Journal of Occupational Hygiene Engineering Volume 6, Issue 3, Autumn 2019, Pages: 34-43

Original Article

doi: 10.52547/johe.6.3.4

Application of a Standardized Plant Analysis Risk-human Reliability Method to Pipeline Inspection Gauge Operations

Mostafa Mirzaei Aliabadi[1], Reza Esmaeili[2,*], Iraj Mohammadfam[3], Maryam Ashrafi[4]

[1] *Assistant professor, Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran*
[2] *MSc Student, Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran*
[3] *Professor, Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran*
[4] *Assistant professor, Industrial Engineering and Management Systems Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran*

*** *Corresponding Author:*** *Reza Esmaeili, Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran. Email: rezaesmaeili794@yahoo.com*

Received: 08/06/2019
Accepted: 06/07/2019

How to Cite this Article:
Mirzaei Aliabadi M, Esmaeili R, Mohammadfam I, Ashrafi M. Application of a Standardized Plant Analysis Risk-human Reliability Method to Pipeline Inspection Gauge Operations. *J Occup Hyg Eng*. 2019; 6(3): 34-43. DOI: 10.52547/johe.6.3.4

Abstract

Background and Objective: Pipeline inspection gauge operation which is called "pigging operation" is a practical online monitoring method for maintaining the pipeline in a healthy and safe condition. This operation requires high man-machine interactions. Therefore, it is sensitive to human error which can lead to catastrophic consequences, including human mortality.

Materials and Methods: This descriptive study was carried out to assess the probability of human error in pigging operation in a gas transmission plant in Iran. Initially, hierarchical task analysis was conducted via walking through the pigging operation, observing the pigging operation tasks, and doing interviews with operators working in the operation. Subsequently, the Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis (SPAR-H) was utilized to assess the human error probability.

Results: In this study, SPAR-H method was implemented on "pigging operation". The mean value of human error probability (HEP) was estimated at 0.218. It should be noted that the mean value of HEP was regarded as a subtask of "opening bypass valve for decreasing pressure", as well as a subtask with the highest probability of human error (0.841).

Conclusion: The SPAR-H method is a useful tool for practitioners to assess HEP. According to the obtained results, some of the preventive actions to reduce HEP include the utilization of more clarified instructions for performing operations as well as the automation of the launching and receiving pigging cups.

Keywords: Human Error; Pigging Operation; Pipeline Inspection Gauges; Standardized Plant Analysis Risk-human Method

Copyright © 2019 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

مقاله پژوهشی

doi: 10.52547/johe.6.3.4

پیاده‌سازی روش واکاوی ریسک خطاهای انسانی (SPAR-H) در عملیات پیگرانی خطوط لوله انتقال گاز

مصطفی میرزایی علی‌آبادی[۱]، رضا اسمعیلی[۲،*]، ایرج محمدفام[۳]، مریم اشرفی[۴]

[۱] استادیار، قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد، قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

[۳] استاد قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

[۴] استادیار، گروه مدیریت سیستم و بهره‌وری، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

* **نویسنده مسئول:** رضا اسمعیلی، قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای، مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران. ایمیل: rezaesmaeili794@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

چکیده

سابقه و هدف: عملیات بازرسی خطوط لوله (PIG: Pipeline Inspection Gauges) که عملیات پیگرانی نامیده می‌شود، یک روش نظارت آنلاین برای حفظ ساختار و عملکرد خط لوله در شرایط سالم و ایمن می‌باشد. این عملیات نیاز به تعامل زیاد انسان و ماشین دارد؛ از این رو نسبت به خطاهای انسانی حساس بوده و این امر می‌تواند منجر به عواقب فاجعه‌باری از جمله مرگ افراد شود.

مواد و روش‌ها: مطالعه توصیفی حاضر به‌منظور برآورد احتمال خطای انسانی در عملیات پیگرانی در یک شرکت انتقال گاز در ایران انجام شد. ابتدا تجزیه و تحلیل سلسله‌مراتبی وظیفه (HTA: Hierarchical Task Analysis) از طریق پیاده‌روی، مشاهده وظایف عملیات پیگرانی و انجام مصاحبه با اپراتورهای شاغل در این عملیات انجام شد. در ادامه برای ارزیابی احتمال خطای انسانی، روش واکاوی ریسک خطاهای انسانی (SPAR-H: Standardized Plant Analysis Risk Human Reliability Analysis) مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌ها: در پژوهش حاضر روش SPAR-H در عملیات پیگرانی پیاده‌سازی شد و میانگین احتمال بروز خطای انسانی معادل ۰/۲۱۸ محاسبه گردید. شایان ذکر است که میانگین احتمال بروز خطای انسانی در زیروظیفه "بازکردن شیر بای‌پس به‌منظور کاهش فشار" به‌عنوان زیروظیفه‌ای با حداکثر احتمال خطای انسانی (۰/۸۴۱) شناخته شد.

نتیجه‌گیری: روش SPAR-H یک ابزار مفید و کاربردی برای متخصصان به‌منظور محاسبه احتمال بروز خطای انسانی است. براساس نتایج مطالعه حاضر برخی از اقدامات پیشگیرانه به‌منظور کاهش احتمال بروز خطای انسانی پیشنهاد گردید که عبارت بودند از: استفاده از دستورالعمل‌های واضح و مشخص برای انجام عملیات و اتوماسیون‌سازی فرایندهای ارسال و دریافت توپک پیگرانی.

واژگان کلیدی: پیگرانی؛ خطای انسانی؛ روش واکاوی ریسک خطاهای انسانی؛ عملیات بازرسی خطوط لوله

مقدمه

براساس اطلاعات به‌دست‌آمده از دپارتمان انتقال اداره ایمنی خطوط لوله ایالات متحده آمریکا (OPS: Office of Pipeline Safety)، شایع‌ترین دلایل نقص در خط لوله، نقص‌های مکانیکی هستند که می‌توانند شامل: نقص در تجهیزات، خوردگی، مواد و یا جوشکاری باشند [۱]. بر این اساس می‌توان بیان نمود که عملیات تعمیر و نگهداری خطوط لوله انتقال گاز، بسیار حیاتی بوده و از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. عملیات تعمیر و نگهداری برای حفظ تجهیزات در شرایط "چون ساخت" (as-built) سودمند بوده و در نتیجه برای حفظ ظرفیت اصلی خطوط لوله، بسیار اساسی و مهم می‌باشد [۲]. از ۱۰۶۳ حادثه‌ای که در مطالعه Ramirez-Camacho و همکاران مورد بررسی قرار گرفتند، ۹۷ درصد در خطوط لوله اتفاق افتاده بودند و تنها چند مورد در سایر تجهیزات مرتبط رخ داده بودند. علاوه‌براین، ۶۸/۶ و ۳۱/۴ درصد از حوادث به‌ترتیب در مناطق روستایی و شهری اتفاق

افتاده بودند. مطابق با نتایج این مطالعه، ۳/۲ درصد از این حوادث به‌طور مستقیم با عملیات پیگرانی و آزمون فشار در ارتباط بودند [۳]. عملیات بازرسی خط لوله که به نام "عملیات پیگرانی" و یا "عملیات جاروبکرانی" مشهور است، یکی از فعالیت‌های تعمیر و نگهداری موجود برای بازرسی خطوط نفت و گاز می‌باشد. علاوه بر استفاده از دیگر روش‌های حفاظتی، عملیات پیگرانی به‌عنوان یک روش تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای نظارت آنلاین بر خطوط لوله به کار می‌رود. این فرایند نظارت آنلاین برای حفظ خط لوله در یک شرایط سالم و ایمن، کاربردی بوده و در صورت بروز هرگونه مشکل برای انجام اقدامات اصلاحی در زمان مناسب به‌منظور افزایش طول عمر خطوط لوله، کمک‌کننده و مفید می‌باشد [۴]. مهم‌ترین خطرات شناخته‌شده در عملیات پیگرانی عبارت هستند از: فشار بالای گاز/مایع در خطوط لوله، سرعت بیش از حد و کنترل‌نشده توپک، برخورد توپک به تجهیزات یا اپراتورها، انفجار و غیره که هریک از آن‌ها می‌توانند منجر به وقایع فاجعه‌باری شوند. هر ساله حوادث و وقایع متعددی در ارتباط با عملیات پیگرانی در ایران و سراسر جهان اتفاق می‌افتد. با این وجود، حوادث کمی در طول سال‌ها در عملیات پیگرانی در صنایع نفت و گاز در سطح جهان گزارش شده است؛ به‌عنوان مثال در ۶ فوریه سال ۲۰۱۷ در یک عملیات پیگرانی در استان زاهدان، یک توپک به‌کاررفته در این عملیات در اثر فشار زیاد از خط لوله خارج شده و به سمت اپراتورها پرتاب گردید و منجر به کشته‌شدن دو کارگر شد [۵]. همچنین در ۷ اوت سال ۲۰۱۶، انفجار در دریافت‌کننده توپک در بخش کاهش فشار دریافت‌کننده توپک در عملیات پیگرانی خطوط انتقال گاز در استان فارس منجر به آسیب دو کارگر با سوختگی ۹۰ و ۴۵ درصد شد و یک اپراتور نیز وارد موج ناشی از انفجار گردید [۶]. علاوه‌براین در ۴ آوریل سال ۲۰۱۵ در یک حادثه در خط لوله GAIL در ایالت تالنگا در هند، حداقل دو اپراتور در اثر انفجار در خط لوله گاز دچار سوختگی شده و فوت نمودند و چهار کارگر دیگر نیز در اثر این انفجار زخمی شدند. این حادثه زمانی رخ داد که توپک‌های پیگرانی که برای تمیزکردن خط لوله به کار رفته بودند، از خط لوله خارج گردیدند و باعث کشته‌شدن دو نفر که در انتهای خط لوله ایستاده بودند، شدند [۷]. همچنین در سال ۲۰۰۴ در آلمان، حادثه‌ای منجر به کشته‌شدن یک کارگر که روی خطوط لوله گاز طبیعی کار می‌کرد، گردید. در این حادثه یک توپک پیگرانی که در قسمت دریافت‌کننده گیر کرده بود، در اثر فشار بالای گاز در پشت توپک (به دلیل نشتی در شیر بای‌پس) با سرعت بالایی (حدود ۲۲۰ کیلومتر بر ساعت) به سمت بیرون پرتاب شد و باعث ایجاد الگوی صدمه‌ای همانند سقوط اجسام از ارتفاع بلند گردید [۸]. علاوه‌براین در یکی از شرکت‌های نفتی جهان در ایالات متحده در تاریخ ۲۵ ژوئن سال ۲۰۱۲، طی فرایند آماده‌سازی بازرسی خطوط لوله با استفاده از عملیات پیگرانی، ارسال‌کننده موقت توپک که به خط لوله متصل شده بود، تحت فشار قرار گرفت و فشار بالا باعث پارگی و شکست در آن شد. این حادثه منجر به مرگ یک فرد و بستری‌شدن دو کارگر دیگر گردید [۹]. این حوادث بخش کوچکی از حوادث رخداده در عملیات پیگرانی در سراسر جهان هستند. افزون بر این موارد، در مطالعه‌ای که توسط Akyuz و Celik انجام شد، "تمیزکردن خط با استفاده از عملیات پیگرانی برای تخلیه تمامی بقایای محموله" دارای احتمال بروز خطای انسانی (E-01۱/۸۶) در میان تمامی وظایف در عملیات بارگیری بود [۱۰]. همچنین در مطالعه Bubbico و همکاران، شکست در عملیات پیگرانی به‌عنوان علت خاص شکست در خطاهای عملیاتی/انسانی در رویدادهای پس از انتشار در خطوط لوله در نظر گرفته شد [۱۱]. به‌طور کلی، عملیات پیگرانی یک روش معمول برای تعمیرات و نگهداری خطوط لوله است که در اکثر موارد در شرایط ایمن و مناسب انجام می‌شود. با این وجود، خطای انسانی در این عملیات می‌تواند منجر به عواقب شدید مانند مرگ اپراتورها و ناظرین گردد [۱۲]. از سوی دیگر، با وجود اینکه اقدامات ایمنی و دستورالعمل‌های دقیقی در صنایع نفت و گاز اعمال می‌شوند؛ اما به نظر می‌رسد که این اقدامات و دستورالعمل‌ها به اندازه کافی برای جلوگیری از وقوع حوادث مؤثر نمی‌باشند؛ بنابراین فاکتورهایی نظیر خطای انسانی می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در بروز حوادث در این صنایع داشته باشند.

با توجه به موارد ذکرشده، مطالعه حاضر با هدف تخمین احتمال بروز خطای انسانی از طریق پیاده‌سازی روش واکاوی ریسک خطاهای انسانی (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis) انجام شد. اگرچه این روش در ابتدا برای صنایع پتروشیمی توسعه نیافته است؛ اما اخیراً برای ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی در ارزیابی خطر یک حادثه بزرگ در صنعت نفت نروژ و همچنین عملیات حفاری دریایی در یک صنعت نفت و گاز و نیز در سیستم مجوز کار (PTW: Permit to Work Systems) در یک کارخانه شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳-۱۵]. SPAR-H یک روش ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی می‌باشد که به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی احتمال بروز خطای انسانی براساس قضاوت کارشناسان از طریق استفاده از یک کاربرگ اختصاصی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶]. روش به‌کاررفته در مطالعه حاضر به‌منظور ارزیابی عملکرد انسان و شرایط محیطی، ویژگی‌های سازمانی و فردی معرفی یک گروه از فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد شامل: زمان در دسترس، استرس/استرسور، پیچیدگی، تجربه/آموزش، رویه‌ها، ارگونومی/تداخل انسان ماشین، تناسب با وظیفه و فرایند کاری را معرفی نموده است که برای ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی بسیار کاربردی می‌باشند [۱۷].

مواد و روش‌ها

پژوهش مقطعی- توصیفی حاضر به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان انسان در عملیات بازرسی خط لوله در یک شرکت انتقال گاز در ایران انجام شد. در این مطالعه در گام اول یک تحلیل

سلسله‌مراتبی وظیفه از طریق مشاهده مستقیم وظایف در فرایند پیگرانی و مصاحبه با کارگران همراه با ارزیابی وظایف مختلف در عملیات پیگرانی انجام شد (جدول ۱) و بر همین اساس، ارزیابی احتمال بروز خطای انسانی در وظایف/زیروظایف عملیات پیگرانی به‌عنوان هدف مطالعه حاضر تعیین گردید. در نهایت برای محاسبه احتمال خطای انسانی، روش SPAR-H مورد استفاده قرار گرفت.

مطابق با راهنمای گام به گام روش SPAR-H [۱۶]، مراحل زیر برای ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی در عملیات پیگرانی انجام شد.

مرحله ۱: طبقه‌بندی رویدادهای شکست انسان به‌عنوان تشخیص یا عمل

در این مرحله رویدادهای شکست انسان در عملیات پیگرانی به‌عنوان وظایف تشخیصی، عملکردی یا هر دو دسته‌بندی شدند. در روش SPAR-H، وظایف تشخیصی طیف کاملی از فرایندهای پردازش شناختی را نشان می‌دهند و وظایف عملکردی نشان‌دهنده اقدام در راستای انجام وظایف می‌باشند. در مطالعه Gertman و همکاران، روش SPAR-H به‌ترتیب مقادیر احتمال خطای انسانی اسمی (NHEP: Nominal Human Error Probability) ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ را به وظایف تشخیصی و عملکردی اختصاص داد. این مقادیر به میزان خطا در پردازش شناختی برای وظایف تشخیصی و نیز به میزان خطا در اجرای عملی ساده مانند فشاردادن یک دکمه، شماره‌گیری تلفن و یا یک لغزش ساده برای کارهای عملی اشاره می‌کنند.

مرحله ۲: ارزیابی و رتبه‌بندی هشت فاکتور شکل‌دهنده عملکرد

گام بعدی ارزیابی رویدادهای شکست انسان در عملیات

جدول ۱: تجزیه و تحلیل سلسله‌مراتبی مشاغل در عملیات پیگرانی

اپراتور	وظیفه	زیروظیفه (نماد)
ناظر	بررسی جریان گاز در خط لوله	برآورد میانگین جریان در خط لوله (X1) محاسبه سرعت گاز براساس میزان جریان گاز (X2) محاسبه سرعت متوسط گاز مورد نیاز برای عبور توپک (X3) مقایسه میانگین جریان گاز در خط لوله و سرعت متوسط مورد نیاز برای عبور توپک (X4)
	اطمینان از ابعاد توپک پیگرانی	کنترل تغییرات توپکی که قبلاً استفاده شده است (X5) مقایسه قطر توپک با بخش استوانه‌ای شکل لوله و تله (X6)
	اطمینان از بازبودن شیر در خطوط	توجه به فشارسنج شیر تخلیه (X7) چک‌کردن شیرها به‌صورت دستی (X8)
	صدور مجوز کار	تحویل کار به اپراتورها (X9) امضای مجوز (X10) تأیید اعتبار و ابطال مجوز پس از پایان شیفت (X11)
اپراتور کمپرسور	تزریق هوا به پشت توپک پیگرانی	اتصال شلنگ به خط لوله (X12) روشن‌کردن کمپرسور (X13) افزایش فشار (X14) کاهش فشار (X15) خاموش‌کردن کمپرسور (X16)
آزمون-من	پرتاب توپک پیگرانی	قراردادن توپک در هدر ارسال و خط لوله (X17) بستن درب هدر (X18) فعال‌سازی سیگنال توپک (X19) چک‌کردن دریچه‌های تخلیه درین و ونت (X20) بازکردن شیر کیکر (Kicker Valve) برای افزایش فشار (X21) چک‌کردن فشارسنج (X22)
	دریافت توپک پیگرانی	بازنمودن شیر بای‌پس برای کاهش فشار (X23) بازنمودن شیر ونت و درین به‌منظور تخلیه خط لوله (X24) چک‌کردن فشارسنج و اطمینان از تخلیه کامل خط لوله (X25) برداشتن پیگ از داخل هدر دریافت پیگ (X26) تمیزکردن خطوط لوله از زباله‌های باقی‌مانده از عملیات پیگرانی (به‌منظور پیشگیری از آتش‌سوزی و انفجار در خطوط لوله) (X27)

پیگرانی براساس هشت فاکتور شکل‌دهنده عملکرد ارائه‌شده در جدول ۲ می‌باشد. در این مطالعه هر فاکتور شکل‌دهنده عملکرد با توجه به شرایط مرتبط با رویدادهای شکست انسانی مورد بررسی قرار گرفت؛ بنابراین، مقادیر عددی براساس دستورالعمل روش SPAR-H به هر رویداد شکست انسانی اختصاص داده شد. برای دستیابی به این هدف، تعدادی مصاحبه با کارشناسان و اپراتورهای شرکت‌کننده در عملیات پیگرانی همراه با مشاهده روند کار صورت گرفت.

مرحله ۳: تخمین احتمال بروز خطای انسانی محاسبه‌شده بر مبنای حالات فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد

پس از تعیین سطوح مربوط به فاکتورهای شکل‌دهنده در عملیات پیگرانی، ابتدا مقدار فاکتور شکل‌دهنده ترکیبی (PSF Composite) از طریق ضرب این سطوح برآورد شد. سپس، احتمال بروز خطای انسانی نهایی از طریق ضرب مقدار خطای انسانی اسمی در مقدار PSF Composite محاسبه گردید (رابطه ۱).

$$HEP=NHEP.\prod_1^8 PSFs$$ رابطه ۱

در شرایطی که فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد با سه سطح منفی یا بیشتر (سطوح با ضریب بیشتر از ۱) در دسترس بودند، مقدار خطای انسانی با استفاده از یک ضریب اصلاح محاسبه گردید (رابطه ۲).

$$HEP=\frac{NHEP.\prod_1^8 PSFs}{NHEP.(\prod_1^8 PSFs-1)+1}$$ رابطه ۲

HEP: احتمال بروز خطای انسانی

NHEP: احتمال بروز خطای انسانی اسمی (برای وظایف

جدول ۲: فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد در روش SPAR-H (حالات مرتبط و ضرایب مربوط به حالات)

فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد (PSFs: Performance Influencing Factors)	حالات	ضرایب (وظایف تشخیصی)	ضرایب (وظایف عملکردی)
زمان در دسترس	بسیار زیاد	۰/۰۱	۰/۰۱
	زیاد	۰/۱	۰/۱
	اسمی	۱	۱
	به سختی کافی	۱۰	۱۰
	ناکافی	HEP=۱	HEP=۱
استرس	اسمی	۱	۱
	بالا	۲	۲
	شدید	۵	۵
پیچیدگی	تشخیص واضح	۰/۱	-
	اسمی	۱	۱
	نسبتاً پیچیده	۲	۲
	بسیار پیچیده	۵	۵
تجربه/آموزش	بالا	۰/۵	۰/۵
	اسمی	۱	۱
	پایین	۱۰	۳
رویه	اسمی	۱	۱
	در دسترس اما ضعیف	۵	۵
	ناکامل	۲۰	۲۰
	عدم دسترسی	۵۰	۵۰
ارگونومی/تداخل انسان- ماشین	خوب	۰/۵	۰/۵
	اسمی	۱	۱
	ضعیف	۱۰	۱۰
	عدم توجه	۵۰	۵۰
تناسب با وظیفه	اسمی	۱	۱
	تناسب پایین	۵۰	۵۰
	عدم تناسب	HEP=۱	HEP=۱
فرایند کاری	خوب	۰/۸	۰/۵
	اسمی	۱	۱
	ضعیف	۵	۵

تشخیصی و عملکردی به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱)
PSF: فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد

مرحله ۴: محاسبه احتمال بروز خطای انسانی مستقل

برای یک رویداد شکست انسان مستقل که ترکیبی از وظایف تشخیصی و عملکردی می‌باشد، دو احتمال بروز خطای انسانی به‌صورت جداگانه تعریف شد و در ادامه برای محاسبه احتمال بروز خطای انسانی ترکیبی، این دو مقدار با یکدیگر جمع گردیدند. احتمالات بروز خطای انسانی برای وظایف مستقل براساس رابطه ۳ محاسبه گشت.

رابطه ۳ $=HEP_A+HEP_D P_{W/OD}$

$P_{W/OD}$: احتمال بروز خطای انسانی مستقل
HEP_A: احتمال بروز خطای انسانی برای وظایف عملکردی
HEP_D: احتمال بروز خطای انسانی برای وظایف تشخیصی

مرحله ۵: ارزیابی وابستگی بین وظایف

در روش SPAR-H، وابستگی بین دو وظیفه به میزان اثر یک وظیفه بر عملکرد وظیفه دیگر اشاره دارد [۱۸]. این وابستگی ممکن است بین دو وظیفه انجام‌شده توسط یک اپراتور و یا در میان وظایف متعدد انجام‌شده توسط اپراتورهای مختلف یافت شود [۱۷]؛ در نتیجه ممکن است احتمال خطای انسانی در یک وظیفه با تأثیر بر احتمال خطای انسانی در وظیفه دیگر منجر به افزایش آن شود. با توجه به وابستگی بین برخی از وظایف، پنج نوع وابستگی (کامل، زیاد، متوسط، کم و صفر) در میان وظایف براساس اپراتور (یکسان یا متفاوت)، زمان (انجام‌شدن به‌صورت هم‌زمان و یا در زمان‌های متفاوت)، محل (یکسان یا متفاوت) و دلیل (اضافی یا غیراضافی) تعیین گردیدند. پس از تعیین سطح وابستگی، برای ارزیابی احتمال شکست بین دو وظیفه متوالی با وابستگی متقابل (PW/OD: probability (human error) without dependency) راهنمای ارائه‌شده در زیر مورد استفاده قرار گرفت:

- احتمال شکست برای دو وظیفه با وابستگی کامل برابر با ۱ است.
- احتمال شکست برای دو وظیفه با وابستگی بالا معادل 1+Pw/od) /2) است.
- احتمال شکست برای دو وظیفه با وابستگی متوسط برابر با 1+6×Pw/od) /7) است.
- احتمال شکست برای دو وظیفه با وابستگی کم معادل 1+19×Pw/od) /20) است.

یافته‌ها

در این بخش فرایند پیاده‌سازی روش SPAR-H در عملیات پیگرانی در جداول ۳ و ۴ به‌طور خلاصه ارائه شده است. به‌طور کلی، پنج اپراتور در عملیات پی‌جویانی در شرکت انتقال گاز مورد مطالعه فعالیت می‌کردند؛ از این رو ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی برای تمامی وظایف انجام‌شده توسط اپراتورهای فعال در

جدول ۳: امتیازدهی فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد و برآورد مقادیر HEP_A و HEP_D در وظایف عملیات پیگرانی شرکت انتقال گاز مورد مطالعه

وظیفه/ زیروظیفه	اپراتور	وظیفه تشخیصی، عملکردی یا هردو	فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد								احتمال خطای انسانی	
			زمان در دسترس	استرس/ استرسور	پیچیدگی	تجربه/ آموزش	رویه‌ها	ارگونومی/ تداخل انسان- ماشین	تناسب با وظیفه	فرایند کاری	تشخیصی (HEP_D)	عملکردی (HEP_A)
X1	ناظر ۱	تشخیصی	۱	۱	۲	۱	۵	۱	۱	۱	۰/۱	-
X2	ناظر ۱	تشخیصی	۱	۱	۲	۱	۵	۱	۱	۱	۰/۱	-
X3	ناظر ۱	تشخیصی	۱	۱	۲	۱	۵	۱	۱	۱	۰/۱	-
X4	ناظر ۱	تشخیصی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۱	-
X5	ناظر ۱	تشخیصی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۱	-
X6	ناظر ۱	تشخیصی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۱	-
X7	ناظر ۱	تشخیصی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۱	-
X8	ناظر ۱	عملکردی	۱	۱	۱	۱	۵	۱	۱	۱	-	۰/۰۰۵۰
X9	ناظر ۲	تشخیصی	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۲	-
X10	ناظر ۲	تشخیصی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۱	-
X11	ناظر ۲	تشخیصی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۱	-
X12	اپراتور کمپرسور	عملکردی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۰/۰۰۱
X13	اپراتور کمپرسور	عملکردی	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۰/۰۰۲
X14	اپراتور کمپرسور	عملکردی	۱	۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۰/۰۲۵
X15	اپراتور کمپرسور	عملکردی	۱	۱	۱	۱	۵	۱	۱	۱	-	۰/۰۵
X16	اپراتور کمپرسور	عملکردی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۰/۰۰۱
X17	تست-من ۱	عملکردی	۱	۲	۲	۱	۱	۱۰	۱	۱	-	۰/۰۳۸۴۹
X18	تست-من ۱	عملکردی	۱	۱	۱	۱	۵	۱۰	۱	۱	-	۰/۰۵

ادامه جدول ۳.

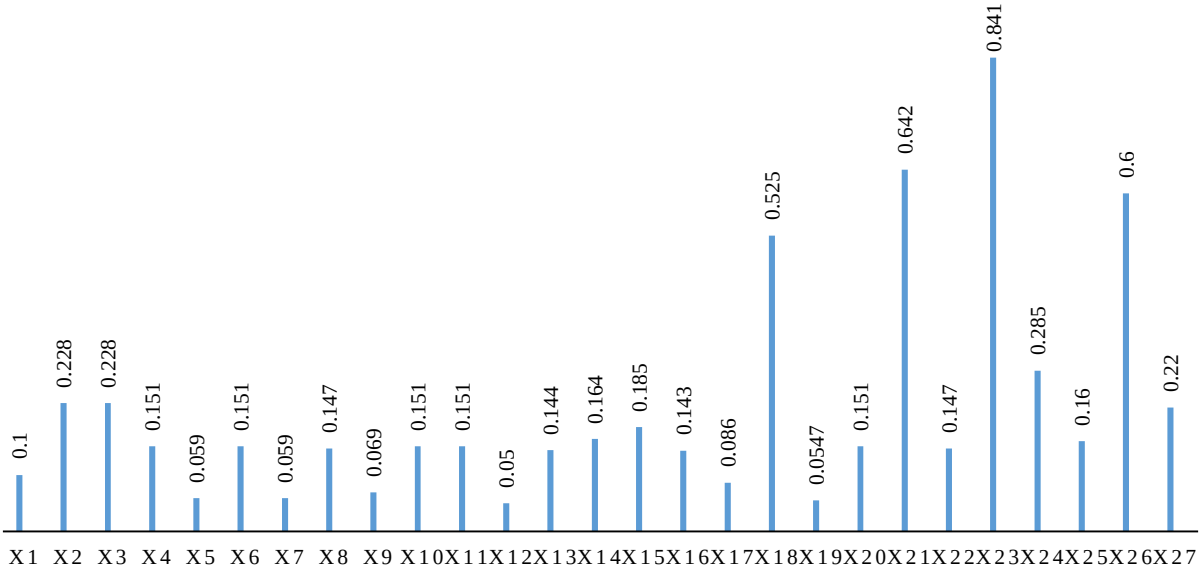
X19	تست-من ۱	عملکردی	۱	۱	۱	۱	۵	۱	۱	-	۰/۰۰۵۰
X20	تست-من ۱	تشخیصی	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۰۱	-
X21	تست-من ۱	عملکردی	۱۰	۲	۲	۱	۱	۱۰	۱	-	۰/۲۸۵۹۲
X22	تست-من ۱	تشخیصی	۱	۱	۱	۱	۰/۵	۱	۱	۰/۰۰۵	-
X23	تست-من ۲	عملکردی	۱۰	۵	۲	۱	۵	۱۰	۱	-	۰/۸۳۳۴۷
X24	تست-من ۲	عملکردی	۱	۱	۲	۱	۵	۱۰	۱	-	۰/۱۶۶۸۱
X25	تست-من ۲	تشخیصی	۱	۲	۲	۱	۰/۵	۱	۱	-	۰/۰۲
X26	تست-من ۲	عملکردی	۱	۵	۱	۱	۵	۱۰	۱	-	۰/۲۰۰۱۶
X27	تست-من ۲	عملکردی	۱	۲	۱	۱	۵	۱۰	۱	-	۰/۰۹۰۹۹

جدول ۴: احتمال بروز خطای انسانی نهایی در وظایف عملیات پیگرانی

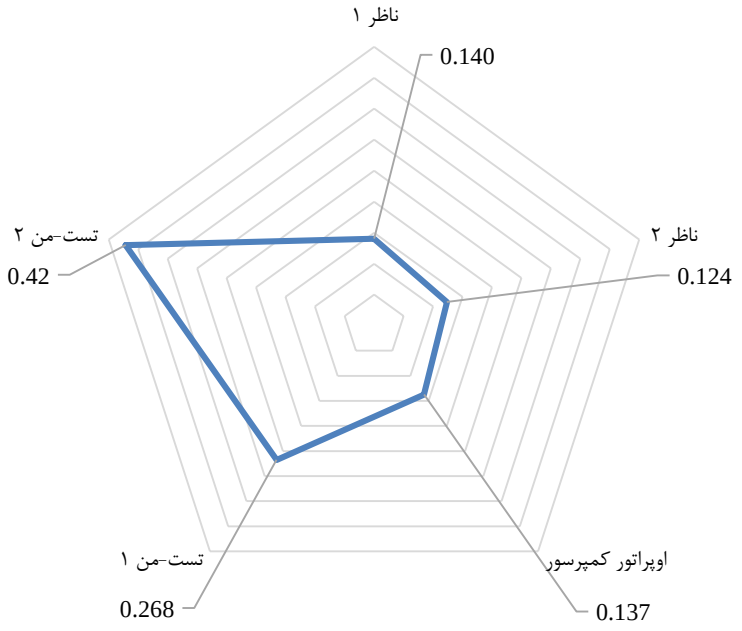
وظیفه/زیروظیفه	اپراتور	HEP_D	HEP_A	$P_{W/OD}$	وابستگی	$P_{W/D}$	احتمال خطای انسانی نهایی
X1	ناظر ۱	۰/۱	-	۰/۱	-	۰/۱	۰/۱
X2	ناظر ۱	۰/۱	-	۰/۱	متوسط	۰/۲۲۸	۰/۲۲۸
X3	ناظر ۱	۰/۱	-	۰/۱	متوسط	۰/۲۲۸	۰/۲۲۸
X4	ناظر ۱	۰/۰۱	-	۰/۰۱	متوسط	۰/۱۵۱	۰/۱۵۱
X5	ناظر ۱	۰/۰۱	-	۰/۰۱	پایین	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹
X6	ناظر ۱	۰/۰۱	-	۰/۰۱	متوسط	۰/۱۵۱	۰/۱۵۱
X7	ناظر ۱	۰/۰۱	-	۰/۰۱	پایین	۰/۰۵۹	۰/۰۵۹
X8	ناظر ۱	-	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۰	متوسط	۰/۱۴۷	۰/۱۴۷
X9	ناظر ۲	۰/۰۲	-	۰/۰۲	پایین	۰/۰۶۹	۰/۰۶۹
X10	ناظر ۲	۰/۰۱	-	۰/۰۱	متوسط	۰/۱۵۱	۰/۱۵۱
X11	ناظر ۲	۰/۰۱	-	۰/۰۱	متوسط	۰/۱۵۱	۰/۱۵۱
X12	اپراتور کمپرسور	-	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	پایین	۰/۰۵۰	۰/۰۵۰
X13	اپراتور کمپرسور	-	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	متوسط	۰/۱۴۴	۰/۱۴۴
X14	اپراتور کمپرسور	-	۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	متوسط	۰/۱۶۴	۰/۱۶۴
X15	اپراتور کمپرسور	-	۰/۰۵	۰/۰۵	متوسط	۰/۱۸۵	۰/۱۸۵
X16	اپراتور کمپرسور	-	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	متوسط	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳
X17	تست-من ۱	-	۰/۰۳۸۴۹	۰/۰۳۸۴۹	پایین	۰/۰۸۶	۰/۰۸۶
X18	تست-من ۱	-	۰/۰۵	۰/۰۵	بالا	۰/۵۲۵	۰/۵۲۵
X19	تست-من ۱	-	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۰	پایین	۰/۰۵۴۷	۰/۰۵۴۷
X20	تست-من ۱	۰/۰۱	-	۰/۰۱	متوسط	۰/۱۵۱	۰/۱۵۱
X21	تست-من ۱	-	۰/۲۸۵۹۲	۰/۲۸۵۹۲	بالا	۰/۶۴۲	۰/۶۴۲
X22	تست-من ۱	۰/۰۰۵	-	۰/۰۰۵	متوسط	۰/۱۴۷	۰/۱۴۷
X23	تست-من ۲	-	۰/۸۳۳۴۷	۰/۸۳۳۴۷	پایین	۰/۸۴۱	۰/۸۴۱
X24	تست-من ۲	-	۰/۱۶۶۸۱	۰/۱۶۶۸۱	متوسط	۰/۲۸۵	۰/۲۸۵
X25	تست-من ۲	-	۰/۰۲	۰/۰۲	متوسط	۰/۱۶۰	۰/۱۶۰
X26	تست-من ۲	-	۰/۲۰۰۱۶	۰/۲۰۰۱۶	بالا	۰/۶۰۰	۰/۶۰۰
X27	تست-من ۲	-	۰/۰۹۰۹۹	۰/۰۹۰۹۹	متوسط	۰/۲۲۰	۰/۲۲۰
میانگین	-	-	-	-	-	-	۰/۲۱۸

این عملیات انجام شد. این اپراتورها شامل: دو ناظر (با هفت و چهار سال سابقه کاری)، یک اپراتور کمپرسور (با شش سال سابقه کاری) و دو تست-من (با هشت و چهار سال سابقه کاری) بودند. وظایف و زیروظایف حاصل از روش ارزیابی سلسله‌مراتبی مشاغل در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملیات پیگرانی شامل هفت وظیفه اصلی و ۲۷ زیروظیفه می‌باشد. در جدول ۳ نتایج ارزیابی هریک از هشت فاکتور شکل‌دهنده عملکرد با توجه به زمینه زیروظایف از جمله نوع وظایف (تشخیصی، عملکردی یا هر دو) همراه با اپراتورهای شرکت‌کننده و مقادیر HEP_A و HEP_D برای تمامی زیروظایف ارائه شده است. جدول ۴ نیز نشان‌دهنده مقادیر $P_{W/OD}$، $P_{W/OD}$، HEP_D و HEP_A سطح وابستگی و احتمال بروز

خطای انسانی نهایی برای هریک از زیروظایف در عملیات پیگرانی می‌باشد. با توجه به مقادیر احتمال خطای انسانی محاسبه‌شده، میانگین مقادیر احتمال خطای انسانی در عملیات پیگرانی معادل ۰/۲۱۸ به‌دست آمد. بر مبنای نتایج، بالاترین مقدار احتمال بروز خطای انسانی نهایی مربوط به زیروظیفه "بازکردن شیر بای‌پس برای کاهش فشار" بود. از سوی دیگر، زیروظایف "اتصال شلنگ به خط لوله" و "کنترل تغییرات در توپکی که قبلاً مورد استفاده قرار گرفته است" به‌عنوان قابل‌اطمینان‌ترین زیروظایف در عملیات پیگرانی شناخته شدند؛ به‌طوری که دارای کمترین مقادیر احتمال بروز خطای انسانی بودند. شکل ۱ مقادیر احتمال بروز خطای انسانی نهایی را در زیروظایف عملیات پیگرانی نشان می‌دهد. مقایسه احتمال بروز خطای انسانی نهایی در گروه‌های شغلی فعال در عملیات پیگرانی نیز در شکل ۲ ارائه شده است. براساس شکل ۱، اکثر وظایفی که در حین عملیات پیگرانی انجام می‌شوند، به لحاظ احتمال بروز خطای انسانی در سطح قابل‌قبولی قرار دارند. از سوی دیگر، احتمال خطای انسانی در هشت زیروظیفه از ۲۷ زیروظیفه انجام‌شده در عملیات پیگرانی بالاتر از میانگین احتمال بروز خطای انسانی می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۱ و ۲ می‌توان گفت که در میان اپراتورهایی که در عملیات پیگرانی شرکت داشتند، تست-من ۲ (در مرحله دریافت توپک پیگرانی) دارای بیشترین احتمال بروز خطای انسانی در شرکت مورد مطالعه بود.



شکل ۱: مقایسه احتمال خطای انسانی در میان زیروظایف عملیات پیگرانی



شکل ۲: میانگین احتمالات بروز خطای انسانی در اپراتورهای فعال در عملیات پیگرانی شرکت انتقال گاز مورد مطالعه

بحث

مطالعه حاضر با هدف تعیین ویژگی‌های رویدادهای شکست انسان همراه با تعیین احتمالات بروز خطای انسانی در عملیات پیگرانی در یک شرکت انتقال گاز از طریق پیاده‌سازی روش واکاوی ریسک خطاهای انسانی (SPAR-H) انجام شد. در مرحله اول، تجزیه و تحلیل سلسله‌مراتبی صورت گرفت. در این پژوهش در مجموع، هفت وظیفه اصلی و ۲۷ زیروظیفه فرعی مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که میانگین احتمال خطای انسانی در عملیات پیگرانی معادل ۰/۲۱۸ می‌باشد. علاوه‌براین، زیروظیفه "بازنمودن شیر بای‌پس برای کاهش فشار" که توسط اپراتور تست-من ۲ انجام شد، به‌عنوان بالاترین مقدار احتمال خطای انسانی (۰/۸۴۱) در بین زیروظایف عملیات پیگرانی مشخص گردید. این امر ناشی از زمان تقریباً ناکافی برای تکمیل زیروظیفه، سطح شدید استرس در حین اجرای وظیفه، کار دارای پیچیدگی متوسط، دستورالعمل ضعیف در دسترس و شرایط ضعیف ارگونومیکی می‌باشد. این خطا ممکن است منجر به افزایش فشار گاز/مایع در پشت توپک پیگرانی شود. باید توجه داشت که لازم است فشار در سطح پایینی نگه داشته شود تا از شکست (پارگی) در دریافت‌کننده توپک جلوگیری گردد و توپک پیگرانی به سمت اپراتورها پرتاب نشود. در پژوهش حاضر زیروظیفه "بازکردن شیر کیکر برای افزایش فشار" با احتمال خطای انسانی معادل ۰/۶۴۲ رتبه دوم احتمال بروز خطا را به خود اختصاص داد. ذکر این نکته ضرورت دارد که وابستگی بین دو زیروظیفه متوالی می‌تواند مقدار احتمال خطای انسانی را افزایش دهد. به این معنا که برای کاهش احتمال خطای انسانی لازم است وابستگی بین وظایف متوالی از طریق افزایش تعداد اپراتورهای فعال کاهش یابد. علاوه‌براین، "برداشتن پیگ از داخل هدر دریافت پیگ" نیز دارای سومین رتبه احتمال خطای انسانی در بین مقادیر احتمال خطای انسانی در عملیات پیگرانی با احتمال خطای انسانی ۰/۶۰۰ بود. سطح استرس شدید، دستورالعمل ضعیف در دسترس، شرایط ارگونومیکی ضعیف و وابستگی بالا بین زیروظایف، عوامل اصلی بروز مقدار احتمال خطای انسانی بالا بودند. اگر این زیروظیفه به درستی انجام نشود، این خطا ممکن است موجب انفجار یا پرتاب‌شدن توپک پیگرانی به سمت اپراتورها گردد. در پژوهش حاضر زیروظیفه "بستن درب هدر" یک زیروظیفه بحرانی با مقدار احتمال خطای انسانی قابل‌توجه (۰/۵۲۵) بود که از وابستگی زیاد بین وظایف و دستورالعمل ضعیف در دسترس و شرایط ضعف ارگونومیکی ناشی می‌شد. علاوه‌براین، مقادیر احتمال خطای انسانی در زیروظایف "محاسبه سرعت گاز براساس میزان جریان گاز"، "محاسبه سرعت متوسط گاز مورد نیاز برای عبور توپک"، "بازنمودن شیر ونت و درین به‌منظور تخلیه خط لوله" و "تمیزکردن خطوط لوله از زباله‌های باقی‌مانده از عملیات پیگرانی" بالاتر از میانگین احتمال خطای انسانی در عملیات پیگرانی بود که این امر ناشی از شرایط کاری استرس‌زا و نامناسب و سطوح برخی از فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد می‌باشد.

در این راستا در مطالعه‌ای که توسط جهانگیری و همکاران در سال ۲۰۱۶ به‌منظور ارزیابی خطای انسانی در یک صنعت پتروشیمی در ایران در ارتباط با سیستم مجوز کار انجام شد، نتایج نشان دادند که میانگین احتمال خطای انسانی در این سیستم معادل ۰/۱۱ می‌باشد. همچنین در این مطالعه احتمال خطای انسانی در زیروظایف "امضای مجوز" و "تأیید اعتبار و ابطال مجوز پس از پایان شیفت" معادل ۰/۰۰۵ تخمین زده شد [۱۳]. همان‌طور که ذکر گردید، در پژوهش حاضر میانگین احتمال خطای انسانی معادل ۰/۲۱۸ بود که این میزان با نتایج مطالعه جهانگیری و همکاران اختلاف زیادی دارد. این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در صنایع مورد مطالعه و در نتیجه تفاوت در شرایط کاری و تجربه اپراتورهای شاغل در دو صنعت باشد. همچنین در مطالعه حاضر احتمال خطای انسانی در زیروظایف "امضای مجوز" و "تأیید اعتبار و ابطال مجوز پس از پایان شیفت" معادل ۰/۱۵۱ تخمین زده شد که تفاوت معناداری با مطالعه جهانگیری و همکاران داشت. این تفاوت می‌تواند به دلیل ریسک‌های بالای موجود در عملیات پیگرانی نظیر فشار بالای گاز/مایع در خط لوله، سرعت بالای توپک پیگرانی در خط لوله، خطر برخورد توپک با اپراتورها و تجهیزات و همچنین خطر بروز انفجار در عملیات پیگرانی و یا ضعف دستورالعمل‌های به کار گرفته‌شده در عملیات باشد.

در این زمینه، در مطالعه‌ای که توسط عیوضلو و همکاران در سال ۱۳۹۷ در ارتباط با یک ژنراتور تولید داروی هسته‌ای با استفاده از روش SPAR-H در ایران انجام شد، میانگین احتمال خطا معادل ۰/۳۲۰ به‌دست آمد. همچنین در این مطالعه ۸۰ درصد از زیروظایف دارای سطح بالایی از استرس بودند و ۷۶ درصد از آن‌ها پیچیدگی داشتند که این امر نشان از همبستگی بالای این دو فاکتور دارد. علاوه‌براین، در این مطالعه حدود ۵۰ درصد از زیروظایف دارای دستورالعمل ضعیف و ۷۳ درصد دارای شرایط ارگونومیکی ضعیف بودند که این موضوع بیانگر تأثیر این دو فاکتور بر بروز خطای انسانی است [۱۹]. از سوی دیگر، نتایج مطالعه حاضر مؤید همبستگی بین استرس و پیچیدگی می‌باشند. یکی از دلایل اصلی احتمال بروز خطای انسانی، دستورالعمل‌ها و شرایط ارگونومیکی ضعیف است که با نتایج مطالعه عیوضلو و همکاران مطابقت دارد.

با توجه به اینکه روش SPAR-H برای صنایع هسته‌ای گسترش داده شده است، محدودیت عمده این پژوهش عدم تطابق کامل این روش با عملیات مورد مطالعه بود؛ از این رو پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با استفاده از شبکه‌های بیزین و احتمالات پیشین و در نتیجه افزایش همبستگی بین روش و

صنعت مورد مطالعه با این تهدید مقابله شود.

نتیجه‌گیری

روش SPAR-H طیف قابل‌قبولی از عوامل اثرگذار بر عملکرد انسان در ارزیابی‌های عملیات صنعتی را از طریق کاربرد تعداد قابل‌قبولی از فاکتورهای شکل‌دهنده عملکرد ارائه می‌دهد. این روش کاربری آسانی داشته و یک ابزار ساده و مفید برای متخصصان به‌منظور محاسبه احتمال بروز خطای انسانی می‌باشد. علاوه‌براین، SPAR-H یک روش کاربردی برای مدیران به‌منظور کاهش خطرات مرتبط با عملکرد انسان است. براساس نتایج حاصل از مطالعه حاضر، برخی از اقدامات پیشگیرانه برای کاهش احتمال بروز خطای انسانی در عملیات پیگرانی پیشنهاد می‌شود که عبارت هستند از: آماده‌سازی دستورالعمل‌ها و رویه‌های اختصاصی‌تر و روشن‌تر برای وظایفی که توسط اپراتورهای تست-من انجام می‌شوند، تقسیم و طبقه‌بندی بیشتر زیروظایف پیچیده به زیروظایف ساده‌تر به‌منظور کاهش پیچیدگی آن‌ها، مهیانمودن شرایط محیطی با استرس ذهنی و فیزیکی کمتر که می‌تواند استرس کلی را در اپراتورها کاهش دهد، اتوماسیون‌سازی فرایندهای ارسال و دریافت توپک پیگرانی برای کاهش میزان درگیرشدن اپراتورها با این فرایندها در عملیات پیگرانی و افزایش آموزش دوره‌ای برای اپراتورهای باتجربه‌تر.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت حرفه‌ای مصوب در دانشگاه علوم پزشکی همدان در سال ۱۳۹۶ می‌باشد که با حمایت مالی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی همدان با شماره ثبت ۹۶۰۸۰۹۵۰۰۶ انجام شده است. بدین‌وسیله پژوهشگران از این معاونت محترم و نیز کارمندان شرکت انتقال گاز همدان و کرمان که در تکمیل پرسشنامه‌ها همکاری نموده و دقت لازم را مبذول داشتند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

REFERENCES

1. Restrepo CE, Simonoff JS, Zimmerman R. Causes, cost consequences, and risk implications of accidents in US hazardous liquid pipeline infrastructure. *Int J Crit Infrastruct Protect*. 2009;**2**(1-2):38-50. DOI: 10.1016/j.ijcip.2008.09.001
2. Reason J. A cognitive engineering perspective on maintenance errors. Cognitive engineering in the aviation domain. Routledge: Taylor & Francis; 2000. P. 309-25.
3. Ramírez-Camacho JG, Carbone F, Pastor E, Bubbico R, Casal J. Assessing the consequences of pipeline accidents to support land-use planning. *Saf Sci*. 2017;**97**:34-42. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.01.021
4. Vats S. Health monitoring of new and aging pipelines-development and application of instrumented pigs. *Adv Materials Res*. 2012;**433**:6121-7. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.6121
5. Aliabadi MM, Esmaeili R, Mohammadfam I, Ashrafi M. Human reliability analysis (HRA) using standardized plant analysis risk-human (SPAR-H) and bayesian network (BN) for pipeline inspection gauges (PIG) operation: a case study in a gas transmission plant. *Health Scope*. 2019;**8**(3):e87148. DOI: 10.5812/jhealthscope.87148
6. Blast at Topak recipient injures two workers in Fars province. Taadol Newspaper. Available at: URL: http://www.taadolnewspaper.ir; 2016.
7. Two killed in accident at GAIL's pipeline in Telangana. New Delhi: The Economic Times; 2015.
8. Weber M, Arnrich S, Wilk E, Lessig R. Death by a cleaning pig--an unusual accident at work. *Arch Kriminol*. 2004; **214**(3-4):77-84. PMID: 15553280
9. Fatal incident stresses importance of eliminating human error on pigging operations. Amersham: A Halma Company; 2013.
10. Akyuz E, Celik M. A hybrid human error probability determination approach: the case of cargo loading operation in oil/chemical tanker ship. *J Loss Prev Proc Indust*. 2016;**43**:424-31. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.06.020
11. Bubbico R, Carbone F, Ramírez-Camacho JG, Pastor E, Casal J. Conditional probabilities of post-release events for hazardous materials pipelines. *Proc Saf Environ Protect*. 2016;**104**:95-110. DOI: 10.1016/j.psep.2016.08.011
12. Guntu KR, Al-Kandari AR, Al-Hajeri N. Safety Controls in process operations-gathering centers (GC) & booster stations (BS). SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Manama, Bahrain; 2015. DOI: 10.2118/172699-MS
13. Jahangiri M, Hoboubi N, Rostamabadi A, Keshavarzi S, Hosseini AA. Human error analysis in a permit to work system: a case study in a chemical plant. *Saf Health Work*. 2016;**7**(1):6-11. PMID: 27014485 DOI: 10.1016/j.shaw.2015.06.002
14. Gould KS, Ringstad AJ, van de Merwe K. Human reliability analysis in major accident risk analyses in the Norwegian petroleum industry. *Proc Hum Factors Ergon Soc Ann Meet*. 2012;**56**(1):2016-20. DOI: 10.1177/1071181312561421
15. van de Merwe K, Øie S, Gould K. The application of the SPAR-H method in managed-pressure drilling operations. *Proc Hum Factors Ergon Soc Ann Meet*. 2012;**56**(1):2021-5. DOI: 10.1177/1071181312561422
16. Whaley AM, Kelly DL, Boring RL, Galyean WJ. SPAR-H step-by-step guidance. New York: Idaho National Laboratory (INL); 2012.
17. Gertman D, Blackman H, Marble J, Byers J, Smith C. The SPAR-H human reliability analysis method. Columbus: US Nuclear Regulatory Commission; 2005. P. 230.
18. Blackman HS, Boring RL. Assessing dependency in SPAR-H: some practical considerations. International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, Cham, Switzerland; 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-60645-3_2
19. Eyvazlou M, Dadashpour Ahangar A, Rahimi A, Davarpanah MR, Sayyahi SS, Mohebali M. Human reliability assessment in a 99Mo/99mTc generator production facility using the standardized plant analysis risk-human (SPAR-H) technique. *Int J Occup Saf Ergon*. 2018;**25**(2):321-30. PMID: 29227214 DOI: 10.1080/10803548.2017.1415832