسک واماندگی کاهش یابد. از این‌رو روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه‌یافته پیشنهادی این مطالعه می‌تواند با کاهش موازی‌کاری موجب کاهش زمان و هزینه توسعه محصول در کلیه صنایع مرتبط با طراحی و ساخت محصولات و ارائه آن به مشتری و پیشی‌گرفتن در بازار رقابت شود.

از آنجا که استفاده از $RPN$ برای اولویت بندی ریسک واماندگی کارکردهای محصول، دارای محدودیت‌هایی است، تحقیقات مختلفی برای بهبود عملکرد روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول

از طریق ایجاد تغییراتی در محاسبه $RPN$ و یا جایگزینی معیارهای دیگر برای اولویت بندی ریسک واماندگی انجام شده که تعدادی از آن‌ها در بخش ادبیات تحقیق بیان شده است. بررسی و ارزیابی سایر روش‌های رتبه بندی ریسک واماندگی محصولِ جایگزین $RPN$، جهت ارتقاء روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول توسعه یافته پیشنهادی این مطالعه می‌تواند بعنوان موضوعی برای ادامه این تحقیق مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این با توجه به اینکه مقیاس‌ها و جداول ارائه شده در FMEA توسعه یافته پیشنهادی بعنوان یک نقطه آغازین خوب برای این روش است و باید برای کاربردهای متنوع و محصولات مختلف مناسب سازی شود، می‌توان در ادامه این تحقیق با بهبود دادن جدول ضرایب و مقیاس‌ها، خروجی مدل را بهتر کرد.

بطور کلی توسعه روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول متداول و ترکیب آن با سایر روش‌ها و تکنیک‌ها با هدف دستیابی به مزیت‌ها و قابلیت‌های جدید موضوعی است که در تعدادی از مقالات به آن پرداخته شده‌است که تعدادی از آن‌ها در قسمت مرور ادبیات تحقیق بررسی شد. بررسی تکنیک‌ها و روش‌های شناخته‌شده طراحی و مدیریت کیفیت محصول و ارائه یک مدل ترکیبی با روش تحلیل حالت‌ها و اثرات واماندگی محصول جهت دستیابی به قابلیت‌های جدید نیز موضوعی است که همچنان جای کار داشته و می‌تواند در ادامه این تحقیق مورد توجه قرار بگیرد.

## مراجع


[1] D.L. Younker, Value engineering: analysis and methodology, Marcel Dekker, New York, 2003.

[2] S.S. Iyer, Value engineering a how to manual, New Age Internat. Limited Publ., New Dehli [u.a., 2009.

[3] A.J. Dell'Isola, A.J. Dell'Isola, Value engineering: practical applications --for design, construction, maintenance & operations, R. S. Means Company, Kingston, Mass, 1997.

[4] R.J. Park, Value engineering: a plan for invention, St. Lucie Press, Boca Raton, Fla, 1999.

[5] S.o.A. Engineers, Potential Failure Mode And Effects Analysis In Design (Design FMEA) And Potential Failure Mode And Effects Analysis InManufacturing AND Assembly Processes (Process FMEA Reference Manual), in: Submitted for recognition as an American National Standard (SAE J1739), U.S.A., 1994.

[6] R.E. McDermott, R.J. Mikulak, M.R. Beauregard, The basics of FMEA, CRC Press, New York, 2009.

[7] M. Rahgozar, Introduction of Value Methodology presentation, in, 2001, (in Persian).

[8] R. Cooper, R. Slagmulder, Target costing and value engineering, Productivity Press ; IMA Foundation for Applied Research, Portland, Or. : Montvale, N.J, 1997.

[9] Guidebook for VE Activities: A Basic VE Manual, Society Of Japanese Value Engineering (SJVE), 1971.

[10] t.V.S. SAVE International, Value methodology standard and body of knowledge, in, 2004.

[11] R.T. Heys, Maynard's industrial engineering handbook, in: H.B. Maynard, K.B. Zandin (Eds.) Value Management, McGraw-Hill, New York, 2001.

[12] S. international, Value Methodology Standard, in, 1998.

[13] C. Chrysler, C. Ford Motor, C. General Motors, G. Automotive Industry Action, Potential failure mode and effects analysis (FMEA): reference manual, Chrysler LLC, Ford Motor Co., General Motors Corp., Southfield, MI, 2008.

[14] A. Senay, G. Niyazi, Application of Value Engineering in Construction Projects, JTTE, 1(12) (2013).

[15] T. H, N. Rostam Afshar, O. Selaman, T. S.N.L, Application of Value Engineering in Slope Stabilization, International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), 1 (2014) 211-216.

[16] R. Stasiak-Betlejewska, Value Engineering Application in the American Transportation Industry, Period. Polytech. Transp. Eng., 43(4) (2015) 206-210.

[17] A. Mostafaeipour, A Novel Innovative Design Improvement using Value Engineering Technique: a Case Study, JOIE, 9(19) (2016).

[18] R. Schneiderova Heralova, Possibility of Using Value Engineering in Highway Projects, Procedia Engineering, 164 (2016) 362-367.

[19] K. Rad, O. Yamini, The Methodology of Using Value Engineering in Construction Projects Management, Civil Engineering Journal, 2 (2016) 262.

[20] D. Nallusamy, S.L. Kumar, R. Modak, Execution of Value

Engineering Approach for Design Development and Cost Reduction of Monoblock Pump, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13 (2018).

[21] W.T. Chen, P.-Y. Chang, Y.-H. Huang, Assessing the overall performance of value engineering workshops for construction projects, International Journal of Project Management, 28 (2010) 514-527.

[22] M. Zarandi, Z. Razaee, M. Karbasian, A fuzzy case based reasoning approach to value engineering, Expert Syst. Appl., 38 (2011) 9334-9339.

[23] F. Behncke, S. Maisenbacher, M. Maurer, Extended Model for Integrated Value Engineering, Procedia Computer Science, 28 (2014) 781-788.

[24] S. Bock, M. Pütz, Implementing Value Engineering Based on a Multidimensional Quality-Oriented Control Calculus within a Target Costing and Target Pricing Approach, International Journal of Production Economics, 183 (2017) 146-158.

[25] S. Vazdani, G.R. Sabzghabaei, S. Dashti, M. Cheraghi, R. Alizadeh, A. Hemmati, Application of FMEA Model for Environmental, Safety and Health Risks Assessment of Gas Condensates Storage Tanks of Parsian Gas Refining Company in 2016, RUMS_JOURNAL, 17(4) (2018) 345-35, (in Persian).

[26] K. Ravansetan, H.A. Aghajani, A. Safaei Ghadikalaei, M. Yahyazadehfar, Determination of Resilience Strategies and Their Reciprocal Influences in Iran Khodro Supply Chain, PRODUCTIVITY MANAGEMENT (BEYOND MANAGEMENT), 13(48 #f00917) (2019) 105-142, (in Persian).

[27] s. Tasharoei, A. Jahan, k. Ghods, Analysis of failure modes and solutions in the process of post open-heart surgery using Fuzzy FMEA and Fuzzy TOPSIS Techniques, jhosp, 18(2) (2019) 9-20, (in Persian).

[28] A. Vaysi, A. Rohani, M. Tabasizadeh, R. Khodabakhshian, F. Kolahan, Prioritization and Evaluation of Mechanical Components Failure of CNC Lathe Machine based on Fuzzy FMEA Approach, Journal of Agricultural Machinery, 9(2) (2019) 399-414, (in Persian).

[29] K. Sotoodeh, Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of Pipeline Ball Valves in the Offshore Industry, Journal of Failure Analysis and Prevention, 20 (2020).

[30] A. Mascia, A. Cirafici, A. Bongiovanni, G. Colotti, G. Lacerra, M. Carlo, F. Digilio, G. Liguori, A. Lanati, A. Kisslinger, A failure mode and effect analysis (FMEA)-based approach for risk assessment of scientific processes in non-regulated research laboratories, Accreditation and Quality Assurance, 25 (2020).

[31] M. Braglia, M. Frosolini, R. Montanari, Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis, International Journal of Quality & Reliability Management, 20 (2003) 503-524.

[32] P. Garcia, R. Schirru, P.F. Frutuoso e Melo, A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA, Progress in Nuclear Energy, 46 (2005) 359-373.

[33] K.-S. Chin, Y.-M. Wang, G. Poon, J.-B. Yang, Failure Mode and Effects Analysis by Data Envelopment Analysis, Decision Support Systems, 48 (2009) 246-256.

[34] D. Barends, M. Oldenhof, M. Vredenbregt, M. Nauta, Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA, Journal of pharmaceutical and biomedical analysis, 64-65 (2012) 82-86.

[35] A. Kutlu, M. Ekmekçioğlu, Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP, Expert Syst. Appl., 39 (2012) 61-67.

[36] A. Sutrisno, I. Gunawan, S. Tangkuman, Modified Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Model for Accessing the Risk of Maintenance Waste, Procedia Manufacturing, 4 (2015) 23-29.

[37] M. motlagh, S.A. Ayazi, S. Hosseini Dehshiri, Providing a hybrid approach to evaluating and ranking failure modes using Modified FMEA and fuzzy hierarchical analysis process, Journal of Quality and Standard Management, 3(25) (2017) 19-30, (in Persian).

[38] Z. Bluvband, R. Polak, P. Grabov, Bouncing failure analysis (BFA): the unified FTA-FMEA methodology, 2005.

[39] S. Yu, J. Liu, Q. Yang, M. Pan, A comparison of FMEA, AFMEA and FTA, in: The Proceedings of 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability

and Safety, 2011, pp. 954-960.

[40] X. Han, J. Zhang, A combined analysis method of FMEA and FTA for improving the safety analysis quality of safety-critical software, in: 2013 IEEE International Conference on Granular Computing (GrC), 2013, pp. 353-356.

[41] J.F.W. Peeters, R. Basten, T. Tinga, Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner, Reliability Engineering & System Safety, 172 (2017).

[42] A. Hassan, A. Siadat, J.-Y. Dantan, P. Martin, Conceptual process planning – an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 26 (2010) 392-401.

[43] Q. Guo, K. Sheng, Z. Wang, X. Zhang, h. Yang, R. Miao, Research on Element Importance of Shafting Installation Based on QFD and FMEA, Procedia Engineering, 174 (2017) 677-685.

[44] Y.-K. Gu, Z.-x. Cheng, G. Qiu, An improved FMEA analysis method based on QFD and TOPSIS theory, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 13 (2019).

[45] Z. Xu, S. Lee, D. Albani, D. Dobbins, R.J. Ellis, T. Biswas, M. Machtay, T.K. Podder, Evaluating radiotherapy treatment delay using Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Radiotherapy and Oncology, 137 (2019) 102-109.

[46] A. Subriadi, N. Najwa, The consistency analysis of failure mode and effect analysis (FMEA) in information technology risk assessment, Heliyon, 6 (2020) e03161.

[47] I. Michalakoudis, P. Childs, M. Aurisicchio, J. Harding, Using functional analysis diagrams to improve product reliability and cost, Advances in Mechanical Engineering, 9 (2017) 168781401668522.

[48] M. Karimi, Indisputable Improvement, Applied Training of Value Engineering, Rasa Publication, 2010, (in Persian).

[49] C. Carlson, Effective FMEAs: achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis, Wiley, Hoboken, N.J, 2012.

**چگونه به این مقاله ارجاع دهیم**

*M. Fazli, M. Kazerooni, An Improved Failure Modes and Effects Analysis as a New Framework to perform the Function Analysis Phase of products in the Value Engineering , Amirkabir J. Mech Eng., 53(8) (2021) 4665-4690.*

**DOI:** 10.22060/mej.2021.19020.6943