Iranian Journal of Ergonomics | ISSN: 2345-5365

Original Article

Identification and Evaluation of Fault in Human-Machine Interactive System using CREAM Technique and Fault Tree Analysis

Nooshin Atashfeshan[1], Mohammad Saidi-Mehrabad[2*], Hamideh Razavi[3]

1. PhD Candidate, Industrial Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
2. Professor, Industrial Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Article Info

Received: 2021/6/4
Accepted: 2021/11/22
ePublished: 2022/2/2

Use your device to scan and read the article online

Corresponding Author
Mohammad Saidi-Mehrabad
Professor, Industrial Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.**Email:**
mehrabad@iust.ac.ir,

ABSTRACT

Background and Objectives: Despite contribution to catastrophic accidents, human errors have been generally ignored in the design of human-machine (HM) systems and the determination of the level of automation (LOA). This paper aims to develop a method to estimate the level of automation in the early stage of the design phase considering both human and machine performance.

Methods: A quantitative method is used to evaluate the performance of the whole human-machine system by the human-in-the-loop fault tree analysis while a qualitative and cross-sectional method is used to estimate human errors using the CREAM technique. The data are collected from real cases happened in the control room of the Ferdowsi power plant.

Results: Full automatic option with an average error of 0.013 had the lowest error rate, i.e. 1/8 of the error rate of the manual design. In addition, the CREAM analysis showed that the control room operators were not satisfied with the availability of procedures and Man-Machine Interface and operational support in general. Thus, on average, the reliability of the manual design is less than the reliability of the automatic setting.

Conclusion: High machine reliability has led to the fact that the fully automatic design would be one of the best design choices for human-machine systems. However, based on the previous studies, high automation may have some human-out-of-the-loop shortcomings. Thus, this study proposed solutions to overcome these disadvantages based on the importance of the control parameters or the essence of human involvement in some decision-making and execution tasks.

Keywords: human-machine systems, function allocation, human reliability, human-in-the-loop fault tree analysis, human factors

Copyright © 2021, This is an original open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0 International License which permits copy and redistribute of the material just in noncommercial usages with proper citation.

How to Cite This Article:

Atashfeshan N, Saidi-Mehrabad M, Razavi H. Identification and Evaluation of Fault in Human-Machine Interactive System using CREAM Technique and Fault Tree Analysis. Iran J Ergon. 2021; 9 (3) :84-103

Extended Abstract

Background and Objective

Automatic systems represent human-machine interaction (HM) systems in which the machine performs all or part of the activities previously performed by humans [2, 3]. Therefore, the role of human beings in such systems has changed significantly and has become more intellectual and cognitive [4]. The degree of human resources in the implementation of activities depends on their level of automation, which is determined by solving the problems of function allocation.

So far, designers have focused more on improving the technical and technological parts of automation systems and ignored related human issues. Because they believed to eliminate human resources due to the advancement of technology and the upgrade of automatic systems. While the performance of HM interactive systems depends on the hardware used, software, human resources, and their interactions [25], and so far, no study has been proposed that considers these factors simultaneously in the issue of task allocation. Therefore, in this study, we tried to determine the appropriate level of automation in human-machine interactive systems in the control room; so that not only machine performance but also human performance and the Influential factors simultaneously contribute to performing the calculations. In addition, the strategies were provided to maintain the system reliability at an acceptable level and eliminate the faults of the human agent leaving the control loop in systems with high levels of automation, based on the index of the importance of control parameters and the necessity for human factor participation in decision-making and implementation processes.

Methods

The present study is a combination of a quantitative method to estimate the performance of the whole human-machine interaction system and a qualitative and cross-sectional method to estimate the human error using the CREAM technique in the control room of Ferdowsi Power Plant in Mashhad. The investigation begins, as shown in Figure 1, with the identification of abnormal and likely scenarios, which may result in life or financial losses. After hierarchical analysis of the scenarios to their respective tasks (Figure 2), the fault tree was developed for different design options (Table 1) to evaluate the performance of the HM system in different conditions and select the appropriate design option.

Table 1. Design options suggested by the design team

Design option name	Paying attention to alarms (1)	Pattern selection (2)	Closing or Opening valves or pumps (3)	Monitoring of pump performance (4)
Option 1 (Manual)	Manual	Manual	Manual	Manual
Option 2 (semi-automatic)	Fully automatic	Semi-automati	Semi-automatic	Semi-automatic
Option 3 (Fully automatic	Fully automatic	Fully automati	Fully automatic	Fully automatic
Option 4	Fully automatic	Fully automati	Semi-automatic	Fully automatic
Option 5	Fully automatic	Manual	Semi-automatic	Semi-automatic
Option 6	Manual	Manual	Fully automatic	Semi-automatic
Option 7	Fully automatic	Manual	Fully automatic	Semi-automatic
Option 8	Fully automatic	Manual	Fully automatic	Fully automatic

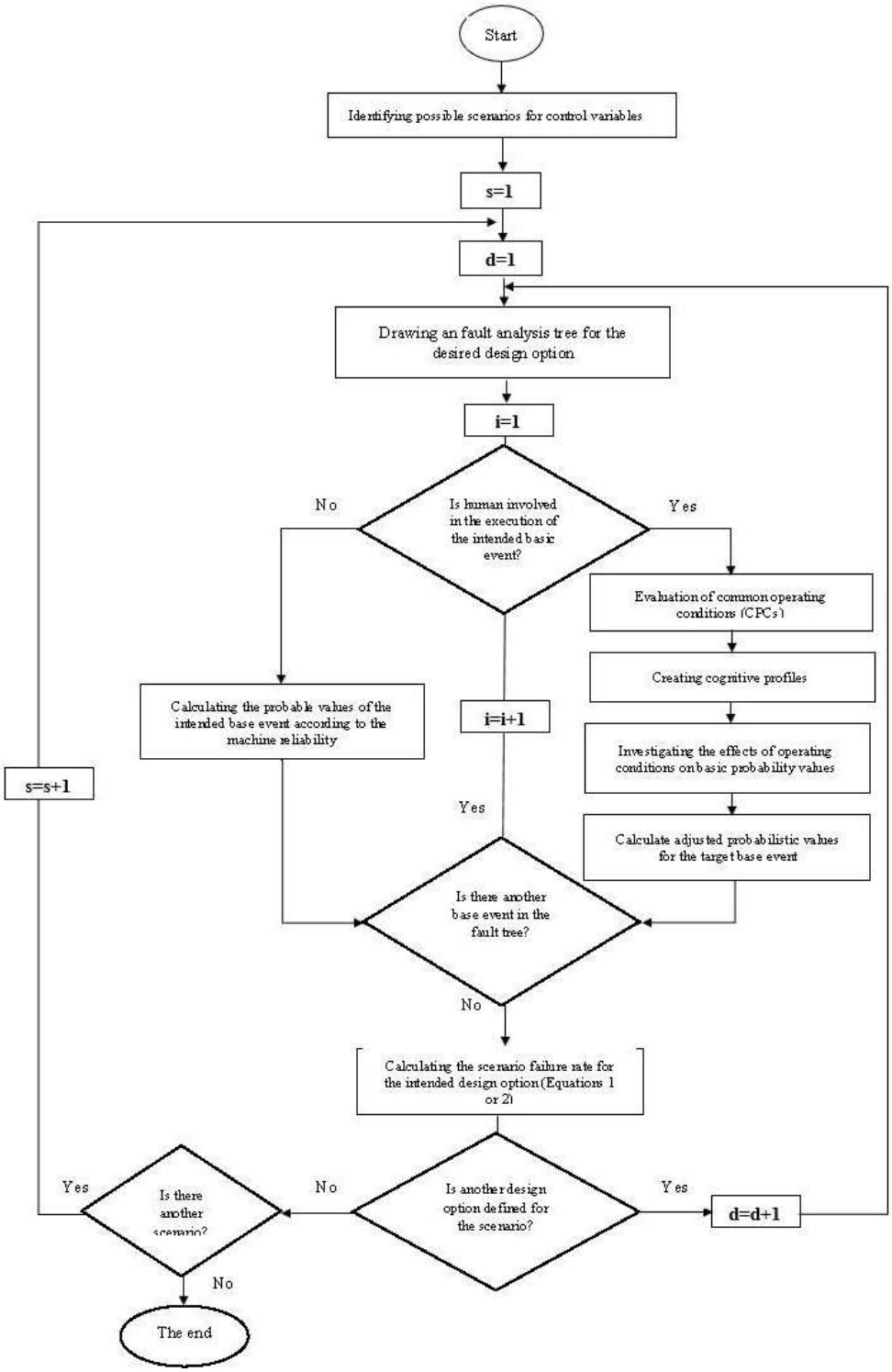


Figure 1. Execution process of the present research method (S is the scenario counter, d is the design option counter, and i is the number of base events in each fault analysis tree)

Each major event that indicates the system failure is broken down by a set of logic ports (AND or OR) into basic events representing human error, machine error, or environmental factors [30], which have been schematically shown in Figure 3.

The probability of machine error events is determined by the machine reliability and the available databases and the probability of human error is calculated based on the CREAM method.

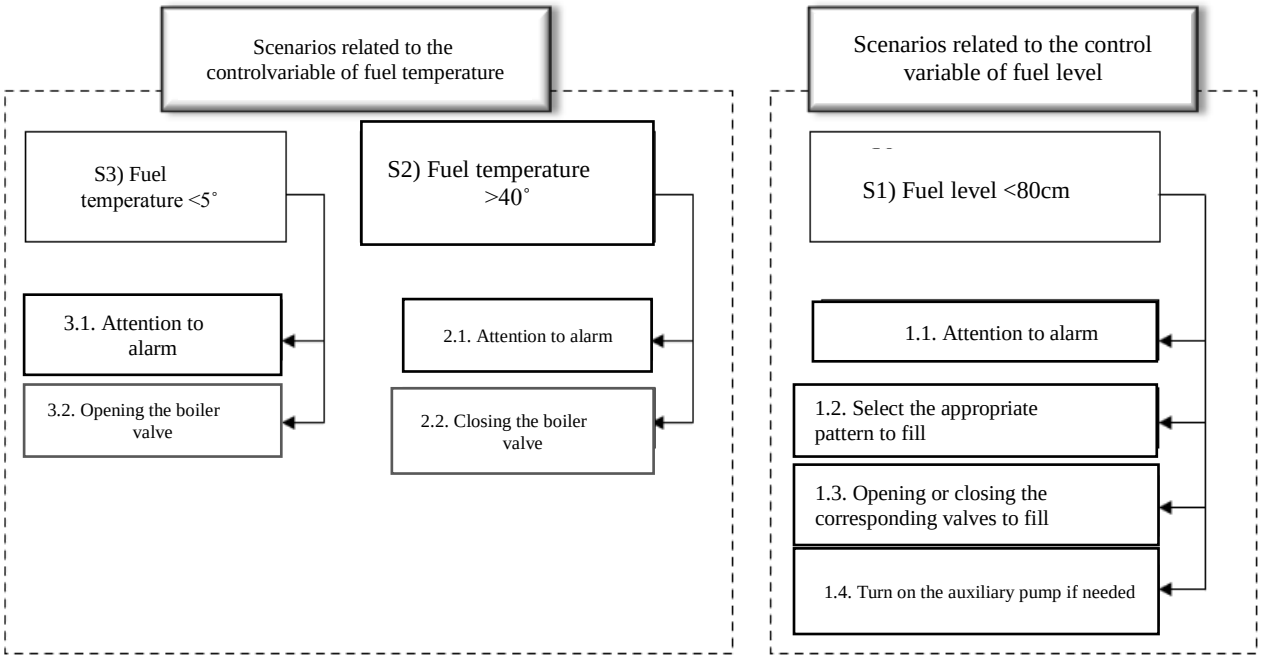


Figure 2. Interactive system tasks to manage and control abnormal scenarios related to temperature and fuel quantity

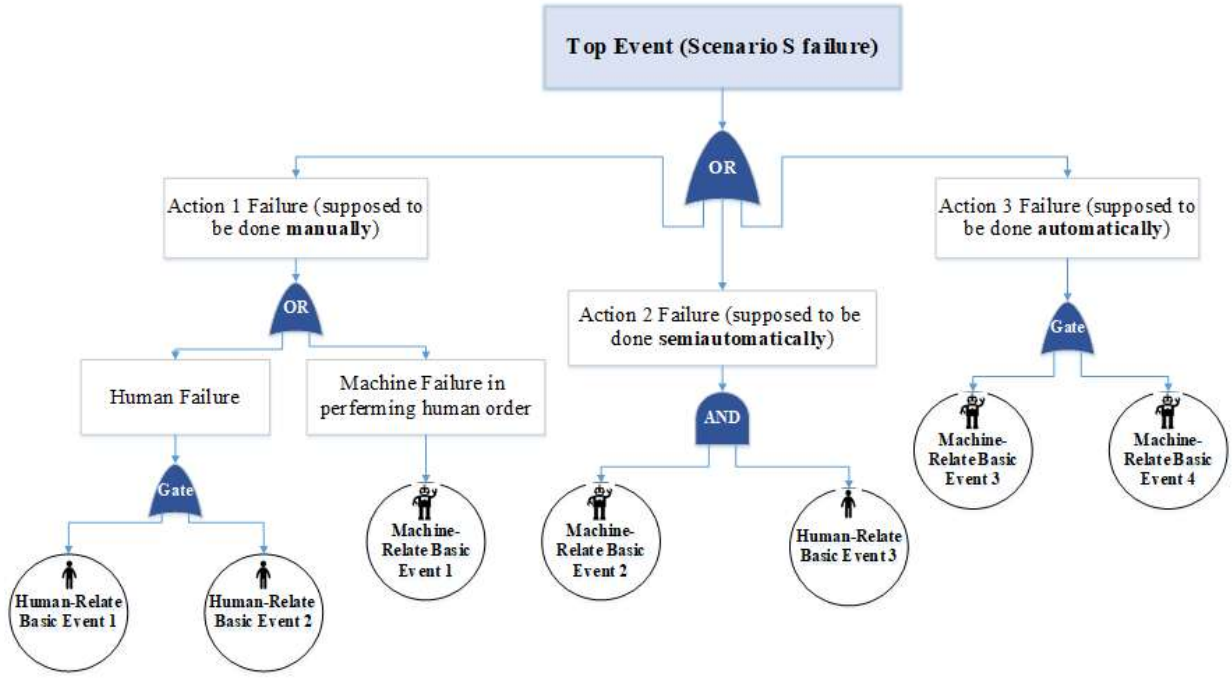


Figure 3. Schematic fault tree considering human resources in the control loop each major

To identify and determine the effect of working conditions affecting the operator performance, a questionnaire was prepared about 9 common performance conditions in the CREAM technique, with a Cronbach's alpha coefficient of 0.894 and a total content validity index of 0.883 (by 5 experts). In this study, the sampling method was census and the questionnaires were filled out by shift officials who were 15 in total, with an average age of 40 years and at least 5 years of work experience.

Findings

The data from CPC (Table 2) show that people in the control room are not very satisfied with the suitability of human-machine systems and have described it as moderately tolerable. Also, some activities do not have codified instructions, and people choose a pattern to fill the tanks by test and error or by taste; this causes the CPC value for this activity category to increase the likelihood of an error occurring in the base event related to this activity Figure 4.

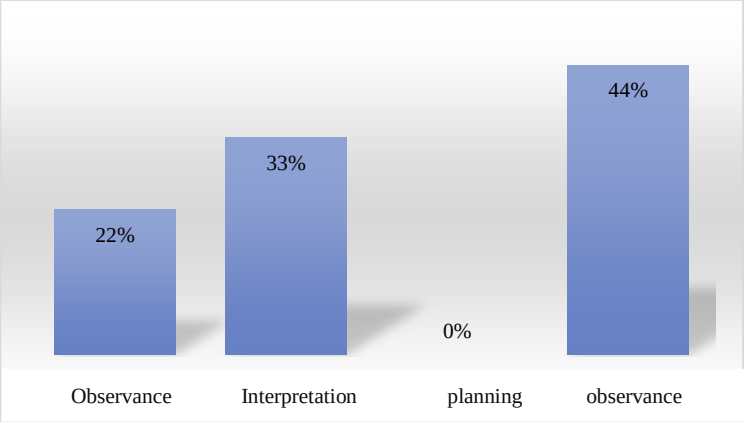


Figure 4. Ratio of possible cognitive errors in manual scenario management

Table 2. Information on common operating conditions in the management of studied scenarios in Ferdowsi power plant in Mashhad

Common Operating Conditions (CPC	CPCs level	Expected effect on the level of performance reliability
1. Organizational capability	Very efficient	Improvement
2. Working conditions	Excellent	Improvement
3. Suitability of the human-machin system and effective support	Pay attention to the alarm: enough	Unaffected
	Pattern selection: Improper	Decrease
	Opening or closing the valves: tolerab	Unaffected
	Pump monitoring: tolerable	Unaffected
4. Codified instructions	Pay attention to the alarm: acceptable	Unaffected
	Pattern selection: Improper	Decrease
	Opening or closing the valves: appropri	Improvement
	Pump monitoring: appropriate	Improvement
5. Performing multiple tasks simultaneously	Less than individual power	Improvement
6. Time pressure	Sufficient	Improvement
7. Work time (circadian rhythm)	Regular	Improvement
8. Existence of codified trainings an sufficient experiences	Sufficient (with limited experience)	Unaffected
9. Cooperate and interact between colleagues	Good	Unaffected

After forming the cognitive profile (Table 3) and determining the type of possible errors in the extensive CREAM method (Figure 4), it has been shown that the highest proportion of possible faults in manual management of scenarios is related to the "execution" cognitive function and "planning" has the least value.

Table 3. Cognitive activities and related functions

Activity category name	Cognitive activity type	Cognitive function type			
		OBS[1]	Int[2]	Plan[3]	Exe[4]
Pay attention to the alarm and identify its causes	Observe: Observe and pay attention to the values of system control variables	1			
Selecting the appropriate pattern	Evaluation: estimate or evaluate system positions based on available information and develop a set of measures to achieve the predetermined aims		1	1	
Opening/closing the valves	Execution: Perform a predefined program or task				1
Monitoring the pump operation and turning on the replacement pump if needed	Monitoring: Monitoring the set of activities and processes during system operation	1	1		
Execution: Performing a predefined program or task.	Execution: Perform a predefined program or task				1

By estimating the probability of basic human-machine events, the failure probability of the scenarios is calculated for each design option. As can be seen in Figure 5, design option 3, fully automatic, with an average error of 0.013 for defined scenarios has the lowest error rate, and design options 7 and 8 have the highest reliability with an error probability of 0.015 and 0.016, respectively.

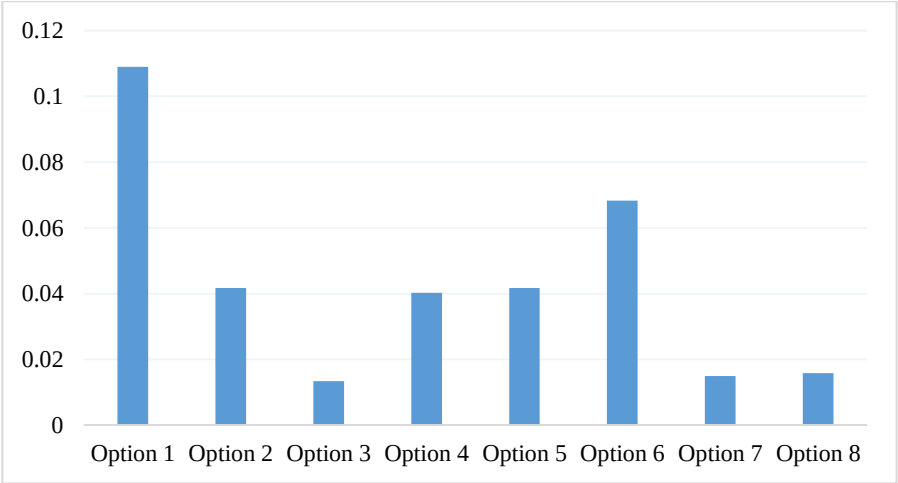


Figure 5. Average probability of failure of scenarios in different design options

The findings of this study emphasize the valuable advantages of automated systems such as improving reliability and reducing the error rate of human-machine interactive systems. Given that the reliability of the machine is considered to be at least 0.995, therefore, the results are in accordance with the study of Wickens and Dixon which showed that in human-machine interactive systems with high 70% reliability for the machine, a high level of automation brings acceptable system performance [38]. However, in this study and studies [40,39,17] it has been mentioned that a high level of automation leads to a decrease in awareness of the status and physical skills of human resources and turns humans into inactive decision-makers in the control loop. Therefore, it is recommended that human resources be involved in decision-making or implementation activities. As a result, design options 7 and 8, in which the "pattern selection" activity is done manually as a decision-making activity, can be a reasonable choice as the next design options of the HM interactive system for relevant studies.

In addition, the workforce can be somehow involved in manual control based on the importance of each variable, which depends on the vitality of the related scenarios. In this case, the study considers design option 3, which has the lowest average error rate for managing defined scenarios. The importance of parameter i, which is also shown as imp (P_i), can be defined as the damage level caused by the failure of the scenarios resulting from this parameter based on Equation 1.

$$imp(P_i) = \sum_{s \in S(p_i)} Pro_s \times Sev_s \,(1 - \prod_{i \in I_s} \prod_{j} (1 - FR^t{}_j[i,s] \times X_j[i,s])) \quad (1)$$

Where $X_j[i,s]$ is a binary decision variable that represents the decision to, i execute activity from scenario s at the j automation level. Defined scenarios (S) define the abnormal conditions that digital control rooms need to execute to manage the I_s set of activities. Sev_s is the severity of S scenario, which is equivalent to the maximum cost for the company as a result of S scenario failure; Pro_s is occurrence probability of S scenario and $FR^t{}_j[i,s]$ is fault probability rate resulting from the execution of i activity from the scenario $(i \in I_s)\, s$, which is performed in period (t) at the level of automation j. Given the probability of an error occurring over time, it can therefore be said that $FR^t{}_j[i,s]$ it is equal to $FR_j[i,s]$. Also, assuming successive scenarios and their corresponding activities, the failure of scenario s is equivalent to the uncertainty of at least one of its activities. As mentioned in the first step of the methods, $S(p_i)$ is equivalent to the set of abnormal scenarios for the parameter *i* (P_i).

This index helps designers to identify important control variables that require more unexpected awareness of the situation and to prevent e accidents. This can be achieved, for example, by occasionally reporting the status of these types of variables and recording them by human resources.

This study has limitations, which it is hoped to address in future research. The simultaneous occurrence of several scenarios can have a significant impact on the workload level of the workforce and thus its performance and influence decisions regarding the automation level, which it is necessary to investigate its implement it in this type of problem. Instability and unreliability of agents including humans and machines are among the cases that are not considered in this research. Also, the machine performance in this study has been estimated as a number according to the available information. While the performance of the machine in the control room interactive systems includes the performance of the hardware and software, which can be examined in a more specialized way. Developing the fault tree presented in the bow-tie diagram and applying the consequences of each design option to the decision-making can have a more pronounced impact on reducing the risk of accidents.

Conclusion

According to Price and Pulliam; "Human interaction with technology is one of the most interesting parts of human life history; it starts with the human need for technology as a means of survival until now it has become a coexistence partnership whose final form can not be predicted. This dynamic relationship has been associated with the continuous human anxiety from the possibility of damage by machinery [41]. Undoubtedly, the world will be a better place if designers, considering the existing limitations, design and create systems that are safe and secure and cause the least harm to humanity.

Acknowledgment

The authors are grateful to those who helped in compiling this research, especially the staff of the control room of the Ferdowsi power plant in Mashhad. The research has been funded by the authors.

Conflict of interest

There is no conflict of interest between the authors.

مجله ارگونومی | سال ۹، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰ | E-ISSN: 2345-5365

مقالهٔ پژوهشی

شناسایی و ارزیابی خطاهای سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین با استفاده از تکنیک CREAM و روش تجزیه و تحلیل درخت خطا

نوشین آتشفشان [۱]، محمد سعیدی مهرآباد [۲*]، حمیده رضوی [۳]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۲. استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۳. دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱
انتشار آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳

نویسندهٔ مسئول:
محمد سعیدی مهرآباد
استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
پست الکترونیک:
mehrabad@iust.ac.ir

برای دانلود این مقاله، کد زیر را با موبایل خود اسکن کنید.

کپی‌رایت © مجله ارگونومی؛ دسترسی آزاد؛ کپی برداری، توزیع و نشر برای استفاده غیرتجاری با ذکر منبع آزاد است.

خلاصه

زمینه و هدف: نادیده گرفتن نیروی انسانی در روند طراحی سیستم‌های انسان- ماشین به عنوان عاملی اثرگذار در وقوع حوادث شناخته شده است. این مطالعه با ارائهٔ راهکاری جهت تخمین عملکرد سیستم تعاملی انسان- ماشین به مهندسین اتوماسیون یاری می‌رساند تا بتوانند با در نظر گرفتن عوامل انسانی، سطح اتوماسیون مناسبی را در طراحی اعمال نمایند.

روش‌کار: مطالعهٔ حاضر تلفیقی از روش کمی جهت برآورد عملکرد کل سیستم و روش کیفی و مقطعی به منظور تخمین خطاهای انسانی می‌باشد که در اتاق کنترل نیروگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۹ انجام پذیرفته است. عملکرد سیستم تعاملی در سطوح مختلف اتوماسیون توسط تکنیک درخت خطا با اعمال همزمان عملکرد عامل انسانی، عملکرد ماشین و عوامل تأثیرگذار بر این دو، برآورد گردیده است. عملکرد عامل انسانی در این درخت خطا توسط روش CREAM تخمین زده شده است.

یافته‌ها: طراحی تمام‌اتوماتیک، با میانگین خطای ۰.۰۱۳ دارای کمترین نرخ خطا بوده که معادل $\frac{۱}{۸}$ نرخ خطای طرح تمام دستی است. طبق یافته‌های روش CREAM، افراد از متناسب بودن سیستم‌های انسان- ماشین و دستورالعمل‌های مدون برای برخی فعالیت‌ها رضایت چندانی ندارند. بنابراین افزایش نرخ خطای انسانی نسبت به ماشین امری منطقی است.

نتیجه گیری: قابلیت اطمینان بالای ماشین نسبت به عملکرد عامل انسانی باعث گردیده که طرح تمام‌اتوماتیک دارای کمترین نرخ خطا باشد. اما با توجه به ادبیات موضوع، انتخاب طرح تمام‌اتوماتیک به عنوان گزینهٔ نهایی معایبی به همراه دارد. در این پژوهش با حفظ سطح قابل قبولی از عملکرد سیستم، راهکارهایی جهت رفع این معایب بر اساس شاخص اهمیت پارامترهای کنترلی و ضرورت مشارکت عامل انسانی در فرآیندهای تصمیم‌گیری و اجرا، ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: سیستم تعاملی انسان- ماشین، تجزیه و تحلیل درخت خطا، سطح اتوماسیون، عملکرد عامل انسانی، روش CREAM

زمینه و هدف

در جامعهٔ کنونی امروز، سیستم‌های اتوماتیک در تمامی قشرهای زندگی بشر نفوذ کرده و عملکرد آن‌ها توانسته تأثیر بسزایی بر کیفیت زندگی انسان‌ها گذارد [۱]. سیستم‌های اتوماتیک معرف سیستم‌های تعاملی انسان- ماشینی هستند که در آن ماشین انجام کامل و یا بخشی از فعالیت‌هایی که قبلاً توسط انسان انجام می‌شده را بر عهده دارد [۳,۲]. بنابراین نقش انسان در اینگونه سیستم‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر کرده است. به عبارت دیگر، فعالیت‌های انسان از اجرای فعالیت‌های فیزیکی مانند باز/ بسته کردن شیرها و یا فعال‌سازی سوئیچ‌ها به فعالیت‌های فکری و شناختی مانند پایش، برنامه‌ریزی و حل مسائل تغییر یافته است [۴]. میزان تعلق نیروی انسانی در اجرای فعالیت‌ها به سطح اتوماسیون آن‌ها بستگی دارد که بواسطهٔ حل مسائل تخصیص وظایف (Function Allocation) مشخص می‌گردد.

ظهور مسائل تخصیص وظایف در سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین به سال ۱۹۵۱ در گزارش تهیه شده توسط

Fitts در زمینه کنترل ترافیک هوایی بر می‌گردد [۵]. از آن زمان تاکنون، مطالعات تحلیلی، تئوری و تجربی زیادی به مسائل تخصیص وظایف پرداختند که می‌توان آن‌ها را به دو گروه کلی تقسیم‌بندی نمود. تمرکز گروه اول بر قابلیت‌ها و توانایی هر یک از عوامل درگیر در سیستم تعاملی و بررسی مزایا و معایب انجام کارها توسط این عوامل بوده است. لیست Fitts به عنوان نقطهٔ شروع مسائل تخصیص وظایف، در این گروه جای می‌گیرد. این لیست دارای ۱۱ عبارت در مورد شرایطی که یک انسان یا یک ماشین در آن بهتر هستند، می‌باشد که به کمک آن می‌توان فعالیت‌هایی که بهتر است توسط ماشین اجرا گردند، مشخص می‌گردد. یکی از معایب تحقیقات جای گرفته در این گروه، تمرکز محققان بر رویکرد با مرکزیت تکنولوژی و متمایل به اتوماتیک کردن فعالیت‌ها تا جای ممکن است و تنها زمانی که سیستم طراحی و تکمیل شد، نیروی انسانی را در نظر می‌گیرند. در نتیجه، نیروی انسانی قادر به هماهنگی سریع و اثربخش با سیستم به ویژه در مواقع بروز مشکل، نمی‌باشد [۶]. تصادفات و اتفاقات دهه‌های اخیر از جمله اتفاقات بوقوع پیوسته در نیروگاه‌ها [۷]، تصادفات رخ داده در صنعت هوایی [۸]، خسارات ناشی از تصادف ماشین‌های خودکار [۹, ۱۰] همگی می‌توانند نمونه‌ای از این مساله باشند [۱۱,۲]. داده‌های مربوطه همچنین بیانگر این اصل است که اگرچه اتوماسیون، بویژه در سطوح بالای اتوماتیک، امکان تعداد خروجی بیشتر، کیفیت بهتر و ایمنی بالاتری را فراهم می‌نماید با این حال می‌تواند منجر به کاهش سطح هوشیاری اپراتور، بار کاری نامتعادل، خسران در سطح آگاهی از وضعیت و فراموشی شود [۱۳,۱۲]. این اثرات منفی اتوماسیون که در نتیجهٔ خروج اپراتور از سیکل کنترلی است، می‌تواند منجر به رخدادهای ناایمن گردد، به خصوص در شرایط غیرنرمال و پیش‌بینی نشده‌ای که نیاز به مداخلات انسان است [۱۴].

از طرف دیگر، تحقیقات نشان داده است که ۲۰-۵۰ درصد از تصادفات و رخدادهای بوقوع پیوسته ریشه در طراحی نادرست دارد [۱۵]. تاکنون، طراحان بیشتر تمرکز خود را بر بهبود قسمت‌های فنی و تکنولوژیکی سیستم‌های اتوماسیون گذاشته و مسائل انسانی مربوطه را نادیده گرفتند زیرا عقیده داشتند پیشرفت تکنولوژی و بدنبال آن ارتقای سیستم‌های اتوماتیک باعث حذف نیروی انسانی می‌شود. در حالی که خطای انسانی به عنوان یکی از اثرگذارترین عوامل در وقوع تصادفات در صنایع مختلف شناخته شده است [۱۷,۱۶]. در نتیجه، به منظور دستیابی به سطح ایمنی قابل قبول در سیستم‌های تعاملی انسان-ماشین لازم است علاوه بر در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ماشین، عملکرد انسان نیز در مراحل ابتدایی طراحی در نظر گرفته شود.

این امر منجر به ایجاد گروه دوم تحقیقات در زمینهٔ طراحی سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین با تمرکز بر قابلیت اطمینان انسان و مطالعهٔ عوامل اثرگذار بر تعامل انسان و ماشین گردید. از جمله مطالعات تأثیرگذار در این زمینه، می‌توان به چهارچوب کیفی ارائه شده توسط Parasuraman و همکاران اشاره کرد [۱۸]. آن‌ها یک مدل کیفی جهت تعیین نوع و سطح اتوماسیون با در نظرگرفتن عوامل تأثیرگذار بر عملکرد انسانی مانند بار فکری، آگاهی از وضعیت، اعتماد بیش از حد و کاهش مهارت به عنوان معیار ارزیابی اولیه و قابلیت اطمینان سیستم اتوماتیک و هزینه‌های حاصل از اجرای فعالیت‌ها به عنوان معیار ثانویه پیشنهاد نموده‌اند. با این وجود، نحوهٔ تعیین و کمی‌سازی وزن هر معیار ارزیابی نامشخص باقی ماند.

همچنین در این زمینه مطالعات کمی زیادی با اندازه‌گیری قابلیت اطمینان انسان بر اساس شاخص‌هایی چون بار کاری [۱۹, ۲۰]، آگاهی از وضعیت [۲۱, ۲۲] و اعتماد بین عوامل [۲۳, ۲۴] انجام گرفته است. با این حال مشابه گروه اول، این مطالعات نیز تمرکز خود را بیشتر بر روی یک عامل، نیروی انسانی؛ قرار داده‌اند و تعامل بین عوامل درگیر و اثراتی که هر یک بر دیگری می‌گذارد را نادیده گرفتند. در حالی که عملکرد سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین موجود در اتاق‌های کنترل وابسته به سخت‌افزارهای بکار رفته، نرم‌افزارها، نیروی انسانی و تعامل بین این سه عامل است [۲۵] که به جرأت می‌توان گفت تاکنون مطالعه‌ای که این عوامل را به طور همزمان در مسأله تخصیص وظایف در نظر گرفته باشد، مطرح نگردیده است. بنابراین در این پژوهش درصدد برآمدیم تا سطح مناسب اتوماسیون در سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین را به گونه‌ای تعیین نماییم که نه تنها عملکرد ماشینی بلکه عملکرد انسانی و عوامل تأثیرگذار بر آن نیز به‌طور همزمان در انجام این محاسبات سهیم باشند. بدین منظور، روشی جهت تخمین عملکرد سیستم تعاملی انسان- ماشین با در نظر گرفتن همزمان عملکرد انسان، ماشین و عوامل اثرگذار بر این دو، ارائه گردیده است. علاوه بر این، راهکارهایی جهت حفظ

قابلیت اطمینان سیستم در یک سطح قابل قبول و رفع معایب خروج عامل انسانی از حلقه کنترلی در سیستم‌هایی با سطوح اتوماسیون بالا، بر اساس شاخص اهمیت پارامترهای کنترلی و ضرورت مشارکت عامل انسانی در فرآیندهای تصمیم‌گیری و اجرا، ارائه شده است.

با وجود گسترهٔ وسیع کارکردی اتوماسیون در زندگی بشر، این پژوهش توجه خود را به یکی از حیاتی‌ترین و پرکاربردترین سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین موجود؛ سیستم کنترل توزیع شده در اتاق‌های کنترل معطوف می‌نماید. تعامل اپراتورهای اتاق کنترل با این سیستم کنترلی نمونه‌ای از یک سیستم تعاملی مهم در خط مقدم دفاع در شرایط غیرنرمال می‌باشد.

روش‌کار

مطالعهٔ حاضر تلفیقی از روش کمی جهت برآورد عملکرد کل سیستم تعاملی انسان- ماشین و روش کیفی و مقطعی به منظور تخمین خطاهای انسانی با استفاده از تکنیک CREAM در اتاق کنترل نیروگاه فردوسی مشهد انجام پذیرفته است. نیروگاه فردوسی مشهد به عنوان یک نیروگاه گازی از سوختن گاز طبیعی، الکتریسیته تولید می‌نماید و مانند سایر صنایع با قابلیت‌های بالای بروز تصادف، تمایل بسیار زیادی جهت تجزیه و تحلیل مسایل ایمنی در طول فرایند طراحی دارد [۲۶]. با توجه به اهمیت عملیاتی فرآیند تولید، هر اختلالی ممکن است ایمنی را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، شرایط و حالت‌های غیرنرمالی که در خلال فرایند تولید صورت پذیرد به عنوان سناریوهای غیرنرمال و محتمل‌الوقوع شناخته شده و دستورالعمل‌هایی جهت مدیریت و کنترل این سناریوها تدوین می‌گردد تا بتوان از بروز خسارات جانی و مالی تا جای ممکن جلوگیری نمود. در نتیجه، کنترل و مدیریت پارامترهای کنترلی تأثیرگذار از اهمیت بسزایی برخوردار است که بخش اعظمی از آن توسط سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین موجود در اتاق‌های کنترل این نیروگاه‌ها انجام می‌شود [۲۷]. در این بخش، مطالعات خود را به سناریوهای مربوط به دما و مقدار سوخت مخازن محدود می‌نماییم. با این حال، روند کار برای سایر سناریوها نیز مشابه است. به طور کلی، روند اجرایی روش کار پژوهش حاضر در شکل ۱ به نمایش گذاشته شده است.

گام اول) شناسایی سناریوهای ممکن و تحلیل سلسله مراتبی وظایف مرتبط با آن‌ها

سوخت موجود در مخازن نباید زیاد گرم، بیشتر از ℃ 40 و یا زیاد سرد، کمتر از ℃ 5، باشد. در صورتی که دمای سوخت بیشتر از ℃ 40 باشد، تولید به دلیل جلوگیری از صدمه دیدن پمپ تزریق متوقف شده و یا واحد به اصلاح تریپ می‌گردد. از طرف دیگر، دمای کم سوخت داخل مخزن باعث کاهش فشار و ایجاد محدودیت در ارسال سوخت خواهد شد. علاوه بر این، در صورتی‌که مقدار سوخت در مخزن که از طریق ارتفاع آن سنجیده می‌شود کمتر از 80 cm باشد، پمپ ارسال قابلیت ارسال سوخت کافی به واحد تولید را نخواهد داشت، بدین منظور جهت جلوگیری از آسیب رساندن به سایر قسمت‌ها خاموشی فوری به وقوع می‌پیوندد. در اکثر نیروگاه‌ها و سیستم‌های کنترلی وجود اختلال در متغیرهای حیاتی توسط سیستم آلارم‌دهی اعلام می‌شود. در این پژوهش فرض شده، سیستم آلارم‌دهی کاملاً پایا است.

بر اساس دستورالعمل‌های تعریف شده در نیروگاه فردوسی، وظایف سیستم تعاملی جهت مدیریت و کنترل سناریوهای غیرنرمال دو متغیر کنترلی دما و مقدار سوخت به شرح شکل ۲ است.

فرض کنید $S\ (P_i) = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_k\}$ مجموعه‌ای از سناریوهای غیرنرمالی است که برای پارامتر i (P_i) تعریف می‌شود که در آن k نشان‌دهندهٔ تعداد سناریوهای تعریف شده است. در صورتی‌که P_1 و P_2 به ترتیب نشان‌دهندهٔ پارامترهای کنترلی سطح سوخت و دمای سوخت باشند، بنابراین $S\ (P_1)$ و $S\ (P_2)$ معادل با $\{s_1\}$ و $\{s_2, s_3\}$ خواهد بود. اطلاعاتی نظیر شدت و احتمال وقوع سناریوها در میزان اهمیت آن‌ها جهت بررسی در تصمیم‌گیری‌ها ضروری است. شدت هر سناریو بر اساس عواملی از قبیل هزینه‌های جانی و مالی وارد شده به سازمان قابل محاسبه است. احتمال رخداد هر سناریو نیز بر اساس پایگاه داده‌های موجود به‌دست می‌آید.

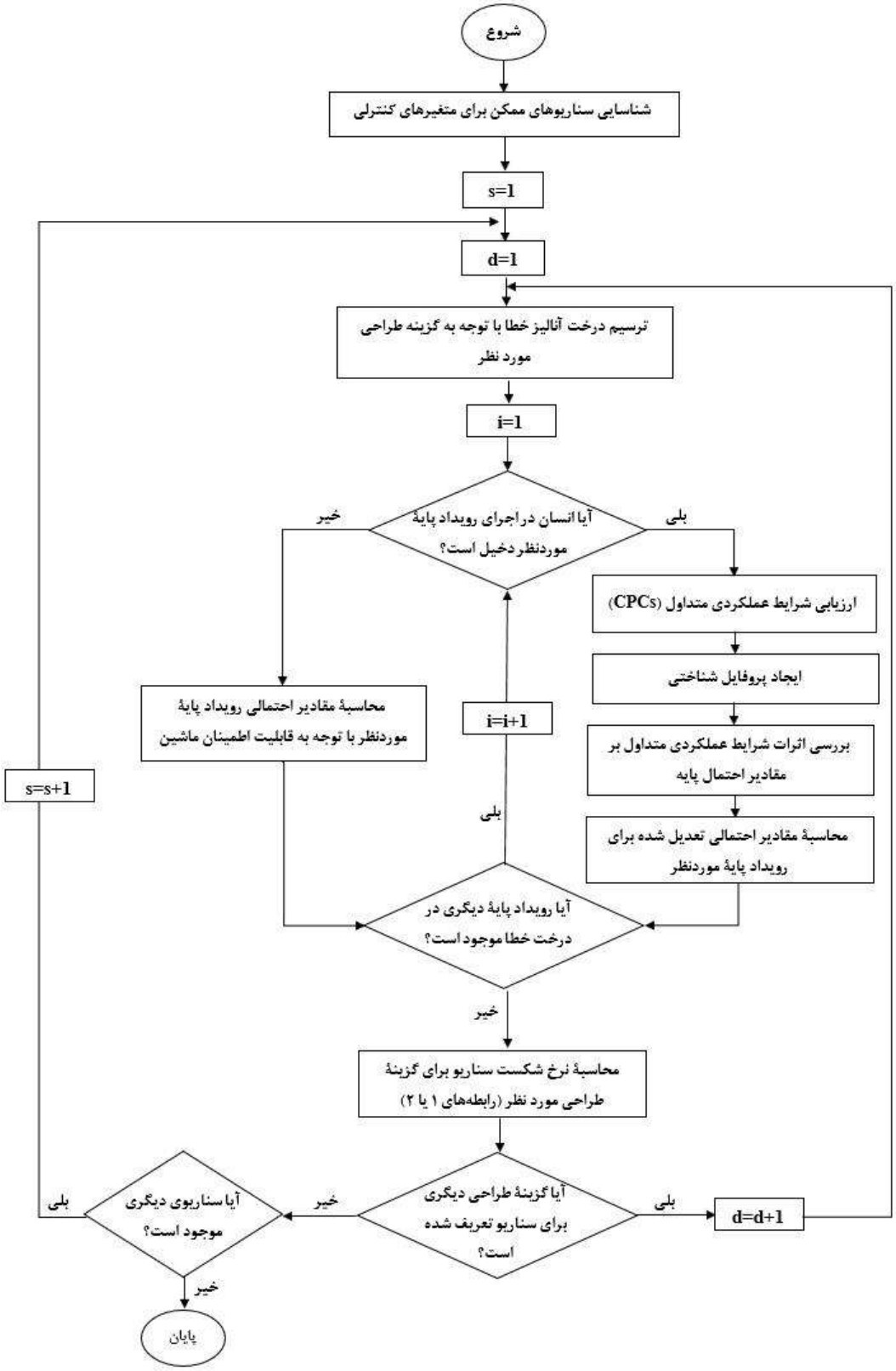
به منظور طراحی سیستم تعاملی می‌توان فعالیت‌های سناریوهای فوق را به چهار دسته‌ی کلی زیر تقسیم بندی نمود.

دسته‌ی اول- توجه به آلارم

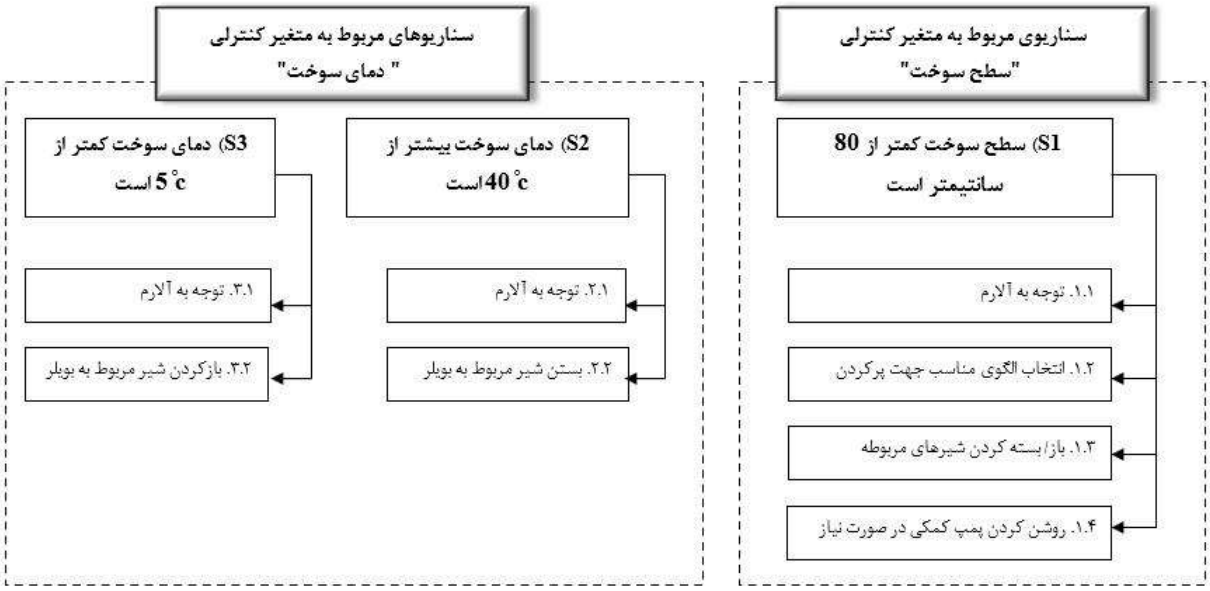
دسته‌ی دوم- انتخاب الگوی مناسب

دسته‌ی سوم- باز/ بسته کردن شیرها

دسته‌ی چهارم- نظارت بر عملکرد پمپ و فعال‌سازی پمپ دوم در صورت نیاز



شکل ۱. روند اجرایی روش کار پژوهش حاضر (S شمارندهٔ مربوط به سناریو، d شمارندهٔ مربوط به گزینه طراحی و i معرف تعداد رویدادهای پایه در هر درخت آنالیز خطا است)



شکل ۲. وظایف سیستم تعاملی جهت مدیریت و کنترل سناریوهای غیرنرمال مربوط به دما و مقدار سوخت

تیم طراح به منظور طراحی سیستم تعاملی جهت مدیریت سناریوهای فوق، ۸ گزینهٔ طراحی مختلف مطابق با جدول ۱ برای دسته فعالیت‌های موجود پیشنهاد داده است. به کمک روش ارائه شده در این پژوهش به‌دنبال آن هستیم که گزینه‌ای مناسب با حداقل ریسک تخصیص وظایف و با در نظر گرفتن عملکرد هر دو عامل انسان و ماشین، انتخاب نماییم.

جدول ۱. گزینه‌های طراحی پیشنهادی توسط تیم طراح

نام گزینه طراحی	توجه به آلارم (۱)	انتخاب الگو (۲)	بستن یا باز کردن شیرها و یا پمپ (۳)	نظارت بر عملکرد پمپ (۴)
گزینه ۱ (دستی)	دستی	دستی	دستی	**دستی**
گزینه ۲ (نیمه اتوماتیک)	تمام اتوماتیک	نیمه اتوماتیک	نیمه اتوماتیک	**نیمه اتوماتیک**
گزینه ۳ (تمام اتوماتیک)	تمام اتوماتیک	تمام اتوماتیک	تمام اتوماتیک	**تمام اتوماتیک**
گزینه ۴	تمام اتوماتیک	تمام اتوماتیک	نیمه اتوماتیک	**تمام اتوماتیک**
گزینه ۵	تمام اتوماتیک	دستی	نیمه اتوماتیک	**نیمه اتوماتیک**
گزینه ۶	دستی	دستی	تمام اتوماتیک	**نیمه اتوماتیک**
گزینه ۷	تمام اتوماتیک	دستی	تمام اتوماتیک	**نیمه اتوماتیک**
گزینه ۸	تمام اتوماتیک	دستی	تمام اتوماتیک	**تمام اتوماتیک**

گام دوم) مدل‌سازی عملکرد سیستم تعاملی موجود در مدیریت سناریوها

عملکرد یا قابلیت اطمینان یک سیستم نشان‌دهندهٔ اتکاپذیری، عملکرد موفقیت‌آمیز و نبود شکست و خرابی است [۲۸]. طراحان در مراحل ابتدایی طراحی، نیاز به تخمین قابلیت اطمینان سیستم تعاملی انسان- ماشین در سناریوها و شرایط مختلف دارند. بدین منظور، از روش شناخته شده و معروف آنالیز درخت خطا (Fault tree analysis (FTA)) که

مدلی گرافیکی از روابط منطقی بین خطا و علت‌های وقوع آن می‌باشد، استفاده می‌گردد که در آن وضعیت شکست سیستم به عنوان رویداد اصلی در نظر گرفته می‌شود [۲۹]. هر رویداد اصلی به واسطهٔ مجموعه‌ای از درگاه‌های منطقی (AND و یا OR) به رویدادهای پایه که معرف خطای انسانی، خطای ماشین و یا عوامل محیطی هستند، تجزیه می‌گردند [۳۰].

فرض کنید $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ مجموعه‌ای از رویدادهای پایه هستند. در صورتی‌که توزیع احتمالی رویدادهای ورودی $x_1, x_2, \dots, x_k$ به درگاه G مستقل از یکدیگر باشد، بنابراین می‌توان احتمال درگاه‌های AND و OR را به ترتیب بر اساس رابطه‌های ۱و ۲ تعریف نمود [۳۱].

(۱)

$$P[X_{AND}(x_1, x_2, \dots, x_k) = 1] = p[x_1 = 1 \wedge \dots \wedge x_k = 1] = p[x_1 = 1] \times p[x_1 = 1] \times \dots \times p[x_k = 1]$$

(۲)

$$P[X_{Or}(x_1, x_2, \dots, x_k) = 1] = 1 - P[X_{Or}(x_1, x_2, \dots, x_k) = 0] = 1 - p[x_1 = 0 \wedge \dots \wedge x_k = 0] = 1 - (1 - p[x_1 = 1]) \times \dots \times (1 - p[x_k = 1])$$

به طور نمونه، احتمال شکست سناریوی S در شکل ۳ طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

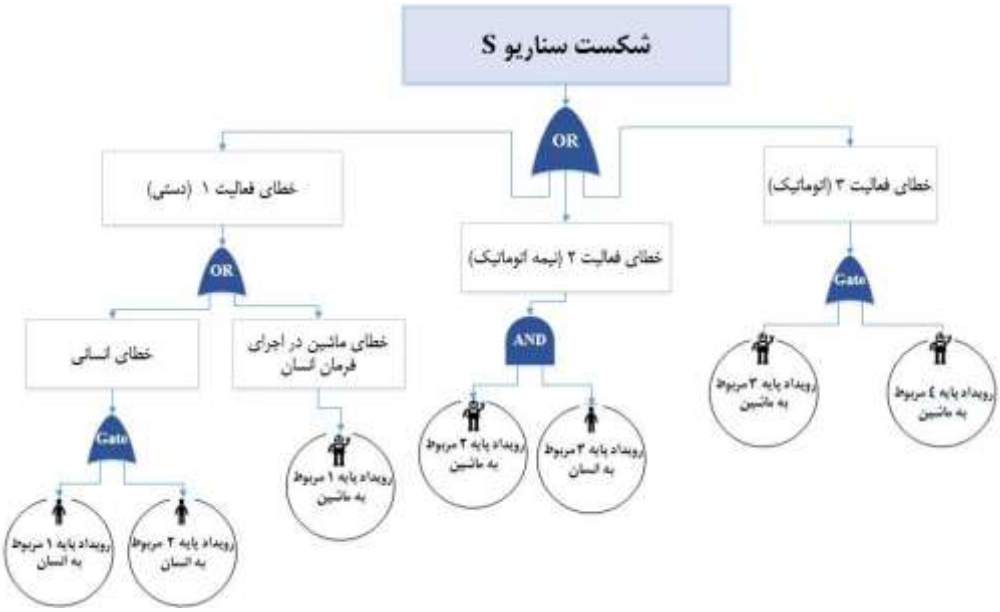
(۳)

$$FR(s) = 1 - [(1 - fr_{1,1}) \times (1 - fr_{2,2}) \times (1 - fr_{3,3})]$$

که در آن $FR(s)$ احتمال شکست سناریوی S و $fr_{i,j}$ معرف نرخ خطای فعالیت iام است که در سطح اتوماسیون j انجام می‌شود. $fr_{i,j}$ با توجه به احتمال رویدادهای پایه و درگاه‌های تعریف شده (روابط ۱ و ۲) قابل محاسبه است. به عنوان مثال، مقدار $fr_{2,2}$ از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌گردد (e_k احتمال رویداد پایه kام عامل انسان (h) و یا ماشین (m) است):

(۴)

$$fr_{2,2} = e_{m2} \times e_{h3}$$



شکل ۳: درخت خطای شماتیک با در نظر گرفتن نیروی انسانی در حلقه کنترلی

شایان توجه است که رویدادهای پایه بر اساس سطوح اتوماسیون (j) تعیین می‌شوند. بنابراین، همانطور که در شکل ۳ نیز نشان داده شده، درخت خطای در نظر گرفته شده به عنوان "درخت خطا با درنظر گرفتن نیروی انسانی در حلقه کنترلی (Human-in-the-loop Fault Tree)" شناخته می‌شود [۳۲]. با توجه به سطوح اتوماسیون ممکن، مقیاس سه سطحی به شرح زیر در این مطالعه در نظر گرفته شده است [۳۳]:

دستی ($j = 1$): معرف شرایطی است که در آن نیروی انسانی تصمیم‌گیری و اجرا را بر عهده دارد. لازم به ذکر است، در اتاق‌های کنترل دیجیتالی، در سطح اتوماسیون دستی، فرض شده که نیروی انسانی عامل اصلی در تصمیم‌گیری و اجرای فعالیت‌هایی مانند فشردن یک دکمه و یا صدور دستورات از طریق رابط کاربر است. با این حال، در سطح اتوماسیون دستی، همچنان عامل ماشین به خصوص اجزای مکانیکی در اجرای فرمان نیروی انسانی دخیل هستند.

نیمه اتوماتیک ($j = 2$): نشان‌دهندهٔ سطحی است که ماشین نقش کمکی در تصمیم‌گیری را ایفا می‌نماید و در صورت تأیید نیروی انسانی تصمیم را اجرا می‌نماید.

تمام اتوماتیک ($j = 3$): معرف شرایطی است که در آن ماشین فعالیت مربوطه را به طور کاملاً اتوماتیک انجام می‌دهد.

به طور کلی، همانطور که پیش از این نیز اشاره شد، سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین موجود در اتاق‌های کنترل متشکل از سخت‌افزار، نرم‌افزار و نیروی انسانی است. نرم‌افزارها اغلب وظیفهٔ پردازش اطلاعات و تصمیم‌گیری ماشین را بر عهده دارد.. سخت‌افزارها مانند پمپ، موتور، سیم، سنسور و انتقال‌دهنده‌ها لازم است در مدت زمانی طولانی به درستی و با پایایی بالا عمل نمایند. قابلیت اطمینان این دو عامل بر اساس پایگاه داده موجود و نظر متخصصان، مقداری ثابت و حداقل برابر با ۰.۹۹۵ (با توجه به نوع سخت‌افزاری/نرم‌افزاری و کارکردشان دارای مقادیر مختلفی هستند) در نظر گرفته شده است.

از سوی دیگر، نیروی انسانی به عنوان کنترل‌کننده ناظر عمل می‌نمایند که لازم است در سیکل کنترلی قرار داشته باشند. بنابراین درخت خطا با درنظر گرفتن نیروی انسانی در حلقه کنترلی، علاوه بر احتمال خرابی ماشین، احتمالات وقوع خطاهای انسانی و عدم تعامل مناسب بین آن‌ها را نیز در نظر می‌گیرد که در ادامه فرایند محاسبات عملکرد انسانی شرح داده می‌شود.

گام سوم) تخمین خطاهای انسانی در مدیریت سناریوها

انسان ذاتاً موجودی غیر قابل پیش‌بینی است و عملکرد آن تحت تأثیر عوامل مختلف سازمانی، محیطی و یا فردی قرار می‌گیرد. بنابراین، محاسبات رویدادهای پایه مربوط به نیروی انسانی به مراتب از رویدادهای پایهٔ مربوط به ماشین دشوارتر است. با این وجود روش‌های آنالیز قابلیت اطمینان انسان (Human Reliability Analysis (HRA)) در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته که منجر به تخمین کمی عملکرد انسان با در نظر گرفتن فاکتورهای ایجادکنندهٔ خطای انسانی و یا عوامل شکل‌دهندهٔ عملکرد (Performance Shaping Factors (PSF)) می‌گردد.

در این قسمت، از روش CREAM به منظور پیش‌بینی نرخ خطای انسانی و یا نرخ وقوع رویداد پایهٔ مربوط به انسان بهره گرفته می‌شود. این روش با تأکید بر قابلیت اطمینان شناختی انسان در سال ۱۹۹۸ توسط Hollnagel مطرح شد که از یک پشتوانه نظری مشروح با تمرکز بر زمینه‌های شناختی رفتار انسان برخوردار است [۱]. بر اساس روش CREAM، اصل تخمین احتمال خطای انسانی (HEP- Human Error Probability) برگرفته از میزان کنترل او بر شرایط است [۳۴]. این فرایند در دو نسخهٔ پایه و گسترده انجام می‌شود. در نسخهٔ پایه این روش، یک بازهٔ تقریبی از احتمال خطای انسانی و همچنین سطح کنترل انسان بر روی فعالیت مورد نظر تعیین می‌شود [۳۵]. نسخهٔ گسترده که از خروجی نسخهٔ پایه استفاده می‌نماید، به بررسی دقیق‌تر فعالیت‌ها یا بخشی از آن‌ها می‌پردازد.

از مهمترین مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان، یکپارچگی عوامل انسانی، تکنولوژیکی، سازمانی و ارائهٔ وجود ساختار نظام‌مند جهت تعریف و کمی‌سازی خطاهای انسانی به دو روش آینده‌نگر (پیش‌بینی خطای انسانی) و گذشته نگر (تجزیه و تحلیل رخدادها) است [۳۶, ۳۷]. در روش CREAM عوامل شکل‌دهندهٔ خطا در قالب مجموعه‌ای از دلایل ایجادکننده خطا تحت عنوان "شرایط عملکردی متداول (Common Performance Conditions)" شناخته می‌شوند. CPCها مشخصه‌های شرایطی را بیان می‌کنند که فعالیت در حال انجام شدن است از قبیل توانمندسازی سازمان، شرایط کار، متناسب بودن سیستم‌های انسان- ماشین و حمایت‌های عملیاتی مؤثر، قابلیت دسترسی به روش‌ها و برنامه‌ها، انجام دو یا چند کار به طور همزمان، زمان در دسترس برای انجام کار، کیفیت آموزش‌های موجود و تجربهٔ کاری و نحوهٔ همکاری و تعامل بین همکاران. (به منظور دسترسی به اطلاعات بیشتر می‌توان به کتاب راهنمای روش CREAM [۱] مراجعه نمود).

برای شناسایی و تعیین میزان اثر شرایط کاری مؤثر بر عملکرد اپراتور، پرسشنامه‌ای در مورد ۹ شرایط عملکردی متداول موجود در تکنیک CREAM، با قابلیت اطمینان ۰.۸۹۴ که با استفاده از روش ضریب آلفای کرونباخ به کمک نرم‌افزار SPSS به دست آمده، تهیه و تدوین شد. همچنین شاخص روایی محتوایی کلی پرسشنامه که توسط ۵ نفر از افراد خبره ارزیابی شده است معادل با ۰.۸۸۳ بوده که مقداری مناسب و قابل قبول می‌باشد. در این مطالعه روش نمونه‌گیری به صورت سرشماری بوده و پرسشنامه‌ها توسط مسئولین شیفت که جمعا ۱۵ نفر بودند، با میانگین سنی ۴۰ سال و

سابقهٔ کار حداقل ۵ سال، تکمیل شد. لازم به ذکر است با توجه به این‌که به طور کلی، نیروگاه فردوسی مشهد دارای ۱۵ مهندس شیفت می‌باشد (اپراتور اصلی اتاق کنترل)، بنابراین جامعه، تعداد افرادی که بتوانند بالقوه در فرایند ارزیابی شرکت کنند، معادل با ۱۵ نفر است که طبق فرمول کوکران، با ضریب خطای ۵ درصد، حداقل سایز نمونه معادل با ۱۴ نفر است که در این پژوهش هر ۱۵ نفر در فرایند ارزیابی شرکت کرده‌اند. به منظور سنجش نظر افراد از طیف ۵ تایی لیکرت برای هر سؤال استفاده شده. بعد از جمع‌آوری پرسشنامه‌ها از پاسخ‌ها میانگین گرفته شد. به دلیل این‌که برای CPCها به‌طور میانگین حداقل ۳ سؤال مطرح شده بود به منظور تحلیل نهایی، میانگین پاسخ‌های داده شده به سؤالات مربوط به هر متغیر مدنظر قرار گرفته است.

پس از تعیین میزان شرایط عملکردی متداول (CPCها) در مدیریت هر سناریو، در صورتی‌که رویداد مدنظر توسط انسان انجام شود، ارتباط این رویداد با کارکردهای شناختی شناسایی شده و در نهایت با اعمال اثر مقادیر CPC بر نرخ خطای فعالیت، میزان احتمال رویدادهای پایه مربوط به خطای انسانی برآورد می‌شود که یافته‌های حاصل در قسمت آتی ارائه شده است.

یافته‌ها

پس از جمع‌آوری پرسش‌نامه‌ها و میانگین‌گیری پاسخ‌ها، سطح هر یک از CPCها مطابق با جدول ۲ مشخص شد. در بین ۹ عامل مربوط به شرایط عملکردی متداول؛ عوامل شرایط کار، متناسب بودن سامانه‌ی انسان- ماشین، وجود دستورالعمل‌های مدون، انجام دو یا چند کار همزمان و وجود آموزش‌های مدون و تجربیات کافی به نوع فعالیت و تکنولوژی به‌کار رفته وابسته هستند [۱] که در این پژوهش، با توجه به مصاحبه‌ای که با مسئولین شیفت اتاق کنترل صورت گرفته، تنها اثر دو عامل متناسب بودن سامانهٔ انسان- ماشین و وجود دستورالعمل‌های مدون با توجه به نوع فعالیت، متفاوت در نظر گرفته شده که در جدول ۲ نیز این تفاوت قابل مشاهده است.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به شرایط عملکردی متداول در مدیریت سناریوهای مورد مطالعه در نیروگاه فردوسی مشهد

شرایط عملکردی متداول (CPCs)	سطح CPCs	اثر مورد انتظار بر روی سطح قابلیت اطمینان عملکرد
۱. توانمندی سازمانی	خیلی کارآمد	بهبود
۲. شرایط کار	عالی	بهبود
۳. متناسب بودن سامانه‌ی انسان- ماشین و حمایت موثر	توجه به آلارم: کافی	بی‌تأثیر
	انتخاب الگو: نامناسب	کاهش
	باز یا بستن شیرها: قابل تحمل	بی‌تأثیر
	نظارت بر پمپ: قابل تحمل	بی‌تأثیر
۴. وجود دستورالعمل‌های مدون	توجه به آلارم: قابل قبول	بی‌تأثیر
	انتخاب الگو: نامناسب	کاهش
	باز یا بستن شیرها: مناسب	بهبود
	نظارت بر پمپ: مناسب	بهبود
۵. انجام دو یا چند کار همزمان	کمتر از حد توان فردی	بهبود
۶. فشار زمانی	کافی	بهبود
۷. زمان انجام کار (ریتم سیرکاردین)	منظم	بهبود
۸. وجود آموزش‌های مدون و تجربیات کافی	کافی (با تجربه محدود)	بی‌تأثیر
۹. نحوه‌ی همکاری و تعامل بین همکاران	خوب	بی‌تأثیر

داده‌های حاصل از CPC نشان‌دهندهٔ این امر است که افراد در اتاق کنترل از متناسب بودن سیستم‌های انسان-ماشین رضایت چندانی ندارند و آن را به طور متوسط در وضعیت قابل تحمل توصیف کرده‌اند. از بین دسته فعالیت‌های ذکر شده، فعالیت انتخاب الگوی مناسب دارای دستورالعمل مدونی نیست و افراد با سعی و خطا و یا به‌طور سلیقه‌ای الگویی را جهت پر کردن مخازن انتخاب می‌نماید. این امر باعث می‌شود مقدار CPC مربوطه برای این دسته فعالیت به مقدار قابل ملاحظه‌ای در احتمال وقوع خطای رویدادهای پایه مربوط به این فعالیت تأثیر گذارد و آن را افزایش دهد.

در روش CREAM گسترده، برای فعالیت‌های مربوط به هر سناریو یک پروفایل شناختی تشکیل می‌شود که در آن، ارتباط چهار کارکرد اصلی شناختی مشاهده (Observation)، تفسیر (Interpretation)، برنامه‌ریزی (Planning) و اجرا (Execution) با فعالیت مورد نظر مشخص می‌گردد. پروفایل شناختی دسته فعالیت‌های شناسایی شده مطابق با جدول ۳ است. لازم به ذکر است که فعالیت‌های شناختی مرتبط با هر دسته فعالیت می‌تواند ترکیبی از چهار نوع کارکرد شناختی پایه باشند. به عنوان نمونه، پایش مستلزم تفسیر علاوه بر مشاهده است. پس از تعیین کارکردهای شناختی هر فعالیت، نوع خطاهای شناختی محتمل نیز تعیین می‌گردد.

جدول ۳. فعالیت‌های شناختی و کارکردهای مرتبط

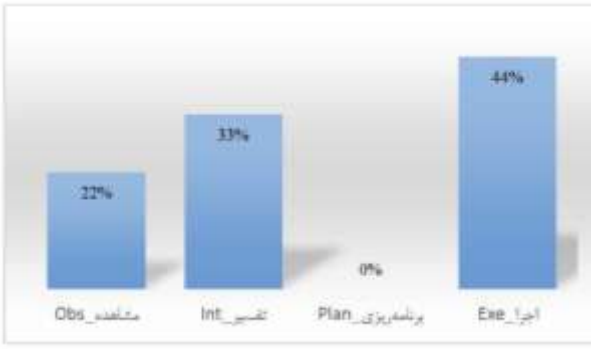
(۱).OBS معادل با Observation به معنای مشاهده، (۲).Int معادل با Interpretation به معنای تفسیر، (۳).Plan معادل با Planning به معنای برنامه‌ریزی و (۴).Exe معادل با Execution به معنای اجرا از چهار کارکردهای اصلی شناختی هستند.

نام دسته فعالیت	نوع فعالیت شناختی	نوع کارکرد شناختی			
		OBS[1]	Int[2]	Plan[3]	Exe[4]
توجه به آلارم و شناسایی علت آن	مشاهده (Observe): مشاهده و توجه به مقادیر متغیرهای کنترلی سیستم	۱			
انتخاب الگوی مناسب	ارزشیابی (Evaluation): برآورد یا ارزیابی موقعیت‌های سیستم بر اساس اطلاعات موجود و تدوین مجموعه‌ای از اقدامات جهت دستیابی کامل به اهداف از پیش تعیین شده		۱	۱	
باز/ بسته کردن شیرها	اجرا (Execute): انجام یک برنامه یا کار از قبل تعیین شده.				۱
نظارت بر عملکرد پمپ و روشن نمودن پمپ جایگزین در صورت لزوم	پایش (Monitor): پیگیری مجموعه فعالیتها و فرایندها در حین کار سیستم	۱	۱		
	اجرا (Execute) : انجام یک برنامه یا کار از قبل تعیین شده.				۱

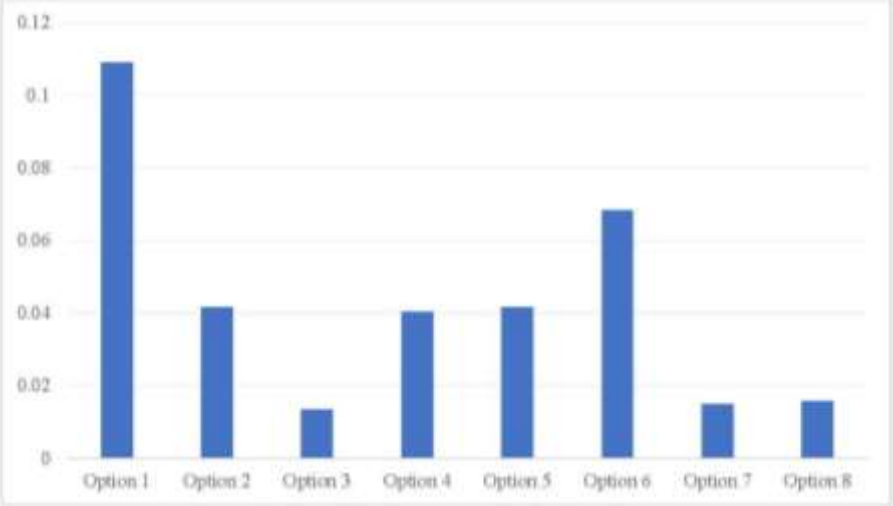
یافته‌های حاصل از روش CREAM گسترده (شکل ۴)، حاکی از آن است که به طور کلی بیشترین نسبت خطاهای محتمل در مدیریت دستی سناریوها مربوط به کارکرد شناختی "اجرا" می‌شود و "برنامه‌ریزی" دارای کمترین مقدار است. با توجه به نوع سناریوها و فرض متوالی انجام شدن فعالیت‌های آن‌ها و همچنین خطاهای محتمل کارکرد شناختی "برنامه‌ریزی" که متشکل از خطا در ترتیب انجام کار و نقص برنامه‌ریزی است، خیلی دور از انتظار نیست که برنامه‌ریزی دارای کمترین احتمال بروز خطا باشد. لازم به ذکر است ارزیاب در تعیین خطاهای شناختی برجسته‌ترین آن‌ها را بر می‌گزیند و این بدین معنا نیست که خطاهای برنامه‌ریزی به هیچ عنوان اتفاق نمی افتد.

پس از تشکیل پروفایل شناختی و تعیین نوع خطاهای ممکن، احتمال وقوع شکست سناریوها با توجه به گزینهٔ طراحی و با استفاده از درخت آنالیز خطا محاسبه می‌گردد. یافته‌ها نشان می‌دهند (شکل ۵) که گزینهٔ طراحی ۳، تمام اتوماتیک، با میانگین خطای ۰.۰۱۳ برای سناریوهای تعریف شده دارای کمترین نرخ بروز خطا و به مراتب بیشترین قابلیت اطمینان را برای سیستم تعاملی ایجاد می‌نماید. پس از آن، گزینه‌های طراحی ۷ و ۸ به ترتیب با احتمال خطای ۰.۰۱۵ و

۰.۰۱۶ دارای بیشترین قابلیت اطمینان هستند. در صورتی‌که نرخ بروز خطای گزینهٔ طراحی ۱، به عنوان یک طراحی دستی، با گزینهٔ ۳، معرف یک طراحی تمام اتوماتیک، مقایسه گردد، مشاهده می‌شود نرخ خطای گزینهٔ ۱ تقریبا ۸ برابر نرخ خطای گزینهٔ ۳ می‌باشد. این امر نشان‌دهندهٔ این ادعای مهندسین اتوماسیون است که سیستم‌های اتوماتیک با قابلیت اطمینان بالا، خطای انسانی و در نتیجه خطای کل سیستم را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند.



شکل ۴. نسبت خطاهای شناختی محتمل در مدیریت دستی سناریوها



شکل ۵: میانگین احتمال عدم موفقیت سناریوها در گزینه های طراحی مختلف

بحث

یافته‌های این پژوهش تأکیدی بر مزیت‌های ارزشمند سیستم‌های اتوماتیک نظیر ارتقای قابلیت اطمینان و کاهش نرخ خطای سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین بوده است. با توجه به این‌که قابلیت اطمینان ماشین حداقل ۰.۹۹۵ در نظر گرفته شده است، بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش همراستا با مطالعه Wickens و Dixon می‌باشد که نشان دادند در سیستم‌های تعاملی انسان- ماشین با قابلیت اطمینان بالای ۷۰ درصد برای ماشین، سطح اتوماسیون بالا، عملکرد قابل قبول سیستم را به همراه دارد [۳۸]. البته لازم به ذکر است، در این مطالعه و مطالعات [۱۷, ۳۹, ۴۰] ذکر گردیده که سطح بالای اتوماسیون منجر به کاهش آگاهی از وضعیت و مهارت فیزیکی نیروی انسانی می‌شود و او را در این حلقهٔ کنترلی به یک تصمیم‌گیرنده غیرفعال تبدیل می‌نماید. این امر به مرور نه تنها بر نظارت اپراتور تأثیر منفی می‌گذارد، بلکه در مواقع بروز مشکلات پیش‌بینی نشده، عملکرد او را به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین توصیه گردیده که نیروی انسانی، هر چند اندک در فعالیت‌های تصمیم‌گیری و یا اجرا دخیل شود. در نتیجه، گزینه‌های طراحی ۷ و ۸ که در آن‌ها فعالیت "انتخاب الگو" به عنوان یک فعالیت از نوع تصمیم‌گیری، به صورت دستی انجام می‌شود، می‌تواند به عنوان گزینه‌های بعدی طراحی سیستم تعاملی انسان- ماشین در مورد مطالعاتی مربوطه، انتخابی معقول باشد.

عـلاوه بر این، با توجه به این‌که یکی از مهمترین وظایف

نیروی انسانی در سیستم‌های تعاملی به ویژه در سطوح بالای اتوماسیون، نظارت بر وضعیت متغیرهای مختلف و کنترل آن‌ها جهت قرارگیری در محدودهٔ مشخصی است، می‌توان بر اساس اهمیت هر متغیر، که به حیاتی بودن سناریوهای مرتبط با آن بستگی دارد، نیروی انسانی را به نوعی درگیر کنترل دستی آن کرد. در مطالعه موردی اشاره شده، گزینهٔ طراحی ۳ که دارای کمترین میانگین نرخ خطا برای مدیریت سناریوهای تعریف شده است، را در نظر بگیرید. اهمیت پارامتر i که به صورت $imp(P_i)$ نیز نشان داده می‌شود را می‌توان معادل با میزان خسارت وارد شده در اثر شکست سناریوهای برآمده از این پارامتر و بر حسب رابطهٔ ۵ تعریف نمود.

(۵)

$$imp(P_i) = \sum_{s\in S(p_i)} Pro_s \times Sev_s \left(1 - \prod_{i\in I_s}\prod_j (1 - FR^t{}_j[i,s] \times X_j[i,s])\right)$$

که در آن $X_j[i,s]$ متغیر تصمیم از نوع باینری است که تصمیم در مورد اجرای فعالیت i از سناریوی s در سطح اتوماسیون j را نشان می‌دهد. سناریوهای تعریف شده (S) شرایط غیرنرمالی را تعریف می‌نماید که اتاق‌های کنترل دیجیتالی برای مدیریت آن‌ها لازم است مجموعه فعالیت‌های I_s را اجرا دهند. Sev_s شدت سناریوی s که معادل با حداکثر هزینه ایست که در نتیجه شکست سناریوی s به شرکت وارد می‌شود، Pro_s احتمال رخداد سناریوی s و $FR^t{}_j[i,s]$ نیز احتمال نرخ خطای حاصل از اجرای فعالیت i از سناریوی s $(i \in I_s)$ که در دورهٔ زمانی t در سطح اتوماسیون j انجام می‌شود. با توجه به این‌که فرض شده احتمال وقوع خطا در طول دوره‌های زمانی مختلف ثابت است، بنابراین می‌توان گفت $FR^t{}_j[i,s]$ برابر با $FR_j[i,s]$ است. با توجه به این‌که فرض شده است که سناریوها به طور همزمان بوقوع نمی‌پیوندند و فعالیت‌های هر سناریو باید به صورت متوالی انجام شوند، شکست سناریوی s معادل با عدم اطمینان حداقل یکی از فعالیت‌هایش است. همانطور که در قسمت گام اول روش کار مطرح گردید، $S(p_i)$ نیز معادل با مجموعه سناریوهای غیرنرمال برای پارامتر i (P_i) است.

این شاخص به طراحان کمک می‌نماید که متغیرهای کنترلی مهم که نیازمند هوشیاری و آگاهی از وضعیت بیشتری است را شناسایی کرده و از بروز حوادث غیرمتقربه جلوگیری کنند. این امر می‌تواند، به طور نمونه، به واسطهٔ گزارش‌گیری گاه و بیگاه وضعیت این نوع از متغیرها و ثبت آن‌ها توسط نیروی انسانی محقق گردد.

پژوهش حاضر می‌تواند به عنوان راهنمایی برای مهندسین اتوماسیون جهت تعیین سطح اتوماسیون فعالیت‌ها در مرحله طراحی مورد استفاده قرار گیرد که برخلاف مطالعات گذشته عملکرد عوامل انسانی، عملکرد ماشین و عوامل تأثیرگذار بر تعامل این دو عامل را به‌طور همزمان در این تصمیم‌گیری اعمال می‌کند. با این وجود، محدودیت‌ها و کاستی‌هایی در این زمینه وجود دارد که امید است در تحقیقات آتی رفع گردد. وقوع همزمان چندین سناریو می‌تواند تأثیر بسزایی در میزان بار کاری وارد شده بر نیروی انسانی و در نتیجه عملکرد او گذارد و تصمیمات مربوط به تعیین سطح اتوماسیون را تحت تأثیر قرار دهد که لازم است نحوه پیاده‌سازی آن در این نوع از مسائل مورد تحقیق و بررسی بیشتر قرار گیرد. عدم ثبات قابلیت اطمینان عوامل اعم از انسان و ماشین در طول زمان از جمله مواردی است که در این تحقیق در نظر گرفته نشده است. همچنین عملکرد ماشین در این پژوهش با توجه به اطلاعات موجود به صورت یک عدد تخمین زده شده است. در حالی که عملکرد ماشین در سیستم‌های تعاملی اتاق کنترل شامل عملکرد سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای تشکیل‌دهندهٔ آن است که به طور تخصصی‌تر می‌تواند بررسی گردد. توسعه درخت خطای ارائه شده به نمودار Bow-tie و اعمال پیامدهای هر گزینه طراحی در تصمیم‌گیری می‌تواند تأثیر برجسته‌تری در کاهش ریسک وقوع حوادث گذارد.

نتیجه گیری

با توجه به گفتهٔ Price و Pulliam؛ "تعامل انسان با تکنولوژی یکی از جالب‌ترین بخش‌های تاریخ زندگی بشر است؛ از نیاز انسان به تکنولوژی به عنوان ابزاری برای زنده ماندن شروع می‌شود، تا به الان که تبدیل به یک مشارکت همزیستی شده که شکل نهایی آن را نمی‌توان پیش‌بینی کرد. این رابطهٔ پویا با دلهرهٔ مستمر انسان از احتمال آسیب‌رسانی توسط ماشین‌آلات همراه بوده است"[۴۱]. بدون شک، دنیا جای بهتری خواهد اگر طراحان با توجه به محدودیت‌های موجود، سیستم‌هایی را طراحی و ایجاد نمایند که مطمئن و ایمن باشد و کمترین آسیب را به بشریت وارد نماید.

تشکر و قدردانی

نویسندگان نهایت سپاس و قدردانی را خدمت تمامی کسانی که در تدوین این پژوهش یاری رساندند، به ویژه کارکنان بخش اتاق کنترل نیروگاه فردوسی مشهد، ابراز دارند.

تعارض در منافع

بین نویسندگان هیچ گونه تعارضی در منافع وجود ندارد.

منابع مالی

تمام هزینه‌های این مطالعه بر عهده نویسندگان بوده است.

References

1. Hollnagel E. Cognitive reliability and error analysis method (CREAM): Elsevier; 1998.
2. Janssen CP, Donker SF, Brumby DP, Kun AL. History and future of human-automation interaction. International Journal of Human-Computer Studies. 2019;131:99-107. [DOI:10.1016/j.ijhcs.2019.05.006] [PMID]
3. Parasuraman R. Designing automation for human use: empirical studies and quantitative models. Ergonomics. 2000;43(7):931-51. [DOI:10.1080/001401300409125] [PMID]
4. Hancock PA. Human Performance in Automated and Autonomous Systems, Two-Volume Set. 2019.
5. Fitts PM. Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system. 1951.
6. Pacaux-Lemoine M-P, Trentesaux D, Rey GZ, Millot P. Designing intelligent manufacturing systems through Human-Machine Cooperation principles: A human-centered approach. Computers & Industrial Engineering. 2017;111:581-95. [DOI:10.1016/j.cie.2017.05.014] [PMID]
7. Schmitt K. Automations influence on nuclear power plants: a look at three accidents and how automation played a role. Work. 2012;41 (Supplement 1):4545-51. [DOI:10.3233/WOR-2012-0035-4545] [PMID]
8. Johnson AW, Oman CM, Sheridan TB, Duda KR, editors. Dynamic task allocation in operational systems: Issues, gaps, and recommendations. 2014 IEEE Aerospace Conference; 2014: IEEE. [DOI:10.1109/AERO.2014.6836205] [PMID]
9. Canellas M, Haga R. Unsafe at any level. Communications of the ACM. 2020;63(3):31-4. [DOI: 10.1145/3342102] [PMID]
10. Leggett T. Who is to blame for 'self-driving car' deaths? 2018 [Available from: https://www.bbc.com/news/business-44159581.
11. Kaber DB, Endsley MR. Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. Process Safety Progress. 1997;16(3):126-31. [DOI:10.1002/prs.680160304] [PMID]
12. Porthin M, Liinasuo M, Kling T. Effects of digitalization of nuclear power plant control rooms on human reliability analysis–A review. Reliability Engineering & System Safety. 2020;194:106415. [DOI:10.1016/j.ress.2019.03.022] [PMID]
13. Hogenboom S, Rokseth B, Vinnem JE, Utne IB. Human reliability and the impact of control function allocation in the design of dynamic positioning systems. Reliability Engineering & System Safety. 2020;194:106340. [DOI:10.1016/j.ress.2018.12.019] [PMID]
14. Parasuraman R, Riley V. Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. Human factors. 1997;39(2):230-53. [DOI: 10.1518%2F001872097778543886] [PMID]
15. Taylor JR. Statistics of design error in the process industries. Safety science. 2007;45(1-2):61-73. [DOI:10.1016/j.ssci.2006.08.013] [PMID]
16. Ashrafi M, Davoudpour H, Khodakarami V. A Bayesian network to ease knowledge acquisition of causal dependence in CREAM: application of recursive noisy-OR gates. Quality and Reliability Engineering International. 2017;33(3):479-91. [DOI:10.1002/qre.2021] [PMID]
17. Iqbal MU, Srinivasan R. Simulator based performance metrics to estimate reliability of control room operators. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018;56:524-30. [DOI:10.1016/j.jlp.2017.10.011] [PMID]
18. Parasuraman R, Sheridan TB, Wickens CD. A model for types and levels of human interaction with automation. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans. 2000;30(3):286-97. [DOI:10.1109/3468.844354] [PMID]
19. Wang P, Fang W, Guo B, Bao H, editors. Apply petri nets to human performance and workload prediction under multitask. International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics; 2017: Springer.
20. Balfe N, Sharples S, Wilson JR. Impact of automation: Measurement of performance, workload and behaviour in a complex control environment. Applied ergonomics. 2015;47:52-64. [DOI:10.1016/j.apergo.2014.08.002] [PMID]
21. Johnson AW, Duda KR, Sheridan TB, Oman CM. A closed-loop model of operator visual attention, situation awareness, and performance across automation mode transitions. Human factors. 2017;59(2):229-41. [DOI:10.1177/0018720816665759] [PMID]
22. Li P-c, Zhang L, Dai L-c, Li X-F. Study on operator's SA reliability in digital NPPs. Part 3: A quantitative assessment method. Annals of Nuclear Energy. 2017;109:82-91. [DOI:10.1016/j.anucene.2017.05.019] [PMID]
23. Jiao J, Zhou F, Gebraeel NZ, Duffy V. Towards augmenting cyber-physical-human collaborative cognition for human-automation interaction in complex manufacturing and operational environments. International Journal of Production Research. 2020;58.111-5089(16). [DOI:10.1080/00207543.2020.1722324] [PMID]
24. 24. Schaefer KE, Chen JY, Szalma JL, Hancock PA. A meta-analysis of factors influencing the development of trust in automation: Implications for understanding autonomy in future systems. Human factors. 2016;58(3):377-400. [DOI:10.1177/0018720816634228] [PMID]
25. Ramos MA, Thieme CA, Utne IB, Mosleh A. A generic approach to analysing failures in human–System interaction in autonomy. Safety science.

2020;129:104808. [DOI:10.1016/j.ssci.2020.104808] [PMID]
26. Simonsen E, Osvalder A-L. Categories of measures to guide choice of human factors methods for nuclear power plant control room evaluation. Safety science. 2018;102:101-9. [DOI:10.1016/j.ssci.2017.10.006] [PMID]
27. Zoaktafi M, Zakerian SA, Choobine A, Nematolahi S. Validation of a Task Demand Measure (VACP) for Predicting Mental Workloads of Control Room Operators (A Case Study: Pars Combined Cycle Power Plant). Iranian Journal of Ergonomics. 2016;4(3):26-32.
28. Blischke WR, Murthy DP. Reliability: modeling, prediction, and optimization: John Wiley & Sons; 2011.
29. Signoret J-P, Leroy A. Fault Tree Analysis (FTA). Reliability Assessment of Safety and Production Systems: Springer; 2021. p. 209-25.
30. Doytchev DE, Szwillus G. Combining task analysis and fault tree analysis for accident and incident analysis: a case study from Bulgaria. Accident Analysis & Prevention. 2009;41(6):1172-9. [DOI:10.1016/j.aap.2008.07.014] [PMID]
31. Ruijters E, Stoelinga M. Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. Computer science review. 2015;15:29-62. [DOI:10.1016/j.cosrev.2015.03.001] [PMID]
32. Yanjun Z, Youchao S, editors. Safety Risk Assessment of Human-Machine Interaction Behavior in Cockpit. 2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design; 2014: IEEE. [DOI:10.1109/ISCID.2014.150] [PMID]
33. Sheridan TB, Verplank WL. Human and computer control of undersea teleoperators. Massachusetts Inst of Tech Cambridge Man-Machine Systems Lab; 1978.
34. Kim MC, Seong PH, Hollnagel E. A probabilistic approach for determining the control mode in CREAM. Reliability Engineering & System Safety. 2006;91(2):191-9. [DOI:10.1016/j.ress.2004.12.003] [PMID]
35. Konstandinidou M, Nivolianitou Z, Kiranoudis C, Markatos N. A fuzzy modeling application of CREAM methodology for human reliability analysis. Reliability Engineering & System Safety. 2006;91(6):706-16. [DOI:10.1016/j.ress.2005.06.002] [PMID]
36. Shirali GA, Hosseinzadeh T, Kalhori SRN. Modifying a method for human reliability assessment based on CREAM-BN: A case study in control room of a petrochemical plant. MethodsX. 2019;6:300-15. [DOI:10.1016/j.mex.2019.02.008] [PMID]
37. Mohammadfam I, Movafagh M, Soltanian A, Salavati M, Bashirian S. Identification and evaluation of human errors among the nurses of coronary care unit using CREAM techniques. Iranian Journal of Ergonomics. 2014;2(1):27-35.
38. Wickens CD, Dixon SR. The benefits of imperfect diagnostic automation: A synthesis of the literature. Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2007;8(3):201-12. [DOI:10.1080/14639220500370105] [PMID]
39. Yang Z, Bonsall S, Wall A, Wang J, Usman M. A modified CREAM to human reliability quantification in marine engineering. Ocean engineering. 2013;58:293-303. [DOI:10.1016/j.oceaneng.2012.11.003] [PMID]
40. Salvendy G, Karwowski W. Handbook Of Human Factors and Ergonomics. 5 ed: John Wiley & Sons; 2021.
41. Price H, Pulliam R. The allocation of functions in man-machine systems. 1982.