International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2015)
March 2015, Volume 26, Number 4
pp. 445-454

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

# ASSESSMENT OF HUMAN ERROR AND IMPACT OF LEARNING THEORY ON RELIABILITY OF TEHRAN RESEARCH REACTOR COOLING SYSTEM

**Sajjad Bahrebar, Kamran Sepanloo*& Sima Rastayesh**

***Sajjad Bahrebar,*** *Master Students, Engineering Department of Science and Research Branch ,Islamic Azad university, Tehran Iran*
***Kamran Sepanloo,*** *Assistant Professor, Atomic Energy Organization of Iran*
***Sima Rastayesh,*** *Master Students, Engineering Department of Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran Iran*

**Keywords**

**Human Error,**
**Learning,**
**Heart method,**
**Tehran Research Reacto**

**ABSTRACT**

*The high percentage of share of human error in the occurrence of accidents in large complex socio-technological systems such as nuclear power plants caused more automation and less human intervention in new designs. However, humans due to flexibility, quick versatility and most important learning must be kept in these systems. Learning is an experience based on training making changes in perceptions, habits, thoughts, and ultimately performance. In this paper by utilizing HEART method human error is quantified and its impact on failure probability of components in Tehran research reactor cooling water system assessed. The calculations include evaluation of learning impact on reduction of human error probability using innovative method of 22 criteria. The results are notably interesting especially in critical conditions. Achieved results of probabilities for four probable accidents in the reactor, i.e. LOCA, LOFA, LOHA and LOOP are compared for two cases of exclusion (classic) and inclusion of human learning. The probabilistic safety assessment computer code, RELAB, introduced by Atomic Energy Organization of Iran is applied to quantify the developed fault trees and by which the most affecting components on total reliability of the reactor cooling system are identified. The results are benchmarked through comparison with relevant available.*

**© 2016 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 26, No. 4, All Rights Reserved**

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۴، جلـــد ۲۶، زمستان ۱۳۹۴

صفحـــه۴۵۴ -۴۴۶

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

# تحلیل اثربخشی خطای انسانی و تئوری یادگیری در قابلیت اطمینان سیستم خنک‌کننده راکتور تحقیقاتی تهران

سجاد بهربر، کامران سپانلو* و سیما رستایش

**کلمات کلیدی**

**خطای انسانی،**
**یادگیری،**
**روش HEART،**
**راکتور تحقیقاتی تهران**

**چکیده:**

با بررسی سهم خطای انسانی در احتمال وقوع حوادث در صنایع مختلف، می‌توان نقش اساسی انسان را در افزایش یا کاهش ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم به وضوح مشاهده کرد. اگرچه کاربرد سیستم‌های کامپیوتری از موارد ساده تا تشخیص الگوهای پیچیده که قدرت پردازشی بیشتری را دارند، پیشرفت کرده است، اما با این حال انسان به دلیل برخی ویژگی‌ها همچون نوآوری، قابلیت انعطاف و تطبیق پذیری و از همه مهمتر بحث یادگیری، در صنایع پیچیده و حساس نگه داشته شده است. با در نظر گرفتن معیارهای یادگیری همچون تغییر در حافظه، ادراک، تشخیص، نحوه تفکر و عملکرد انسان، می‌توان به وضوح میزان کاهش یافته احتمال خطاهای انسانی در وظایف مختلف در سیستم‌های صنعتی بالقوه خطرناک همچون راکتورهای هسته ای را مشاهده کرد. در این مقاله با روشی ابتکاری به مهندسی یادگیری در ارزیابی خطای انسانی برای وظایف اصلی موجود در راکتور تحقیقاتی تهران برای چهار حادثه مهم هسته ای، با استفاده از روش HEART و آنالیز درخت خطا در کد RELAB پرداخته شده است. صحت روش به کار رفته و احتمال کلی بروز حوادث با نتایج حاصل از داده‌های ژنریک همخوانی کامل دارد.

## ۱. مقدمه

بسیاری از حوادث بزرگ نظیر انفجار سفینه فضاپیمای چلنجر، حادثه ذوب قلب نیروگاه هسته ای TMI و حادثه انفجار راکتور چرنوبیل که پیامدهای ناگوار اجتماعی، سیاسی، اقتصادی و بهداشتی آن سراسر جهان را تحت تاثیر خود قرار داده، به خطای انسانی نسبت داده شده است. با بررسی و تحقیقات متعدد در این زمینه، معلوم شده است که اکثر این حوادث در اثر ترکیب بسیاری از عوامل که ریشه در عدم لحاظ کردن فاکتورهای انسانی و تاثیر گذاری انسان دارند، به وجود آمده‌اند. درصد بالای سهم خطای انسانی در وقوع حوادث در سیستم‌های پیچیده بزرگ به خصوص نیروگاه‌های هسته ای، این نتیجه را در بر داشته که خطای انسانی عامل عمده حوادث و پیامدهای ناگوار آنها می‌باشد.

بررسی حوادث چند دهه اخیر در سیستم‌های بزرگ و پیچیده، روشن ساخته است که چگونه خطاهای انسانی می‌تواند تمهیدات مهندسی پیش بینی شده در این سیستم‌ها را بی اثر سازد. همچنین این امر نیاز به طراحی بهتر سیستم‌های واسطه انسان - ماشین را مشخص ساخته است. خطاهای انسانی نه تنها فراموشی در اجرای یک دستورالعمل یا اجرای غلط آن است بلکه شامل خطا در انجام پروسه‌های ذهنی تشخیص و تصمیم گیری نیز می‌شود که شامل طبقه بندی‌ها و تئوری‌های متفاوتی است. [۱] با این وجود انسان‌ها به دلیل برخی ویژگی‌ها همچون نوآوری، تشخیص ارتباط منطقی بین داده‌های پراکنده، قابلیت انعطاف، تطبیق پذیری سریع و از همه مهمتر بحث یادگیری و تجربه پذیری، در صنایع پیچیده و حساس نگه داشته شده‌اند.

به طور کلی مشخص شده است که مهارت‌ها، استدلال‌ها، نگرش‌ها و عملکردهای انسانی از لحاظ تغییر و تحول، تا حد زیادی به رویدادهایی وابسته‌اند که یادگیری نامیده می‌شوند. در اثر یادگیری همه ما به آن چه که هستیم رسیده ایم. ما آموخته ایم که عادت‌های زندگیمان، گنجینه‌های معلوماتمان، مهارت‌ها و

**تاریخ وصول: ۹۲/۰۶/۱۳**

**تاریخ تصویب: ۹۲/۱۱/۲۹**

**سجاد بهربر**، دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، s.bahrebar@srbiau.ac.ir

**سیما رستایش**، دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات ،تهران، ایران، s.rastayesh@srbiau.ac.ir

*نویسنده مسئول مقاله: **دکتر کامران سپانلو**، استادیار پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، ksepanloo@aeoi.ac.ir

عملکردهایمان را که موجب تفاوت و تمایز ما با دیگران است، می‌تواند با یادگیری تغییر یابد [۲].

یادگیری از مفاهیمی است که از سوی صاحب نظران تعاریف متعددی برای آن ارائه شده است. گاهی یادگیری را تجربه ای مبتنی بر آموزش که به منظور ایجاد تغییر نسبتاً پایدار در انسان صورت می‌گیرد تعریف می‌کنند که این یادگیری از تجربه ناشی می‌شود و نمی توان آن را به حالت‌های موقتی جسمانی مانند آن چه بر اثر بیماری و یا خستگی در انسان ایجاد می‌شود و یا تغییرات ناشی از رشد و بلوغ انسانی، نسبت داد. یادگیری تغییر در رفتار است و تغییر در رفتار از تجربه حاصل می‌شود. یعنی این که تنها تغییراتی را در رفتار، می‌توان ناشی از یادگیری دانست که حاصل تجربه باشد. [۳-۴]

در این مقاله با ترسیم درخت خطا برای هر یک از حوادث مهم در راکتور تحقیقاتی تهران، به بررسی دقیق اجزاء و زیر سیستم‌های مختلف راکتور و میزان دخالت خطای انسانی و نوع وظایف موجود در بروز رویدادهای پایه مختلف جهت رسیدن به رویداد راس (بروز حادثه) پرداخته شده است. با به کارگیری روش HEART[1] به بدست آوردن احتمال کمی خطای انسانی در سه وظیفه اصلی موجود در راکتور تحقیقاتی تهران که شامل بازرسی، تعمیراتی و اپراتوری راکتور بوده و یک حالت اپراتوری در شرایط اضطراری، جهت درک هرچه بیشتر لزوم تاثیر یادگیری و کمی سازی آن پرداخته شده است. جهت کمی سازی یادگیری روشی ابداعی(۲۲ معیاره) ارائه گردیده است. برای ارزیابی احتمال بروز رویداد رأس، چه در حالت کلاسیک (بدون در نظر گرفتن خطای انسانی) با نرخ خرابی ثابت و چه در حالت تاثیر پذیری اجزا از خطای انسانی و به تبع آن تغییر عملکرد مناسب‌تر از بحث یادگیری، از کد محاسباتی تحلیل احتمالات ایمنی و قابلیت اطمینان (RELAB) استفاده کرده ایم. در ادامه به بیان روش بدست آوردن احتمال رویداد راس درخت خطا[2] در کد RELAB و روش ارزیابی خطای انسانی و بدست آوردن احتمال آن از روش HEART پرداخته و سپس به ارائه تئوری یادگیری و روش ابداعی در کمی سازی آن با کمک روش HEART در بدست آوردن احتمال بروز ۴حادثه مهم در راکتور تحقیقاتی تهران پرداخته ایم. در نهایت مقایسه نتایج بدست آمده از این روش در احتمال بروز حوادث با داده‌های ژنریک و راکتورهای مشابه، جهت ارزیابی درستی محاسبات صورت گرفته است.

## ۲. کد RELAB

کد محاسباتی احتمالاتی ایمنی و قابلیت اطمینان RELAB مشابه کد SAPHIRE[3] بوده و با استفاده از مجموعه‌های برشی کمینه[4]، احتمال رویداد رأس درخت خطا را محاسبه می‌کند. در این کد با استفاده از مجموعه‌های برشی کمینه بدست آمده و تغییر مقادیر پارامترها، تحلیل حساسیت و میزان اهمیت اجزاء نیز انجام می‌شود.

### ۲-۱. مجموعه‌های برشی و الگوریتم MOCUS[5]

مجموعه برشی به ترکیبی از رویدادهای پایه در یک درخت خطا اطلاق می‌شود که وقوع آنها منجر به وقوع رویداد رأس درخت خواهد شد. تعدادی از این مجموعه‌های برشی با حذف چند رویداد پایه از آنها، هنوز هم ممکن است منجر به وقوع رویداد رأس شوند. این مسئله نشان دهنده این است که زیر مجموعه ای از آن مجموعه برشی وجود دارد که آن هم منجر به وقوع رویداد رأس می‌شود. در نتیجه براساس قوانین جبر بولی، مجموعه اصلی را باید حذف کرد و زیرمجموعه آن را در نظر گرفت. به این مجموعه‌های برشی که هیچکدام از آنها زیر مجموعه دیگری نیست، مجموعه برشی کمینه می‌گویند. [۱۷]

روش‌های مختلفی برای بدست آوردن مجموعه‌های برشی در درخت خطا وجود دارند که هر کدام دارای مزایا و معایبی می‌باشند. در کد محاسباتی RELAB از الگوریتم MOCUS برای یافتن مجموعه‌های برشی استفاده می‌شود. این الگوریتم یکی از شناخته شده‌ترین روش‌ها در پیدا کردن مجموعه‌های برشی یک درخت خطا می‌باشد و بیشترین استفاده را در روش‌های محاسباتی تحلیل درخت خطا دارد. روش کار در الگوریتم MOCUS بدین صورت است که با شروع از رویداد رأس در صورت برخورد به گیت AND، ورودی‌های آن را در ستون‌های جداگانه نوشته و برای هر کدام از ورودی‌های گیت OR یک سطر جدید ایجاد می‌کند.

### ۲-۲. روش‌های تقریبی REA[6] و MCUB[7]

پس از آنکه مجموعه‌های برشی کمینه و احتمال وقوع هر کدام از آنها محاسبه شد، آنگاه در این کد احتمال رویداد رأس درخت خطا به دو روش تقریب رویداد نادر (REA) و روش باند بالای مجموعه برشی کمینه (MCUB) محاسبه می‌شود. مقدار تقریبی احتمال رویداد رأس درخت خطا با استفاده از تقریب REA مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود که فرض اصلی در این روش صرفه نظر کردن از اشتراک بین مجموعه‌های برشی کمینه می‌باشد. (مجموعه برشی کمینه= $C_i$ و تعداد رویدادهای پایه عضو مجموعه برشی کمینه= m.)

$$P = \sum_{i=1}^{m} C_i \qquad (۱)$$

در تقریب MCUB از بسط کامل سیلوستر-پوانکاره[8] استفاده می‌شود. در صورتی که، تمامی مجموعه‌های برشی کمینه درخت خطا از همدیگر مستقل باشند. این روش منجربه نتایج دقیق‌تری برای احتمال رویداد رأس خواهد بود. نحوه محاسبه رویداد رأس درخت خطا با استفاده از این تقریب در رابطه زیر به شکل ساده نمایش داده شده است [۱۸].

$$P = 1 - \prod_{i=1}^{m}(1 - C_i) \quad (۲)$$

## ۳. روش HEART

روش تشخیص و کاهش خطای انسانی (HEART)، یکی از روش‌های ارزیابی خطای انسانی می‌باشد که در کمی‌سازی خطای انسانی درنیروگاه‌های هسته‌ای، پالایشگاه‌ها، صنایع شیمیایی و پتروشیمی بکار گرفته می‌شود. این روش به عنوان تکنیکی سریع برای ارزیابی خطای انسانی طراحی شده و بر اساس یک جدول خاص که شامل سوالاتی مشخص برای شناسایی خطا می‌باشد، تدوین شده است. در این تکنیک فرض بر این است که قابلیت اطمینان انسان اساساً بستگی به ماهیت وظیفه‌ای دارد که انجام می‌دهد (آنالیز سلسله مراتبی وظایف[۹]). در HEART، ۹ گروه عمومی وظیفه[۱۰] مشخص شده و ارقام و محدوده ای به عنوان عدم اطمینان انسانی به آنها اختصاص داده می‌شود. گروه‌های یاد شده به همراه ۳۸ موقعیت به وجود آورنده خطا[۱۱]، مثل کمبود زمان جهت کشف و تصحیح خطا یا عدم وجود روش‌های واضح و شفاف وغیره می‌باشند. پس از شناسایی موقعیت‌های به وجود آورنده خطا، تحلیل‌گر به هرکدام مقدار عددی بین ۰ تا ۱ را اختصاص می‌دهد که به آن نسبت تاثیر ارزیابی شده[۱۲] می‌گویند و سپس همه مقادیر در فرمول فاکتور عملکردی[۱۳] گذاشته شده و میزان احتمال خطای انسانی[۱۴] تعیین می‌شود.

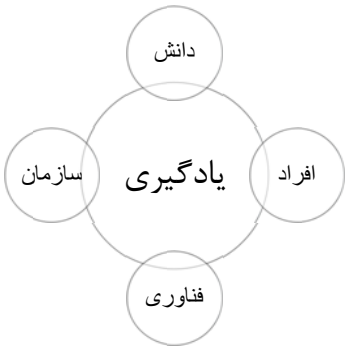
این روش، متدی مهم جهت بررسی مفاهیم اصلی مرتبط با فاکتورهای عدم اطمینان انسانی را به تحلیل‌گر ارائه می‌نماید و عوامل اصلی موثر بر عملکرد انسان در فرآیندهای عملیاتی را بیان می‌کند. همچنین شرایطی را که پتانسیل بروز خطا در آن وجود دارد را شناسایی نموده و خطای احتمالی وظایف عمومی و دامنه و ترکیب فاکتورهای موثر بر پتانسیل خطا و نیز روش‌های کنترلی و مقابله با اثرات احتمالی را بیان می‌نماید. [۲]

## ۴. تئوری یادگیری

یادگیری فرآیندی حساس و ارزشمند برای نیل به موفقیت است. موفقیت نیز مستلزم نوآوری در ارائه خدمات، تولیدات و سیستم‌های جدید می‌باشد. یادگیری بر مهارت‌ها و فرآیندهای ایجاد دانش و استفاده از آن تأکید می‌کند. [۴]

یادگیری فرآیندی است که در پی آن افراد رفتارها، پندارها و عملکردهایشان تغییر می‌یابد و به گونه ای دیگر می‌اندیشند و عمل می‌کنند. بدین ترتیب در حالت کلی می‌توان گفت فرآیند یادگیری هنگامی تحقق می‌یابد که تغییری غیرمستقیم در حافظه، ادراک، تشخیص، نحوه تفکر و عملکرد انسان احساس شود. [۵]

زیر سیستم‌های سازمان، افراد، دانش و فناوری برای گسترش و افزایش یادگیری مورد نیاز هستند. شکل (۱) مدل سیستمی سازمان یادگیرنده را با زیر سیستم‌های گفته شده نشان می‌دهد. یادگیری به نوبه خود، سیستم‌های فرعی دیگر را که شامل سطوح، انواع، ارکان و مهارت‌های یادگیری است، فرا می‌گیرد. شکل (۲) سیستم‌های فرعی یادگیری با زیر مجموعه‌های هر یک را نشان می‌دهد. این موارد همگی در ایجاد و حفظ یادگیری و بهره وری سازمانی، ضروری هستند و به طور پویا با هم در ارتباطاند و یکدیگر را کامل می‌کنند. در صورت فقدان یا ضعف یک زیر سیستم، بقیه آنها به طور قابل ملاحظه ای آسیب خواهند دید. [۴-۶]




**شکل ۱. مدل سیستمی سازمان یادگیرنده**

**شکل ۲. سیستم‌های فرعی یادگیری**

در سطوح یادگیری، تعهد هر فرد به یادگیری جهت یادگیری گروهی حیاتی بوده و زیر بنای آن محسوب می‌شود. یادگیری گروهی توانایی گروه جهت ایجاد یک هویت فکری واحد برای ساختن پلی برای حصول یادگیری سازمانی و ایجاد تغییر در کل است. [۱۵-۱۶]

فرآیند یادگیری را می‌توان از لحاظ برگشت پذیر بودن، حفظ سیستم و تشخیص اشتباهات، استفاده از تجارب گذشته، پیش بینی آینده و غیره به انواع مختلف انطباقی، پیشبینانه، ثانویه و عملی (واکنشی) تقسیم کرد.

برای آغاز، توسعه و حداکثر سازی یادگیری داشتن مهارت‌های زیر ضروری است:

- تفکر سیستمی: یعنی داشتن چارچوب مفهومی برای ایجاد الگوهای واضح و تعیین چگونگی تغییر آنها در جهت اثربخشی بیشتر.
- مدل‌های ذهنی: یعنی داشتن فرضیاتی که بر نگرش‌ها و اقدامات انسان تأثیر گذارند.
- قابلیت شخصی: یعنی داشتن شایستگی و سطح بالایی از حرفه ای بودن در یک موضوع و یا در حوزه ای ازمهارت خاص.
- یادگیری خود مدار (خود هدایتی): یعنی داشتن ابزاری که فرد آگاهانه و مشتاقانه مسئولیت یادگیرنده شدن خود را می‌پذیرد.
- گفت و شنود (گفتمان): یعنی داشتن سطح بالایی از گفت و شنود و برقراری ارتباط بین افراد همراه با معلق ساختن دیدگاه‌های خویش.

از دیگر سیستم‌های فرعی یادگیری، ارکان یادگیری است که به شرح زیر است:

تشکیلات ادرای و سازمانی، این رکن در ابعاد تخصصی و تبیین سیاست‌ها و خط مشی‌های توسعه و کمال و اجرا و نظارت بر آنها نقش مهمی ایفا می‌کند. رکن مدیران، این رکن به عنوان محور و جهت دهنده اصلی یادگیری بوده و نقش اساسی را ایفا می‌کند. اولین شرط لازم برای مدیران آن است که خود ملزم به یادگیری باشند تا فرهیختگی عملی در حوزه مدیریت برای کارکنان به عنوان رکن سوم آشکار شود و آنان در تحقق بخشیدن به اهداف سازمانی و مدیران تلاش کنند. [۷-۸]

## ۵. ارزیابی خطای انسانی و تئوری یادگیری

در ابتدا به کمک مدل درخت خطا به شناسایی وقایع آغازگر، زنجیره ی وقوع رخدادها و حالات مختلف محتمل حادثه می‌پردازیم. به کمک این مدل وقوع واقعه راس (بروز ۴ حادثه) را در صورت عدم عملکرد به موقع سیستم‌های ایمنی مربوطه، شناسایی کرده و زنجیره ایجاد شرایط حادثه در راکتور را مدل کرده ایم. مرجع اصلی جستجوی بسیاری از این وقایع و شرایط ایجاد حادثه، گزارش تحلیل ایمنی راکتور تحقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران بوده است. در تعیین فرکانس وقوع برخی از رویدادهای آغازگر و نیز زنجیره وقایع جهت ترسیم درخت خطا، از تجارب کارگردانان راکتور و نیز کارشناسان با تجربه ایمنی سازمان بهره برده شده است. داده‌های احتمال وقوع سایر رویدادهای پایه نیز از داده‌های ژنریک مراجع ۱۰ تا ۱۴ تعیین شده است. این وقایع برداشت حرارت از سطح صفحات سوخت را مختل کرده و باعث عدم تعادل بین تولید و برداشت حرارت می‌شود. حرارت اضافی برداشت نشده، سبب افزایش دمای سوخت شده و ممکن است به حدی برسد که باعث صدمه دیدن صفحات سوخت و رهایی مواد رادیو اکتیو به بیرون شود. [۹]

چهار حادثه مهم LOCA[15], LOFA[16], LOOP[17], LOHA[18] را در این راکتور مورد ارزیابی قرار داده ایم. هر یک از این حوادث با ترسیم درخت خطا و وارد کردن نرخ خرابی هر یک از اجزاء در کد RELAB مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقدار احتمال خرابی کل (بروز حادثه) با استفاده از دو روش گفته شده در این کد که در بالا به آن اشاره شد، محاسبه شده است. این احتمال در واقع بیانی از حالت کلاسیک و بدون دخالت انسانی، تنها احتمال کارکرد فیزیکی تجهیزات را نشان می‌دهد.

برای وارد کردن خطا انسانی، ابتدا آن دسته از اجزایی[19] را که انسان و خطای انسانی در آنها تاثیر گذار است را شناسایی کرده و سپس با استفاده از آنالیز سلسله مراتبی شغلی (HTA) که ما آنرا در ۳ وظیفه بازرسی، تعمیراتی و اپراتوری که به ترتیب با نوع وظیفه عمومی F ، F و G است، در نظر گرفته (بر اساس ۹ گروه وظیفه عمومی تعریف شده از A تا M در روش HEART) و سپس مقادیر احتمال خطای عمومی هر کدام را وارد کرده و آنگاه به تعیین موقعیت‌های به وجود آورنده خطا برای هر کدام از وظایف پرداخته ایم. با تعیین نسبت وزنی و جایگزینی مقادیر در فرمول فاکتور عملکردی، احتمال خطای انسانی کل را برای هر کدام از وظایف، بدست آورده ایم.

تئوری یادگیری و مبحث کمی سازی و دخالت آن در اجزاء موثر را نیز با استفاده از آنالیز اثرات یادگیری در کم کردن احتمال خطای انسانی در ۲۲ معیار تعیین کننده بیان کردیم. تاثیر هر یک از این فاکتورهای یادگیری در موقعیت‌های به وجود آورنده خطا را در میزان پیش بینی شده عدم اطمینان در روش HEART ضرب کرده و مقدار احتمال خطای انسانی متاثر از یادگیری را از این طریق محاسبه کردیم. (ضریب A). جدول (۱) معیارهای موثر یادگیری [۷-۸]، جدول (۲) تاثیرات یادگیری در پیش بینی عدم اطمینان از موقعیت‌های مختلف (۳۸ موقعیت به وجودآورنده خطا (EPCs) در روش HEART) و جدول (۳) فرم کلی محاسبه خطای انسانی با دخالت یادگیری را نشان می دهد. حسن این روش در دخالت دادن یادگیری در موقعیت‌ها و اجزایی بوده که در ایجاد خطای انسانی و نیز افزایش میزان قابلیت اطمینان موثر بوده و همچنین نقش کمی کردن این تئوری در مقدار عددی احتمال ارزیابی شده با آن برای بروز هر یک از حوادث، ما را به سمت نرخ‌های دنیای واقعی نزدیکتر کرده و مقادیر حقیقی موجود و دقیق مهندسی قابلیت اطمینان سیستم را بیان می‌کند.

**جدول ۱. فاکتورهای تاثیر گذار یادگیری**

| ردیف | ۲۲ معیار یادگیری |
|---|---|
| ۱ | تغییر رفتار و عملکرد |
| ۲ | تغییر در ادراک و تشخیص |
| ۳ | تغییر در رفتار و عادات |
| ۴ | ایجاد و ابداع راه‌های نو (نوآوری) |
| ۵ | شناسایی مشکلات و خطاهایی که هنوز به طور کامل آشکار نشده‌اند. ( پیش بینی) |
| ۶ | تغییر مستمر، متمرکز بر ارزش‌ها و نتیجه عملکردها |
| ۷ | علاوه بر بهبود شرایط، داشتن پیشرفت علمی و عملی در کارها |
| ۸ | داشتن نیروی انسانی مجهز به دانش و فناوری |
| ۹ | داشتن تفکر پویا و گیرا |
| ۱۰ | داشتن انعطاف پذیری زیاد در مقابل تغییرات سریع و غیر منتظره |
| ۱۱ | افزایش قابلیت‌های عملیاتی مختلف نیروی انسانی |
| ۱۲ | افزایش دسترسی به اطلاعات به روز |
| ۱۳ | افزایش انگیزه و تعاملات انسانی |
| ۱۴ | یافتن مهارت‌های تفکر سیستمی، مدل سازی ذهنی، گفتمان سازنده و غیره در بین کارکنان |
| ۱۵ | یادآوری بهتر و سریعتر آموخته‌ها و اطلاعات |
| ۱۶ | ایجاد اتحاد، چشم‌انداز و هدفی مشترک در بین تمامی افراد |
| ۱۷ | توانایی کسب بصیرت از تجربه افراد مختلف |
| ۱۸ | توسعه دانش مربوط به روابط علتی و معلولی و تاثیر محیط بر روی این روابط |
| ۱۹ | تغییر و اصلاح دانش و حافظه ی فردی و سازمانی |
| ۲۰ | ایجاد حس اعتماد و رضایت بخشی از کارکنان |
| ۲۱ | قابلیت انجام اقدامات موثر و افزایش ظرفیت و توانایی حل مشکلات |
| ۲۲ | تولید دانش و تقویت حس جستجوگری و پرسشگری |

**جدول ۲. تاثیرات یادگیری در پیش بینی عدم اطمینان از موقعیت‌های مختلف بر اساس روش** HEART

| موقعیت‌های به وجود آورنده خطا | فاکتورهای یادگیری تاثیر گذار | بیشترین تعداد پیش بینی شده اثرات یادگیری بر موقعیت‌های به وجود آورنده خطای انسانی |
|---|---|---|
| ۱ | ۲۲-۲۱-۱۸-۱۷-۱۴-۱۲-۱۱-۱۰-۹-۸-۵-۴-۳-۲ | ۱۴ |
| ۲ | ۲۱-۱۹-۱۸-۱۷-۱۵-۱۴-۱۲-۱۱-۱۰-۹-۵-۴-۳-۲-۱ | ۱۵ |
| ۳ | ۲۲-۲۱-۱۸-۱۷-۱۴-۱۱-۸-۵-۴-۲ | ۱۰ |
| ۴ | ۱۸-۱۷-۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۹-۸-۶-۴-۳-۱ ۲۲-۲۱-۱۹ | ۱۷ |
| ۵ | ۲۱-۱۹-۱۸-۱۶-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۹-۸-۵-۴-۱ | ۱۳ |
| ۶ | ۲۲-۲۱-۱۹-۱۶-۱۴-۱۲-۱۱-۱۰-۹-۸-۶-۳-۲-۱ | ۱۴ |
| ۷ | ۲۰-۱۶-۱۴-۱۳-۱۱-۸-۱ | ۷ |
| ۸ | ۲۲-۱۹-۱۸-۱۶-۱۴-۱۳-۱۲-۹-۸-۷-۶-۵-۴-۳-۱ | ۱۵ |
| ۹ | ۲۲-۲۱-۱۹-۱۷-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۹-۸-۶-۳-۲ | ۱۳ |
| ۱۰ | ۱۹-۱۸-۱۶-۱۵-۱۴-۱۳-۱۲-۱۱-۹-۸-۶-۵-۴-۳-۲ ۲۲ | ۱۶ |
| ۱۱ | ۲۱-۱۹-۱۵-۹-۸-۷-۶-۳-۲ | ۹ |
| ۱۲ | ۲۱-۱۷-۱۵-۱۴-۱۱-۹-۸-۲ | ۸ |

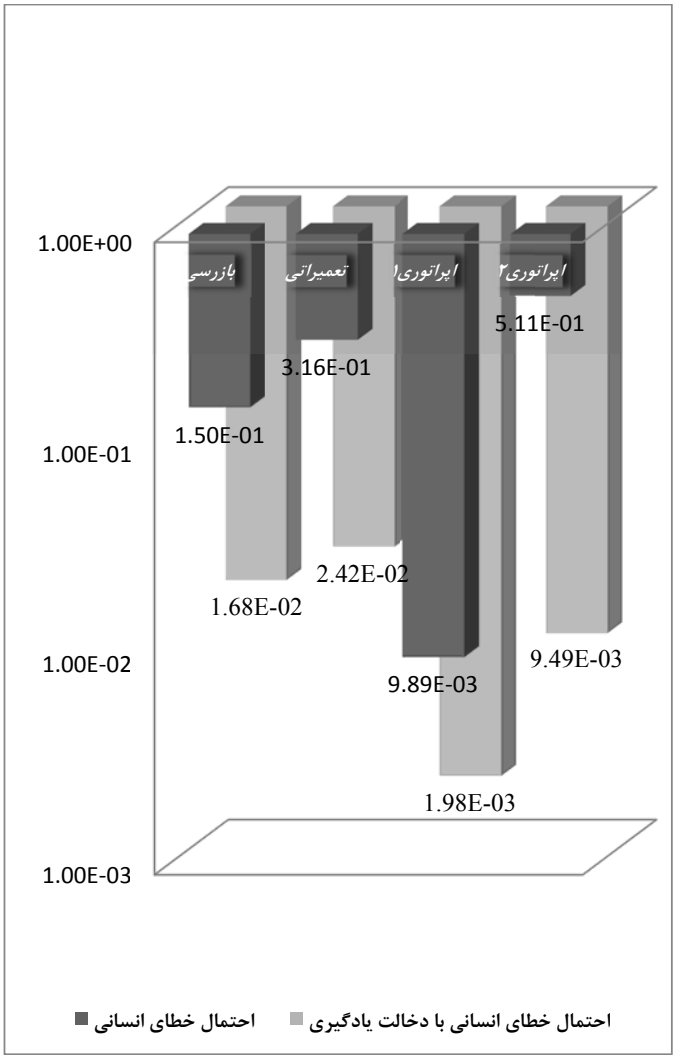
| | | |
|---|---|---|
| ۱۳ | عدم دخالت خطای انسانی | ۰ |
| ۱۴ | عدم دخالت خطای انسانی | ۰ |
| ۱۵ | ۱-۲-۳-۵-۸-۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۷-۱۸-۱۹-۲۱-۲۲ | ۱۶ |
| ۱۶ | ۱-۲-۳-۵-۷-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰ | ۱۴ |
| ۱۷ | ۱-۲-۳-۶-۸-۹-۱۲-۱۳-۱۸-۱۹ | ۱۰ |
| ۱۸ | ۱-۲-۳-۵-۷-۸-۹-۱۲-۱۴-۱۶-۱۹ | ۱۱ |
| ۱۹ | ۳-۴-۶-۸-۹-۱۲-۱۴-۱۸-۱۹-۲۲ | ۱۰ |
| ۲۰ | ۳-۹-۱۱-۱۲-۱۴-۱۸-۱۹-۲۲ | ۸ |
| ۲۱ | ۱-۲-۳-۸-۹-۱۲-۱۴-۱۶-۱۷ | ۹ |
| ۲۲ | ۱-۳-۶-۹-۱۱-۱۳-۱۴ | ۷ |
| ۲۳ | عدم دخالت خطای انسانی | ۰ |
| ۲۴ | ۳-۷-۹-۱۳-۱۴ | ۵ |
| ۲۵ | ۳-۶-۹-۱۱-۱۳-۱۴-۱۶-۱۹-۲۱ | ۹ |
| ۲۶ | ۱-۳-۴-۱۲-۱۷ | ۵ |
| ۲۷ | ۳-۴-۶-۹-۱۰-۱۱-۱۴-۱۷-۱۸-۲۱ | ۱۰ |
| ۲۸ | ۱-۱۳-۱۴-۱۹-۲۰ | ۵ |
| ۲۹ | ۱-۸-۱۴-۲۰-۲۱ | ۵ |
| ۳۰ | ۸-۱۱-۱۳-۲۰-۲۱ | ۵ |
| ۳۱ | ۳-۱۳-۶-۱۴-۲۰ | ۵ |
| ۳۲ | عدم دخالت خطای انسانی | ۰ |
| ۳۳ | عدم دخالت خطای انسانی | ۰ |
| ۳۴ | ۳-۴-۵-۶-۷-۹-۱۲-۱۳-۱۶-۲۲ | ۱۰ |
| ۳۵ | ۳-۱۳ | ۲ |
| ۳۶ | ۱-۸-۱۱-۱۳-۱۴-۱۶-۱۷ | ۷ |
| ۳۷ | ۱-۱۴ | ۲ |
| ۳۸ | ۲۱ | ۱ |

**جدول ۳. فرم کلی محاسبه خطای انسانی با دخالت یادگیری**

| | |
|---|---|
| (GTT) | |
| (GEP) | |
| EPCs | |
| ضریب (a) | |
| نسبت یادگیری (LR) | |
| 1-(LR) | |
| ضریب (A) | |
| | وظیفه شغلی: |
| | زمان شروع ارزیابی: |
| | زمان پایان ارزیابی: |
| | احتمال خطای محاسبه شده بدون یادگیری: |
| نسبت تاثیر (b) | |
| محاسبه 'PF | |
| ((A-1)*b)+1 | |
| HEP with Learning | |

برای درک بهتر تاثیر یادگیری در کاهش خطای انسانی و افزایش قابلیت اطمینان کل، دو حالت اپراتوری یکی برای شرایط نرمال و دیگری برای شرایط بحرانی در راکتور در نظر گرفته شده است. مقایسه احتمال خطای هر یک بدون دخالت یادگیری و نیز با وجود یادگیری، برجستگی‌های ارزشمند این تئوری را در شرایط اضطراری به خوبی نشان می‌دهد.

در شکل (۳) احتمال خطای انسانی با یادگیری و بدون یادگیری برای وظایف بررسی شده، به صورت نموداری نشان داده شده است. منظور از اپراتوری ۱، هدایتگری در شرایط عادی و منظور از اپراتوری ۲، هدایت راکتور در شرایط بحرانی راکتور تهران است.




**شکل ۳. مقایسه احتمال خطای انسانی با یادگیری و بدون یادگیری**

## ۶. نتیجه گیری

در بررسی احتمالاتی حوادث مهم هسته ای برای راکتور تحقیقاتی تهران در ۳ حالت کلاسیک (بدون در نظر گرفتن خطای انسانی)، خطای انسانی و یادگیری با استفاده از کد RELAB به نتایج زیر رسیده‌ایم:

❖ احتمال بدست آمده ناشی از خرابی کلاسیک تجهیزات الکتریکی و مکانیکی سیستم خنک کننده راکتور تحقیقاتی تهران در بروز حادثه LOCA در محدوده $10^{-8}$ ۲۰ بوده و از آنجا که در این راکتور ضعف مهندسی فاکتورهای انسانی به دلیل قدمت و در نتیجه نداشتن اتوماسیون و دستی انجام شدن بسیاری از کارها، احتمال نادرستی از شرایط و حوادث را بدست خواهد داد، لذا با ملحوظ کردن خطاهای انسانی در حادثه LOCA به احتمال بروز حادثه در محدوده $10^{-4}$ رسیده ایم. با طرح مبحث یادگیری و تجربه پذیری و آموزش نیروی

انسانی به صورت کمی در کاهش خطای انسانی، تغییر حدود ۱۰۰ برابری را مشاهده کرده ایمکه احتمال نهایی بروز حادثه LOCA را در راکتور تهران به محدوده $10^{-6}$ رسید که با مقدار عددی احتمال حاصل از داده‌های ژنریک مطابقت کامل داشت. در بررسی احتمال ایجاد حوادث LOFA، LOHA و LOOP نیز به همین صورت عمل کرده ایم و احتمالات وقوع هر حادثه را با در نظر گرفتن حالت کلاسیک، خطای انسانی و تاثیر یادگیری در آنها بدست آوردیم که در نتایج در جدول(۵) مشاهده می‌گردد. در ارزیابی نتایج، احتمال وقوع هر حادثه را با داده‌های ژنریک (منابع ذکر شده در جدول ۶) بدست آمده در جدول (۶) با نتایج حاصله از محاسبات احتمال نهایی که متاثر از وارد کردن تئوری یادگیری در هر حادثه است، مقایسه کرده و رنج‌های یکسانی را مشاهده کردیم.

- کاهش احتمالات بدست آمده از هر حادثه با درنظر گرفتن خطای انسانی نسبت به حالت کلاسیک، نشان از تاثیر پذیری بالای حوادث LOOP و LOCA از خطای انسانی دارد و پس از آنها شاهد تاثیر پذیری متوسط در حوادث LOHA و LOFA هستیم. چرایی این موضوع در نمودارهای درخت خطای رسم شده برای هر حادثه و تعداد اجزای اثر گذاری خطای انسانی و نوع و میزان هر یک وظایف به خوبی قابل توجیه است.

**جدول ۴. احتمالات بروز حوادث**

| حوادث | احتمال کلاسیکی اجزاء | احتمال با دخالت انسان | احتمال با تاثیرات یادگیری (حالت کلی) |
|---|---|---|---|
| LOHA | 3/09E-4 | 1/84E-1 | 2/47E-2 |
| LOOP | 3/61E-5 | 4/99E-1 | 4/71E-3 |
| LOFA | 6/05E-7 | 1/66E-4 | 1/52E-5 |
| LOCA | 1/21E-8 | 1/14E-4 | 8/98E-6 |

**جدول ۵. احتمال ژنریک حوادث**

| حوادث | احتمال | منابع |
|---|---|---|
| LOHA | 8/09E-2 | NUREG/CR-6928 |
| LOOP | E-۳/۵۹E-2 ۱/۷۳ | NUREG/CR-6928 وراکتور مشابه در پاکستان |
| LOFA | ۱/۰۷-3E-5 | NEA/CSNI/R(2012) |
| LOCA | 6/78E-6 | NUREG/CR-6928 |

- در ارزیابی خطای انسانی برای فعالیت‌های مختلف، وظیفه اپراتوری در شرایط اضطراری (اپراتوری۲) با بیشترین تعداد موقعیت‌های به وجود آورنده خطا (۱۸ موقعیت) و نیز بیشترین احتمال خطا دارای موقعیتی ویژه است (شکل ۳)، که در مقایسه با کار اپراتوری در حالت عادی و نرمال (اپراتوری۱)، اختلاف فاحشی را نشان می‌دهد. تاثیر موقعیت‌های ناآشنایی با وضعیت، نو وجدید بودن شرایط، کمبود زمان شناسایی و تصحیح، بی تجربگی و عدم آموزش برای حالات بحرانی، خطرناک و شرایط بالقوه مهم و از همه پر رنگتر ایجاد استرس روحی بالا با میزان نسبت ارزیابی شده ۰/۹ برای آن، مواردی هستند که در این حالت احتمال خطا را به شدت افزایش داده‌اند.
- فعالیت تعمیراتی سیستم‌ها و تعویض قطعات نیز بعد از اپراتوری۲ دارای بیشترین میزان احتمال خطا برای انسان را دارا است. محیط کاری خطرناک، محدودیت‌های فیزیکی و عدم بازبینی مستقل همه اجزاء برای تعمیرات و کمبود قطعات فابریک و مخصوص برای کار در تجهیزات راکتور و عدم آشنایی با موارد جایگزین در تعویضات، از تاثیر گذارترین موارد این احتمال زیادی خطا هستند. کار تعمیراتی در مقایسه با فعالیت نظارت و بازرسی که دارای یک احتمال خطای عمومی می‌باشند، دارای موقعیت‌های ایجاد خطای یکسانی همچون موقعیت‌های ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۷، ۲۰ و ۲۷ می‌باشند که غالباً ناشی از بی دقتی، فشار زمانی ، عدم آموزش‌های کافی و مرتبط و نیز محیط کاری پر مخاطره و محدود از لحاظ دسترسی فیزیکی به همه اجزا برای سنجش واندازه گیری مجزا، می‌باشد.
- تاثیر یادگیری در کاهش خطای انسانی به ترتیب در فعالیت اپراتوری۲، تعمیراتی، بازرسی و اپراتوری۱، بیشتر بوده است.
- تاثیر پذیری اپراتوری۲ و کم کردن احتمال خطای انسانی در آن از طریق وارد کردن یادگیری، نسبت به اپراتوری۱ حدود ۱۰ برابر بیشتر است و این بیانگر آن است که اگر چه در این موقعیت شرایط بحرانی است اما با فراهم کردن شرایط ذکر شده در معیارهای یادگیری و تاثیرگذاری‌های آن، می‌توان حتی در شرایط اضطراری انتظار عکس العمل‌های صحیح و منطقی همراه با آرامش و اعتماد به نفس را داشت.

ایجاد بحث یادگیری و وارد کردن فاکتورهای یادگیری در موقعیت‌های به وجود آورنده خطا و احتمال خطای بدست آمده از هر یک از شغل‌ها، به طور میانگین در وظایف بازرسی و تعمیراتی حدود ۱۰ برابر، اپراتوری۱ حدود ۵ برابر و در اپراتوری۲ حدود ۵۰ برابر احتمال خطای انسانی را کاهش داده است. (با توجه به شکل ۳)

## پی‌نوشت

1. Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART)
2. Fault Tree
3. Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations
4. Minimal Cut Sets (MCSs)
5. Method for Obtaining Cut Sets(MOCUS)

6. Rare Event Approximation (REA)
7. Min Cut Upper Bound (MCUB)
8. Sylvester- Poincare
9. Hierarchical Task Analysis (HTA)
10. Generic Task Type (GTT)
11. Error Producing Conditions (EPCs)
12. Assessment Proportion of Affect (APOA)
13. Performance Factor (PF)
14. Human Error Probability (HEP)
15. Loss Of Coolant Accident
16. Loos Of Flow Accident
17. Loss Of Offsite Power
18. Loos Of Heat sink Accident
19. Components
20. Order of Magnitude

## مراجع

[1] Barry S. Investigating human error: incidents, accident, and complex system, Ashgate Publishing Company, (2002).

[2] Weinstein O, Azoulay N. Firm's capabilities and organizational learning: a critical survey of some literature, CREI-University de Paris, (1999).

[3] Barton L. The factory as a learning laboratory, Sloan Management Review, (1992), pp. 23-38.

[4] Chirvastava P. A typology of organizational learning systems, Journal of Management Studies, (1983), Vol. 20, pp. 7-28.

[5] Goh SC. Improving organizational learning capability: lessons from two case studies, The Learning Organization, (2003), pp. 216-227.

[6] Hult GT, Ferrell OC. Global organizational learning capacity in purchasing: construct and measurement, Journal of Business Research, (1997), Vol. 40, pp. 97-111.

[7] Dixon N. The organizational learning cycle, how we can learning collectivity, Mc Graw-hill London, (1994).

[8] Garvin D. Building a learning organizational, Hardward Business Review, (1993), Vol. 71, pp. 78-91.

[9] American Machine & Foundry Company (AMF), Safety Analysis Report for Tehran Research Reactor, Pennsylvania, (1966).

[10] IAEA-TECDOC-478. Component Reliability Data for use in Probabilistic Safety Assessment, (1988).

[11] IAEA-TECDOC-590. Determining Safety Importance of Systems and Components at Nuclear Power Plan, (1991).

[12] IEEE. Guide to the Collection and Presentation of Electrical, Electronics and Sensing Component and Reliability Data for Nuclear Power Generating Stations, IEEE standard 500, (1997).

[13] NUREG/CR-2815. Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide, Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, (1984).

[14] NUREG/CR-6928. Industry - Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants, (2007).

[۱۵] اقدسی، محمد؛ خاکزار بفروئی، مرتضی. سنجش سطح قابلیت‌های یادگیری سازمانی در بیمارستانها، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۷)، جلد ۱۹، شماره ۴، صص. ۷۱-۸۳.

[۱۶] ذگردی، سید حسام الدین؛ بهلولی، احسان. زمان‌بندی گروهی با در نظر گرفتن اثر یادگیری در سیستم تولید سلولی، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۸)، جلد ۲۰، شماره ۲، صص. ۵۵-۴۵.

[۱۷] موحدی، یزدان؛ دولتخواه، مهدی؛ کرباسیان، مهدی؛ راستی، وحید. طراحی و توسعه الگویی جهت تخصیص و تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌های پیچیده به روش شبکه‌های بیزین (مطالعه موردی: شاتر یک دوربین *High-Tech.*)، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۹۲)، جلد ۲۴، شماره ۴، صص. ۴۴۸-۴۳۸.

[۱۸] ابراهیمی، بهروز. گزارش فنی کد محاسباتی تحلیل درخت خطا (*Relab*)، مرکز محاسبات پیشرفته هسته‌ای، شماره *Rev.*۰۰ - ۱۰۰ *ANC– RPT– SAP-PS–*، (۱۳۹۱).