JOHE
Journal of Occupational Hygiene Engineering
J Occup Hyg Eng, 2022; 9(2): 111-119. Doi: 10.52547/johe.9.2.111
https://johe.umsha.ac.ir

Original Article

# Risk Safety Assessment of Human Factors using Analytical Hierarchy Process Approach

Seyed Amin Moosavi[1,*], Shahabeddin Kamyab[2]

[1] Department of Mining Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
[2] Safety Research Center, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

**Article history:**
**Received:** 27 May 2021
**Revised:** 06 March 2022
**Accepted:** -17 March 2021
**ePublished:** 13 November 2022

***Corresponding author:** Seyed Amin Moosavi, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

Email: mailto:aminmoosavi@vru.ac.ir

## Abstract

**Background and Objective:** The inherent and unique risks of mining projects quite often present key challenges that health and safety risks are among the most significant risks in mining projects since the mining industry is characterized by a relatively high injury and death rate compared to other industries. Various factors including human, environmental, machinery and tools affect mining safety that the role of human factor is significant at different levels and based on it, it is necessary to assess the risks associated with human factors separately. In mining project management, safety risk assessment is an important step toward identifying potential hazards and evaluating the risks associated with the hazards. Proper safety risk prioritization is very crucial during the risk assessment for planning, budgeting and managing safety-related risks. Despite the importance of the risk assessment, in many Iranian mines, some of which include large mines, there is a lack of appropriate and scientific approach to the issue.

**Materials and Methods:** In the present paper, we have tried to examine the application of Analytical Hierarchy Process (AHP) as a quantitative method for risk assessment with a special focus on the open pit mining industry. The identification and classification of risk assessment is based on the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) model. Then, the analysis is performed by collecting experts grading to determine the weights of important accident-causing factors at various levels of a working system in open pit mines.

**Results:** The weight of human factor indices has been evaluated at four levels. At different levels, organizational atmosphere factors, improper performance of fault correction, resource management and decision error have been identified as the most significant factors leading to human accidents in open pit mines.

**Conclusion:** By using AHP method, the role and importance of various factors affecting safety in open pit mines at different levels of managerial and organizational factors, supervisory and leadership factors, preventive factors and executive factors have been investigated. This analysis can play a decisive role in the field of establishment and optimization of the safety management system, including formulation of policies, organization, planning, evaluation and implementation of activities in a safe manner.

**Keywords:** Analytical Hierarchy Process, Human Factors, Open Pit Mines, Risk Assessment, Safety

**Please cite this article as follows:** Moosavi S A, Kamyab Sh. Risk Safety Assessment of Human Factors Using Analytical Hierarchy Process Approach. *J Occup Hyg Eng.* 2022; 9(2): 111-119. DOI: 10.52547/johe.9.2.111

**Copyright** © 2022 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

JOHE
مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای
دوره ۹، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، صفحات: ۱۱۱-۱۱۹
https://johe.umsha.ac.ir
UMSHA Press

مقاله پژوهشی

# ارزیابی خطر عوامل انسانی در معدن‌کاری روباز با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی

سید امین موسوی[۱*]، شهاب‌الدین کامیاب[۲]

[۱] گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران
[۲] مرکز تحقیقات ایمنی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

**تاریخ دریافت مقاله:** ۱۴۰۰/۰۳/۰۶
**تاریخ ویرایش مقاله:** ۱۴۰۰/۱۲/۱۵
**تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۴۰۰/۱۲/۲۶
**تاریخ انتشار مقاله:** ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

*** نویسنده مسئول:**
سید امید موسوی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران.
ایمیل:
mailto:aminmoosavi@vru.ac.ir

## چکیده

**سابقه و هدف:** ریسک‌های ذاتی و منحصر به فرد در پروژه‌های معدنی اغلب چالش‌هایی را به همراه دارد که مخاطرات ایمنی یکی از مهم‌ترین آن‌ها است، زیرا معدنکاری در مقایسه با سایر صنایع با میزان آسیب نسبتاً بالایی همراه است. از سویی دیگر عوامل متنوعی شامل عوامل انسانی، محیطی، ماشین‌آلات و ابزارها بر ایمنی معدنکاری اثرگذارند که نقش عامل انسانی قابل توجه بوده و بر اساس آن ضروری است که ارزیابی ریسک‌های مرتبط با آن به صورت جداگانه بررسی گردد. در مدیریت پروژه‌های معدنی، ارزیابی ریسک ایمنی گام مهمی در جهت شناسایی خطرات بالقوه و ارزیابی ریسک‌های مرتبط است. اولویت‌بندی مناسب ریسک‌های ایمنی در طول ارزیابی ریسک برای برنامه‌ریزی، بودجه‌بندی و مدیریت ریسک‌های ایمنی بسیار بااهمیت است. روش‌های متنوعی برای ارزیابی ریسک در صنایع مخاطره‌آمیز توسعه داده شده که انتخاب روش مناسب ارزیابی ریسک به فاکتورهای زیادی ازجمله نوع مخاطرات، دسترسی به داده‌ها، منابع و نیروهای متخصص متناسب بستگی دارد. علیرغم اهمیت ارزیابی ریسک، تاکنون در بسیاری از معادن ایران، کمبود رویه مناسب و علمی نسبت به موضوع ملاحظه می‌شود. از این رو، در این مقاله با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به عنوان یک روش کمی با نگاه ویژه به معدنکاری روباز، ارزیابی ریسک عوامل انسانی مطالعه شده است.

**مواد و روش‌ها:** در این بررسی، روش تحلیل فرآیند سلسله مراتبی (AHP) به عنوان یک روش مؤثر در تعیین ضرایب وزنی بر مبنای تئوری سیستم شبکه و سنجش جامع چند-هدفی با استفاده از آن فاکتورهای مختلف در لایه‌های مرتب شده مورد استفاده قرار گرفته است. شناسایی و طبقه‌بندی ارزیابی ریسک بر مبنای ساختار مدل سیستم تحلیل و طبقه‌بندی فاکتورهای انسانی (HFACS) صورت گرفته است. تجزیه و تحلیل با جمع‌آوری نظرات خبرگان برای تعیین وزن عوامل مهم حادثه‌ساز در چهار سطح مختلف سیستم کاری در معادن روباز انجام شده است. در سطوح مختلف، عوامل جو سازمانی، عملکرد نامناسب اصلاح عیوب، مدیریت منابع و خطای تصمیم‌گیری شاخص‌ترین عوامل منجر به حوادث انسانی در معادن روباز شناسایی شده است.

**یافته‌ها:** وزن نرمال شده فاکتورهای مربوط به عوامل مختلف در هر کدام از سطوح چهارگانه مدل HFACSبرای شناسایی ریسک‌های عوامل انسانی در صنعت معدنکاری روباز، با استفاده از فرآیند AHPمحاسبه شده است. بر این اساس، تأثیر جو سازمانی، عملکرد نامناسب در اصلاح عیوب، وضعیت ذهنی و روحی کارکنان و خطاهای تصمیم‌گیری، در سطوح مختلف شاخص‌های ارزیابی از بیشترین درجه اهمیت برخوردار هستند.

**نتیجه‌گیری:** با استفاده از روش تحلیل فرآیند سلسله مراتبی نقش و اهمیت عوامل مختلف مؤثر بر ایمنی در معادن روباز در سطوح مختلف عوامل مدیریتی و سازمانی، عوامل سرپرستی و راهبری، عوامل پیشگیرانه و عوامل اجرایی مورد بررسی و نقش و اهمیت این عوامل مورد بحث قرار گرفته است. این تحلیل می‌تواند در زمینه استقرار و بهینه‌سازی نظام سیستم مدیریت ایمنی شامل تدوین خط‌مشی‌ها، سازماندهی، برنامه‌ریزی، ارزیابی و اجرای فعالیت‌ها به صورت ایمن نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا نماید.

**واژگان کلیدی:** ارزیابی ریسک، ایمنی، عوامل انسانی، فرایند سلسله مراتبی، معادن روباز

**استناد:** موسوی، سید امین؛ کامیاب، شهاب‌الدین. ارزیابی ریسک عوامل انسانی در معدن‌کاری روباز با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی. مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای، تابستان ۱۴۰۱؛۹(۲): ۱۱۹-۱۱۱.

## مقدمه

میزان حوادث در صنایعی که محیط کار سخت و خطرناکی دارند، مانند معادن، در مقایسه با صنایع دیگر معمولاً بیشتر است. در مهندسی ایمنی، مفهوم ارزیابی ریسک (Risk Assessment) شامل شناسایی مخاطرات و تجزیه‌وتحلیل ریسک‌های محتمل به‌منظور کمینه‌سازی سطح ریسک‌ها تا حد ممکن است [۱]. سیستم مدیریت ایمنی (Safety Management System) فرایندی پویاست که معمولاً شامل فعالیت‌های مدیریتی و فرایندهای مرتبط با هدف بهبود کارایی ایمنی سازمان است و در صنایع مختلفی ازجمله صنایع هسته‌ای، فضایی، شیمیایی، نفت و دیگر صنایع به‌طور موفقیت‌آمیزی به‌کار گرفته شده است.

محققان زیادی روی تجزیه‌وتحلیل و بررسی عوامل انسانی منجر به حوادث تحقیق کرده‌اند. Farmer و Chambers [۲] مفهوم تمایل مخاطره‌پذیری (Accident Prone Tendency) را معرفی کردند. آنان معتقد بودند که برخی افراد شخصیت خاصی دارند که به‌راحتی مستعد ایجاد شرایط مخاطره می‌شود [۳]. Heinrich و همکاران [۴] شخصیت انسان و محیط اجتماعی را به‌عنوان مسبب ارتکاب خطا معرفی کردند و معتقد بودند که اشتباه یک فرد ممکن است موجب اقدام ناایمن و درنتیجه وقوع حادثه صنعتی شود. آنان همچنین نظریه دومینو را معرفی کردند. این نظریه حوادث را ناشی از زنجیره‌ای از رخدادهای متوالی می‌داند و اصطلاح دومینوهای در حال سقوط را برای آن به‌کار برده است. هنگامی که یکی از دومینوها سقوط می‌کند، دومینوی بعدی را تحریک می‌کند و به همین ترتیب دومینوهای بعدی و بعدی. حذف یک عامل کلیدی، مانند یک وضعیت ناایمن، از شروع واکنش زنجیره‌ای جلوگیری می‌کند. طبق نظر محققان مختلف در مسیر توسعه زنجیره، علل حوادث عامل انسانی از سطح فردی به سطح سازمانی تبدیل شده است [۳].

با توسعه مفهوم مدیریت ایمنی و با درک تأثیر عوامل انسانی، تاکنون پژوهشگران زیادی در حوزه‌های مختلف به این موضوع پرداخته‌اند [۵،۹]. Cigularov و همکاران [۱۰] نقش توسعه فرهنگ ایمنی و افزایش آگاهی و مهارت‌های ایمنی کارکنان را در راستای کاهش مخاطرات بسیار مهم دانسته‌اند. برخی از محققان دیگر نیز نقش و اهمیت تدوین قوانین و مقررات ایمنی را در راستای افزایش سطح آگاهی کارکنان و درنتیجه کاهش احتمال وقوع حادثه در سازمان‌ها بررسی کرده‌اند [۱۱،۱۲]. Nie و همکاران [۱۳] تأثیر مشاوره روان‌شناختی و طول مدت مناسب استراحت کارکنان را در بهبود شرایط ایمنی نشان داده‌اند. مطالعات مختلفی در زمینه نقش عوامل انسانی در مدیریت ایمنی در صنایع مختلف با رویکردهای متفاوتی انجام شده است، اما در تمام موارد، نقش و اهمیت عامل انسانی مهم و اثرگذار ذکر شده است.

علاوه بر مطالعات انجام‌شده در زمینه نقش عوامل انسانی در مهندسی ایمنی در صنایع مختلف، محققان مختلفی به‌طور خاص به صنعت معدن‌کاری و اهمیت و نحوه اثرگذاری عوامل انسانی بر ایمنی فعالیت‌های معدنی پرداخته‌اند. در این خصوص Paul و همکاران [۱۴] نقش عوامل مختلف ازجمله عوامل انسانی را در مخاطرات معدن زغال‌سنگ با استفاده مطالعات موردی در دو معدن زیرزمینی در هندوستان بررسی کردند. آنان تأثیر عوامل جمعیت‌شناختی، رفتاری و محیطی را بر مخاطرات ناشی از عامل انسانی مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که نارضایتی شغلی و نقصان عواطف انسانی دو عامل اصلی در سطح عوامل انسانی در حوادث ناشی از عملکرد ضعیف کارگران نقش اساسی دارد که شناسایی و حذف نگرش‌های منفی در شخصیت کارگران را مهم جلوه داده است. در مطالعه‌ای که اداره معادن ایالات‌متحده انجام داد، تقریباً ۸۵ درصد از تمام حوادث معدن را حداقل به یک خطای انسانی نسبت داد [۱۵]. از طرفی دیگر، تحقیقات نشان داده است با وجود اینکه تنها ۱ درصد از نیروی کار جهانی در صنعت معدن‌کاری فعالیت دارد، ۵ درصد از حوادث مرگبار ناشی از کار در حوزه معدن اتفاق می‌افتد [۱۶].

با توجه به اهمیت و همبستگی عوامل انسانی با سایر عوامل مخاطره‌آمیز در ایمنی صنایع مختلف خصوصاً صنعت معدن‌کاری، محققان مختلفی در زمینه ارزیابی کمّی ریسک عوامل انسانی تحقیق کرده‌اند. Shappell و همکاران [۱۷،۱۸] یک مدل طبقه‌بندی عوامل انسانی را به نام سیستم تحلیل و طبقه‌بندی عوامل انسانی (Human Factors Analysis and Classification System: HFACS) ابتدا برای نیروی هوایی ارتش ایالات‌متحده با تمرکز بر جنبه‌های عوامل انسانی در صنعت هوانوردی و به‌منظور درک عوامل زمینه‌ای منجر به حوادث توسعه دادند. امروزه سیستم HFACS ابزار کارآمدی برای فرایند شناسایی سیستماتیک شکست‌های فعال و پنهان ریسک‌فاکتورهای انسانی در سازمان‌های مختلف است [۳]. در این مدل، عوامل انسانی خطاها در چهار سطح شکست توصیف می‌شود. این سطوح شامل سطح تأثیرات سازمانی، راهبری ناایمن، پیش‌نیازهای فعالیت ایمن و فعالیت‌های ناایمن می‌شود.

به‌منظور درک عوامل انسانی شناسایی‌شده مؤثر بر ایمنی، ارزیابی کمّی ریسک‌ها ضرورت دارد. محققان روش‌های مختلفی را برای ارزیابی کمّی ریسک‌ها توسعه داده و به کار گرفته‌اند. هدف از ارزیابی کمّی سطح ریسک در یک سیستم صنعتی، بررسی میزان اثرگذاری و اهمیت نسبی عوامل نسبت به یکدیگر است. درنتیجه ارزیابی کمّی، تأثیر عوامل زمینه‌ای بر عملکرد انسانی نیز ارزیابی می‌شود. این روش‌ها بر تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی هستند. فرایند سلسله مراتبی (Analytical Hierarchy Process: AHP) یکی از مرسوم‌ترین روش مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره (Multicriteria Decision Aided Method: MCDA) است که

Saaty [۱۹،۲۰] آن را توسعه داده است [۲۱].

با توجه به اهمیت موضوع و تأثیرپذیری نقش عوامل انسانی از فرهنگ شخصی و سازمانی در کشورهای مختلف، در این مقاله ریسک عوامل انسانی به‌طور خاص در صنعت معدن‌کاری روباز ایران بررسی و ارزیابی شده است. این پژوهش بر مبنای ساختار مدل HFACS، شناسایی و طبقه‌بندی ارزیابی ریسک عوامل انسانی انجام شده است. سپس با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی و با امتیازدهی ۹ درجه‌ای دو-دویی، برای قضاوت بین عوامل آرایه‌های مختلف ماتریس قضاوت حاصل جمع‌آوری اطلاعات از افراد فعال در حوزه معدن‌کاری روباز، میزان تأثیر اجزای مختلف عوامل انسانی بر مخاطرات ایمنی حوزه معدن‌کاری روباز کمّی و قابل توصیف شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این ارزیابی می‌توان به‌طور مؤثری در سیاست‌گذاری کاهش مخاطرات و افزایش سطح ایمنی در معادن روباز استفاده کرد. با استفاده از این روش عوامل ناایمن انسانی رایج و مسیرهای منتهی به مخاطرات ناشی از آن به‌طور مقایسه‌ای کمّی شده است و انجام اقدامات پیشگیرانه و بهبوددهنده بر مبنای آن موجب افزایش سطح ایمنی ناشی از عوامل انسانی در فعالیت‌های مربوطه خواهد شد.

### ضرورت ارزیابی ریسک

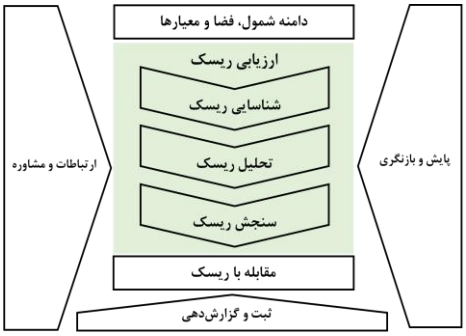
هرچند تعریف استاندارد و واحدی برای سیستم مدیریت ایمنی وجود ندارد و مدل‌های زیادی برای انتخاب اجزای سیستم مدیریت ایمنی ارائه شده است، به‌طورکلی مؤلفه اساسی سیستم مدیریت ایمنی معرفی‌شده شامل خط‌مشی، سازمان‌دهی، برنامه‌ریزی، ارزیابی و پیاده‌سازی برای بهبود است [۲۲،۲۳]. اهمیت ارزیابی ریسک در این بین بسیار قابل توجه و به طوری است که بر سایر مؤلفه‌های سیستم مدیریت ایمنی تأثیر دارد. بر این اساس اصولاً مدیریت ریسک بر تجزیه‌وتحلیل حوادث و مخاطرات مبتنی است. این موضوع لزوماً به معنی تحلیل صرف مخاطرات گذشته نیست و باید پیشگیرانه عمل کرد. در زمینه این مسئله به دلیل انعطاف‌پذیری انسان و توانایی فکری خلاقانه او، پتانسیل خاصی برای مدیریت انطباقی وجود دارد [۲۴].

به دلیل احتمال خطای فردی یا عدم موفقیت در انجام وظیفه در برخی شرایط و نیز مشکلات ناشی از سلامتی، کیفیت کارکرد و تصمیم‌گیری شخص ممکن است تحت تأثیر قرار گیرد. پیش‌بینی و تحلیل‌پذیری پیش‌بینی عوامل انسانی مؤثر بر مخاطرات همواره دشوار است. ارزیابی امکاناتی که ناشی از منحصربه‌فرد بودن توانایی‌های انسانی است نیز پیچیده است. این در حالی است که نقش محض سایر عوامل مانند فناوری، ابزار، ماشین‌آلات و فرایندهای کار نسبتاً ساده‌تر، قابل پیش‌بینی و تحلیل‌پذیرتر است.

بنابراین، نقش عامل انسانی شامل جمع‌آوری و تجزیه‌وتحلیل اطلاعات مربوط به توانایی‌های فردی، محدودیت‌ها و سایر ویژگی‌های شغلی، تعامل متقابل، تعامل آن‌ها با ماشین‌آلات و ابزارها، سیستم‌ها و محیط به‌منظور تحقق بخشیدن به روند کار ایمن اهمیت زیادی دارد. انسان ماشین‌آلات را راهبری و کنترل می‌کند، فرایندهای کاری را تنظیم و سازمان‌دهی می‌کند و قوانین و رویه‌ها را اعمال می‌کند [۲۵]. رفتار فردی کارکنان نیز ممکن است شرایط بحرانی ایجاد کند و درنتیجه موجب فاجعه‌ای در محیط کاری پرخطر شود، به‌طوری‌که رفتار ناایمن کارکنان خط مقدم به‌عنوان یک عامل حیاتی و مستقیم مؤثر بر خسارات و حوادث در صنایع پرریسک به شمار می‌رود [۲۶].

مدیریت ریسک نقش مهمی در سیستم‌های مدیریت ایمنی مرتبط با خطاهای انسانی دارد، به‌طوری‌که تجزیه‌وتحلیل چیزی را فراهم می‌سازد که در حین کار مخاطره‌آمیز است و فرد می‌تواند اقدامات احتیاطی انجام‌شده را مرور کند و در صورت لزوم آن‌ها را افزایش دهد تا از آسیب جلوگیری کند [۲۳]. فرایند مدیریت ریسک سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO-31000-2018) در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس این استاندارد، فرایند مدیریت ریسک شامل به‌کارگیری خط‌مشی‌ها، روش‌های اجرایی و اقداماتی برای فعالیت‌های ارتباطات و مشاوره، برقراری فضا و ارزیابی، علاج، پایش، بازنگری، ثبت و گزارش ریسک است.

در این بین ارزیابی ریسک فرایندی است که شامل شناسایی، تجزیه‌وتحلیل و سنجش ریسک است. هدف ارزیابی ریسک، ارزیابی منظم ریسک‌های بالقوه مرتبط با یک فعالیت است. خروجی ارزیابی ریسک، ورودی فرایند تصمیم‌گیری در صنعت است. مقابله با ریسک یا علاج‌بخشی شامل تعیین و ارزیابی گزینه‌های اصلاحی برای تعدیل ریسک‌ها و آماده‌سازی و پیاده‌سازی طرح‌های اصلاحی است. گزینه‌های اصلاح ریسک که به سلسله مراتب کنترل نیز معروف است، شامل موارد حذفی (حذف کامل خطر)، جایگزینی (جایگزین کردن خطر)، مهندسی (جدا کردن اشخاص از خطرات با استفاده از ابزارهای مهندسی)، مدیریت (کنترل مخاطرات با استفاده از فرایندهای آموزشی)، امکانات حفاظت شخصی (دوری از مخاطرات با استفاده از کلاه، کفش، عینک ایمنی، دستکش و ...) و رفتار ایمن انسانی (کنترل مخاطرات با آگاهی‌رسانی، دستورالعمل‌ها و انطباق‌پذیری با قوانین و فرایندها) است [۲۷].

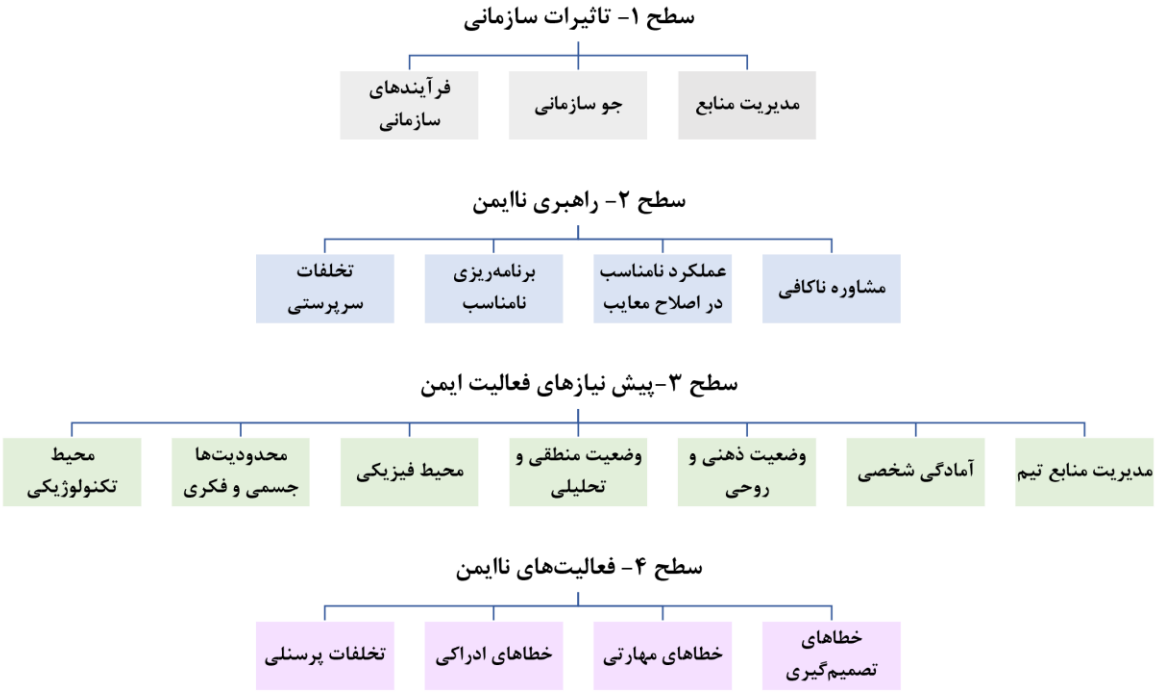



**شکل ۱:** مدل فرایندی مدیریت ریسک استاندارد ISO-31000-2018 [۲۷]

## روش کار

روش تحلیل فرایند سلسله مراتبی روشی مؤثر در تعیین ضرایب وزنی بر مبنای تئوری سیستم شبکه و سنجش جامع چندهدفی است که با استفاده از آن عوامل مختلف در یک مسئله پیچیده به لایه‌های مرتب تقسیم می‌شود که هرکدام با دیگری همبستگی جفتی دارد [۲۸،۲۹]. آن‌گاه بر اساس تصمیم‌گیری فازی هدف، اهمیت نسبی هر عامل به صورت کمّی بیان می‌شود. ضرایب وزنی عوامل مختلف معرف میزان اهمیت عامل هدف است که با استفاده از محاسبات جبری به‌دست می‌آید [۳۰].

به‌منظور بررسی کمّی ریسک‌های ناشی از عوامل انسانی در صنعت، بر اساس روش فرایند سلسله مراتبی، ساختار AHP از بالا به پایین شامل لایه هدف، لایه استاندارد و لایه شاخص است. این ساختار در ۴ سطح و ۱۸ شاخص سنجش مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. ساختار ۴ سطحی بر مبنای مدل شناسایی و طبقه‌بندی ارزیابی ریسک HFACS انتخاب شده است. درجه اهمیت هرکدام از عوامل در هر لایه را گروهی از افراد خبره تعیین می‌کنند. این افراد از بین متخصصان حوزه مهندسی معدن، ایمنی در سطوح مختلف کارشناسی تا مدیریتی در بخش‌های اجرایی




**شکل ۲:** چارچوب سطوح مدل فرایندی

مشاوران، پیمانکاران و کارفرمایان معدنی انتخاب می‌شوند. بر این اساس ۴ عدد ماتریس قضاوت ($S$) متناظر با هرکدام از سطوح تشکیل داده می‌شود:

$$S_l = [u_{ij}]^{l}_{n\times n} \qquad (۱)$$

در این رابطه $S_l$ ماتریس مرتبه $n$ متناظر با سطح $l$ و $u_{ij}$ آرایه‌های سطر $i$ و ستون $j$ ماتریس هستند. آرایه‌های شاخص سنجه $u_{ij}$ در مقیاس نه‌تایی (۱ تا ۹) به عوامل به صورت زوجی تخصیص داده می‌شود. مقیاس امتیازدهی ۹ درجه‌ای در جدول ۱ نشان داده شده است.

بر اساس داده‌های مستخرج از نظرات افراد خبره، ماتریس‌های قضاوت برای چهار سطح مدل HFACS شامل عوامل سازمانی، رفتار راهبری و سرپرستی ناایمن، پیش‌نیازهای

**جدول ۱:** مقیاس امتیازدهی آرایه‌های ماتریس قضاوت

| مقیاس | مفاهیم و توضیحات مربوط به امتیازدهی |
|---|---|
| ۱ | درجه اهمیت یکسان هر دو شاخص $i$ و $j$ |
| ۳ | درجه اهمیت کمی بیشتر یک شاخص نسبت به دیگری |
| ۵ | درجه اهمیت نسبتاً زیاد یک شاخص در مقابل دیگری |
| ۷ | درجه اهمیت قابل توجه یک شاخص در مقابل دیگری |
| ۹ | درجه اهمیت غیرقابل مقایسه یک شاخص در برابر دیگری |
| ۸-۶-۴-۲ | معرف ارزش‌های بینابینی حالت‌های بالا |

(الزامات) رفتار ایمن و رفتار ناایمن به ترتیب با $S_1$ تا $S_4$ به صورت زیر به‌دست آمده است.

بیشینه مقدار ویژه (Matrix Eigenvalues) ($\lambda_{max}$) برای هرکدام از این ماتریس‌ها محاسبه شده است. بر این اساس به‌منظور کنترل سازگاری ماتریس‌های قضاوت، معیار سازگاری

(Consistency Index: CI) به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \qquad (۲)$$

در این رابطه $CI$، $n$ و $\lambda_{max}$ به ترتیب معرف معیار سازگاری، تعداد عوامل در هر ماتریس و بیشینه مقادیر ویژه ماتریس قضاوت برای هر سطح هستند. همچنین معیار شاخص میانگین سازگاری تصادفی (Average Random Consistency Index: RI) برای هر ماتریس قضاوت به صورت تابعی از مرتبه ماتریس از جدول ۲ استخراج می‌شود. بر این اساس، شاخص نسبت سازگاری تصادفی (Consistency Ratio) به شکل زیر به‌دست می‌آید [۱۹]:

$$CR = \frac{CI}{RI} \qquad (۳)$$

نسبت سازگاری تصادفی کمتر از ۰/۱۰ (CR<۰/۱۰) متضمن سازگاری رده‌بندی حاصل از روش AHP است؛ بدین معنی که ضرایب وزنی تخصیص داده‌شده امکان‌پذیر هستند. در غیر این‌صورت، مقادیر مؤلفه‌های ماتریس مربوطه به بازبینی و اصلاح نیاز خواهند داشت. شاخص‌های مربوط به هر ماتریس قضاوت در جدول ۳ ارائه شده و نشان داده شده است که مقادیر CR برای هر چهار ماتریس قضاوت در شرط سازگاری صادق هستند.

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} \\ 4 & 1 & 3 \\ 2 & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}, S_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 3 & 2 \\ 1 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 2 & 1 \end{bmatrix}, S_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 4 & 1 & 2 & 4 \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{2} & 3 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 2 \\ \frac{1}{2} & 2 & 1 & 5 & 3 & 2 & 5 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 3 \\ 1 & 2 & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 2 & 1 \\ \frac{1}{2} & 3 & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{2} & 1 & 3 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}, \qquad (۴)$$

$$S_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{2} & 3 \\ \frac{1}{4} & 2 & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

**جدول ۲:** مقادیر شاخص تصادفی میانگین [۱۹]

| n | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۴ | ۱۵ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| RI | ۰ | ۰ | ۰/۵۸ | ۰/۹۰ | ۱/۱۲ | ۱/۲۴ | ۱/۳۲ | ۱/۴۱ | ۱/۴۵ | ۱/۴۹ | ۱/۵۱ | ۱/۵۴ | ۱/۵۶ | ۱/۵۸ | ۱/۵۹ |

**جدول ۳:** شاخص ماتریس‌های قضاوت

| ماتریس | $\lambda_{max}$ | n | RI | CI | CR |
|---|---|---|---|---|---|
| $S_1$ | ۳/۰۱۸۳ | ۳ | ۰/۵۸ | ۰/۰۰۹۱ | ۰/۰۱۵۷ |
| $S_2$ | ۴/۱۷۰۷ | ۴ | ۰/۹۰ | ۰/۰۵۶۹ | ۰/۰۶۳۲ |
| $S_3$ | ۷/۷۷۲۹ | ۷ | ۱/۳۲ | ۰/۱۲۸۸ | ۰/۰۹۷۶ |
| $S_4$ | ۴/۱۷۴۲ | ۴ | ۰/۹۰ | ۰/۰۵۸۱ | ۰/۰۶۴۵ |

## نتایج

وزن نرمال‌شده عوامل مربوط به عوامل مختلف در هرکدام از سطوح چهارگانه مدل HFACS برای شناسایی ریسک‌های عوامل انسانی در صنعت معدن‌کاری روباز با استفاده از فرایند AHP محاسبه شده است. وزن نرمال‌شده فاکتورهای هرکدام از سطوح به‌دست‌آمده در جدول ۴ معرف این است که تأثیر جوّ سازمانی در مقایسه با فرایندهای تدوین سازمان و سپس هر دو عامل در مقایسه با مدیریت و تخصیص منابع اهمیت بیشتری دارند. این در حالی است که جوّ سازمانی نسبت به سایر عوامل نقش و اهمیت بسیار قابل توجهی در سطح تأثیرات سازمانی دارد. در سطح دوم (سطح راهبری) به ترتیب اهمیت عوامل وابسته به عملکرد نامناسب در اصلاح عیوب، مشاوره ناکافی، تخلفات سرپرست و برنامه‌ریزی نامناسب شناسایی شده است. در سطح

**جدول ۴:** وزن معیارها

| شاخص | وزن | شاخص | وزن |
|---|---|---|---|
| سطح ۱- تأثیرات سازمانی | | آمادگی شخصی | ۰/۰۹۵۳ |
| مدیریت منابع | ۰/۱۳۶۵ | وضعیت ذهنی و روحی | ۰/۲۵۱۸ |
| جوّ سازمانی | ۰/۶۲۵۰ | وضعیت منطقی و فکری | ۰/۰۷۲۶ |
| فرایندهای سازمانی | ۰/۲۳۸۵ | محیط فیزیکی | ۰/۱۲۸۲ |
| سطح ۲- راهبری ناایمن | | محدودیت‌های جسمی و فکری | ۰/۱۳۸۲ |
| مشاوره ناکافی | ۰/۲۳۰۳ | محیط تکنولوژیک | ۰/۰۵۳۱ |
| عملکرد نامناسب در اصلاح معایب | ۰/۴۲۸۷ | سطح ۴- فعالیت‌های ناایمن | |
| برنامه‌ریزی مناسب | ۰/۱۴۷۲ | خطاهای تصمیم‌گیری | ۰/۵۵۰۹ |
| تخلفات سرپرستی | ۰/۱۹۳۸ | خطاهای مهارتی | ۰/۱۶۶۵ |
| سطح ۳- پیش‌نیازهای فعالیت ایمن | | خطاهای ادراکی | ۰/۱۹۸۰ |
| مدیریت منابع تیم | ۰/۲۶۰۸ | تخلفات شخصی | ۰/۰۸۴۶ |

پیش‌نیازهای مورد نیاز برای فعالیت ایمن به ترتیب مدیریت منابع در سطح تیم اجرایی، وضعیت ذهنی و روحی، محدودیت‌های جسمی و ذهنی، محیط فیزیکی، آمادگی، وضعیت منطقی و تحلیلی و محیط تکنولوژیک اهمیت دارند. در پایین‌ترین سطح یعنی در سطح فعالیت‌های اجرایی، نقش و اهمیت عوامل مختلف به ترتیب شامل خطاهای تصمیم‌گیری، خطاهای ادراکی، خطاهای مهارتی و تخلفات است.

## بحث

### نقش عوامل سازمانی

بر اساس بررسی انجام‌شده، عامل جوّ سازمانی در سطح عوامل سازمانی به‌عنوان شاخص‌ترین عامل منجر به حوادث انسانی در معادن روباز با وزن نرمال ۰/۶۲۵۰ نشان داده شده است. وزن بالای عامل جوّ سازمانی در مقایسه با سایر عوامل در سطح سازمانی، مبین نقش و اهمیت فضا و نگاه مدیریت به مقوله ایمنی و کارکرد ایمن در محیط کار معدنی است. به عبارتی دیگر، احتمالاً دلیل وزن بالای جوّ سازمانی، تأکید بیش از حد بر تولید است، درحالی‌که به اندازه کافی بر ایمنی و نقص در ساختارها و سیاست‌های مدیریتی سازمان تأکید نیست. لذا نبود سازوکار کارآمد مدیریتی در القا و ایجاد جوّ سالم سازمانی موجب آسیب‌پذیری زیاد فرایندهای ایمنی و طبعاً بهره‌وری در معادن می‌شود. این در حالی است که با پیاده‌سازی سازوکار مدیریتی مناسب تا حد زیادی امکان افزایش ضریب ایمنی ناشی از نقش و اهمیت بالاترین سطح یعنی سطح سازمانی به وجود خواهد آمد.

فرایندهای سازمانی در رده دوم با وزن نرمال ۰/۲۳۸۵ نشان‌دهنده اهمیت این عامل در رده دوم نسبت به جوّ سازمانی است. نکته مهم در این خصوص، تنیدگی و پیوستگی دو عامل جوّ سازمانی و فرایندهای سازمانی است که تا حدودی بر یکدیگر اثر دارند. هرچند وزن عامل فرایندها در مقابل جوّ سازمانی بسیار کمتر است، اما اصلاح فرایندهای سازمانی در رده بالای مدیریتی کمک شایانی به بهبود جوّ سازمانی خواهد کرد. بنابراین، مدیریت کارآمد فرایندها با وجود اینکه مستقیماً بر مدیریت آسیب‌های کاری و ایمنی نقش دارد، به واسطه تأثیرگذاری بر اصلاح جوّ سازمانی می‌تواند به بهبود عملکرد ایمنی در سطح عوامل سازمانی منتهی شود.

مدیریت منابع در مقابل سایر عوامل مؤثر سازمانی با وزن ۰/۱۳۶۵ در پایین‌ترین رده قرار گرفته است. ازآنجاکه نمود و بروز نقش مدیریت منابع در ارتباط با موضوع ایمنی منعکس‌کننده کمیت و کیفیت هزینه‌کرد سازمان در تأمین منابع انسانی، امکانات، تأسیسات و تجهیزات مربوطه است، به نظر می‌رسد در معادن روباز کشور نسبت به سایر عوامل سازمانی، عملکرد سازمانی در تخصیص و مدیریت منابع لازم مطلوب‌تر است. البته این گزاره الزاماً بدین معنی نیست که در مواجهه با موضوع ایمنی در محیط کار وضعیت مدیریت منابع بهینه است، بلکه به‌طور نسبی در مقایسه با دو عامل فرایندها و جوّ سازمانی وزن اثر این عامل کمتر است. لذا همچنان می‌توان گفت که تمهیدات ناکافی یا ناصحیح، ضعف در استفاده از تجهیزات مناسب یا نبود بازرسی‌های به‌موقع تجهیزات و همچنین تخصیص ندادن نیروهای متخصص شرایطی را ایجاد می‌کند که در پیشگیری و کنترل وقوع حوادث بی‌اثر هستند.

### نقش عوامل راهبری

در سطح عوامل مربوط به راهبری عملیات کاری، عملکرد نامناسب در اصلاح معایب قبلی با وزن نرمال ۰/۴۲۸۷ در مقایسه با سایر عوامل مهم‌ترین عامل در وقوع حوادث عمده در معادن روباز شناخته شده است. معمولاً عدم تصحیح و رفع مشکلات و معایب قبلی ناشی از عدم شناسایی معضلات یا صرف‌نظر از پاره‌ای موارد به دلایلی ازجمله تأثیرات ناچیز قبلی رخ می‌دهد. با توجه به تأثیر قابل توجه این عامل، ضروری است در معادن روباز تمهیدات راهبری به نحوی اتخاذ شود که شناسایی کاستی‌ها یا نقض افراد، تجهیزات و امکانات به نحو مؤثر بدون توجه به میزان اثر آن انجام شود.

همچنین تجزیه‌وتحلیل رخدادهای گذشته نقش قابل ملاحظه‌ای در پیشگیری از حوادث آتی خواهد داشت.

دو عامل مشاوره ناکافی در زمینه ایمنی و تخلفات سرپرستی به ترتیب با وزن‌های نرمال ۰/۲۳۰۳ و ۰/۱۹۳۸ در درجه اهمیت دوم و سوم در رده راهبری قرار دارند. به عبارتی دیگر، ارائه مشاوره و آموزش و نظارت مستمر سرپرستان بر عملکرد اپراتورها و کارکنان زیردست نقش مهمی در کاهش مخاطرات خواهد داشت. از طرف دیگر، تخطی سرپرستان از امور محوله نیز تقریباً به همان میزان نگران‌کننده است. عامل برنامه‌ریزی کارها در پیشبرد ایمن امور در رده راهبری با وزن ۰/۱۴۷۲ حاکی از اختلاف نسبتاً کم این عامل با دو عامل ذکرشده خصوصاً تخلفات سرپرستی است. عدم انطباق حجم و نوع کار با برنامه‌ریزی اجرای آن تأثیر منفی قابل توجهی بر پیشبرد کار به صورت ایمن دارد. این در حالی است که همواره برنامه‌ریزی مناسب به معنی تخصیص نیروهای زیاد به یک فعالیت مشخص الزاماً نیست، بلکه تنوع‌بخشی نیروها از حیث تخصص، توانمندی، تجربه و همچنین تعداد آن‌ها متناسب با شرایط کاری نقش سازنده‌ای در کیفیت اجرای ایمن امور دارد.

### نقش عوامل پیش‌نیازها

مدیریت تأمین منابع لازم برای اجرای کار تیمی با وزن ۰/۲۶۰۸ بیشترین وزن را در بین سایر عوامل مهم با عنوان پیش‌نیازهای ضروری برای اجرای کار ایمن دارد. این عامل ارتباط نزدیکی با عامل برنامه‌ریزی مناسب در رده بالاتر دارد که در بخش قبل به آن پرداخته شد. در مرتبه دوم اهمیت، وضعیت روحی و روانی ضعیف کارگران و اپراتورها یکی از دلایل عمده وقوع رفتارهای ناایمن در سطح پیش‌نیازها با وزن نرمال ۰/۲۵۱۸ برآورد شده است که اثرات خود را به صورت خستگی روحی، نگرش نامناسب، انگیزه کم و نداشتن تمرکز نشان می‌دهد. بروز این مشکلات به‌طور مستقیم بر کارکرد ایمن تأثیر دارد. بنابراین، توجه مستمر و اهمیت قائل شدن برای شرایط روحی و روانی کارکنان نقش سازنده‌ای در بهبود وضعیت ایمنی کارها به صورت پیشگیرانه دارد.

وزن عوامل محدودیت‌های توان فیزیکی و فکری و وضعیت محیط فیزیکی به ترتیب ۰/۱۳۸۲ و ۰/۱۲۸۲ محاسبه شده است. تناسب به‌کارگیری کارکنان و اپراتورها با توان فیزیکی و فکری سازگار با نوع کار، خصوصاً در مواجهه با شرایط ناایمن در رده بعدی اهمیت قرار دارد. طبیعتاً توان فیزیکی و فکری تا حدود زیادی متناسب و مرتبط با محیط فیزیکی و مشکلات محیط فیزیکی کار شامل سرما یا گرما، سروصدا و آلودگی است. شرایط آمادگی فردی کارکنان با وزن ۰/۰۹۵۳ معرف نقش آمادگی اپراتورها برای کارکرد ایمن است. به‌طور مثال، بی‌توجهی به تغذیه و سلامت جسمی افراد سبب قرارگیری آن‌ها در شرایط آمادگی فردی ضعیف می‌شود که عامل مخربی در کارکرد ایمن به حساب می‌آید. توان منطقی شخص در تجزیه‌وتحلیل و همچنین کفایت امکانات تکنولوژیک در محیط کار به ترتیب دارای وزن‌های نرمال ۰/۰۷۲۶ و ۰/۰۵۳۱ است که نشان‌دهنده درجه اهمیت کمتر این عوامل است. می‌توان بیان کرد که دلیل قرارگیری این عوامل به‌عنوان عوامل بازدارنده با وزن کمتر حاکی از اهمیت کم آن‌ها نیست، بلکه تدوین دستورالعمل‌های شفاف با سرپرستی کارآمد و همچنین کار در گروه بعضاً نیاز به تصمیم‌گیری‌های مستلزم توان تحلیلی را کمرنگ‌تر می‌کند. از طرف دیگر، اگرچه استفاده از فناوری در معادن زیرزمینی نقش بسیار مهمی در پیشگیری از حوادث دارد، نقش این عامل در معادن روباز در مقایسه با سایر عوامل پیشگیرانه تا حدودی کم‌رنگ‌تر است.

### نقش عوامل اجرایی

در پایین‌ترین رده اجرایی و عملیاتی، اشتباه در تصمیم‌گیری به‌عنوان مؤثرترین عامل با وزن ۰/۵۵۰۱ شناخته می‌شود. این در حالی است که در رده پیشگیری، عامل توان و قدرت منطقی درجه اهمیت کمی داشت. دلیل این موضوع را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که احتمالاً عواملی که در تصمیم‌گیری درست فرد دخیل هستند، به قدرت تجزیه‌وتحلیل شخص وابستگی زیادی ندارد، بلکه بیشتر از سایر عواملی متأثر است که قبلاً به آن‌ها پرداخته شد. خطاهای مهارتی و ادراکی نیز به ترتیب با وزن‌های نرمال ۰/۱۹۸۰ و ۰/۱۶۶۵ معرف نقش آموزش و نظارت سرپرستی در رده‌های بالاتر به‌منظور ممانعت از ایجاد مشکلات متعاقب آن در سطوح پایین‌تر است. در این سطح از عملکرد، وزن عامل تخلف شخصی اپراتور یا کارگر ۰/۰۸۶۴ به‌دست آمد. در مقایسه با منابع مختلف، خطاهایی که سهواً رخ می‌دهند، نقش کارکرد عمدی ناایمن یا ناآگاهانه تخطی از قوانین در عین کمتر بودن از سایر عوامل، موضوعی نیست که به دقت نظر نیاز نداشته باشد. از این جهت نقش عوامل نظارتی و سرپرستی و گزارش کارکرد ناایمن حتی در صورت عدم بروز حادثه، به‌منظور توجیه و رصد علل و رفع آن به صورت موردی نیز ضرورت پیدا می‌کند.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش تحلیل فرایند سلسله مراتبی، نقش و اهمیت عوامل مختلف مؤثر بر ایمنی در معادن روباز در سطوح مختلف عوامل مدیریتی و سازمانی، عوامل سرپرستی و راهبری، عوامل پیشگیرانه و عوامل اجرایی بررسی شد. این مطالعه بر مبنای داده‌های مستخرج از نظرات افراد خبره فعال در معدن‌کاری روباز و با قضاوت نسبی عوامل مؤثر در هر رده تأثیر انجام شده است. در این پژوهش سازگاری مقادیر قضاوت‌ها بررسی شد. سپس وزن هرکدام از عوامل مؤثر در هر رده به‌دست آمد. سپس بر اساس وزن‌های مستخرج، به نقش و اهمیت این عوامل پرداخته شد. این تحلیل در زمینه استقرار و بهینه‌سازی نظام سیستم مدیریت ایمنی شامل تدوین

خط‌مشی‌ها، سازمان‌دهی، برنامه‌ریزی، ارزیابی و اجرای فعالیت‌ها به صورت ایمن نقش تعیین‌کننده‌ای دارد.


## تشکر و قدردانی

از داوران محترم که با نظرات ارزشمند خود در بهبود کیفیت این نوشتار نقش‌داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌گردد.


## تضاد منافع

نویسندگان این مطالعه بیان می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافعی با نتایج مطالعه ندارند.

## ملاحظات اخلاقی

مطالعه حاضر مشمول ملاحظات اخلاقی نیست.

## سهم نویسندگان

سید امین موسوی: پژوهشگر اصلی، شهاب‌الدین کامیاب: پژوهشگر فرعی.


## حمایت مالی

مطالعه حاضر بدون حمایت مالی انجام شده است.


## REFERENCES


1. Tripathy DP, Ala CK. Identification of safety hazards in Indian underground coal mines. *J Sustain Min*. 2018;**17**(4):175-83. DOI: 10.1016/j.jsm.2018.07.005
2. Farmer E, Chambers EG. A psychological study of individual differences in accident rates. London: HM Stationery Office; 1926.
3. Xie X, Guo D. Human factors risk assessment and management: Process safety in engineering. *Process Saf Environ Prot PROCESS SAF ENVIRON*. 2018;**113**:467-82. DOI: 10.1016/J.PSEP.2017.11.018
4. Heinrich HW, Peterson D, Roos N. Industrial accident prevention. New York: McGraw-Hill Book Company; 1980.
5. Cacciabue PC. Human error risk management for engineering systems: a methodology for design, safety assessment, accident investigation and training. *Reliab Eng Syst Saf*. 2004;**83**(2):229-40. DOI: 10.1016/j.ress.2003.09.013
6. Jiang W, Han W, Zhou J, Huang Z. Analysis of human factors relationship in hazardous chemical storage accidents. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;**17**(17):1-14. PMID: 32867124 DOI: 10.3390/ijerph17176217
7. Wiegmann DA, Shappell SA. Human error analysis of commercial aviation accidents: application of the human factors analysis and classification system (HFACS). *Aviat Space Environ Med*. 2001;**72**(11):1006-16. PMID: 11718505
8. Bevilacqua M, Ciarapica FE. Human factor risk management in the process industry: A case study. *Reliab Eng Syst Saf*. 2018;**169**:149-59. DOI: 10.1016/j.ress.2017.08.013
9. Wenwen S, Fuchuan J, Qiang Z, Jingjing C. Analysis and control of human error. *Procedia Eng*. 2011;**26**:1-7. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2415
10. Cigularov KP, Chen PY, Rosecrance J. The effects of error management climate and safety communication on safety: a multi-level study. *Accid Anal Prev*. 2010;**42**(5):1498–506. PMID: 20538106 DOI: 10.1016/j.aap.2010.01.003
11. Harvey B. The oaks colliery disaster of 1866: a case study in responsibility. *Bus Hist*. 2016;**58**(4):501-31. DOI: 10.1080/ 00076791.2015.1086342
12. Haas EJ, Mattson M. A qualitative comparison of susceptibility and behavior in recreational and occupational risk environments: implications for promoting health and safety. *J Health Commun*. 2016;**21**(6):705–13. PMID: 27186684 DOI: 10.1080/10810730.2016.1153765
13. Nie B, Huang X, Sun X, Li A. Experimental study on physiological changes of people trapped in coal mine accidents. *Saf Sci*. 2016;**88**:33-43. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.04.020
14. Paul PS, Maiti J, Dasgupta S, Forjuoh SN. An epidemiological study of injury in mines: implications for safety promotion. *Int J Inj Contr Saf Promot*. 2005;**12**(3):157–65. PMID: 16335433 DOI: 10.1080/15660970500088763
15. Rushworth AM, Talbot CF, Von Glehn FH, Lomas RM. Investigate the causes of transport and tramming accidents on coal mines. India: CSIR; 1999.
16. Kumar P, Gupta S, Agarwal M, Singh U. Categorization and standardization of accidental risk-criticality levels of human error to develop risk and safety management policy. *Saf Sci*. 2016;**85**:88-98. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.01.007
17. Shappell SA, Wiegmann DA. Applying reason: the human factors analysis and classification system (HFACS). *Hum Factors Aerosp Safety*. 2001;**1(1)**:59-86.
18. Shappell S, Detwiler C, Holcomb K, Hackworth C, Boquet A, Wiegmann D, et al. Human error and commercial aviation accidents: a comprehensive, fine-grained analysis using HFACS. Washington, DC: Office of Aerospace Medicine, Federal Aviation Administration; 2006.
19. Saaty TL. The analytic hierarchy process; planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill; 1980.
20. Saaty TL. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world: university of pittsburgh. RWS Publications; 1990.
21. Petruni A, Giagloglou E, Douglas E, Geng J, Leva MC, Demichela M. Applying analytic hierarchy process (AHP) to choose a human factors technique: choosing the suitable human reliability analysis technique for the automotive industry. *Saf Sci*. 2019;**119**:229-39. DOI: 10.1016/j.ssci. 2017.05.007
22. Li Y, Guldenmund FW. Safety management systems: A broad overview of the literature. *Saf Sci*. 2018;**103**:94-123. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.11.016
23. Tripathy DP. Mine safety science and engineering: health and disaster management. New York: CRC Press; 2019.
24. Kirin S, Li W, Brzakovic M, Miljanovic I, Sedmak A. Rules of risk management-case study of open pit mine. *Procedia Struct. Integr*. 2020;**28**:764-9. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.10.088
25. Kirin S, Stanojevic P, Miljanovic L, Sedmak A, Peric T, Llic P. Influence of the human factor on risks in an open-pit mine. Structural Integrity and Life. 2015;**15**(2):117-28.
26. Xia N, Griffin MA, Wang X, Liu X, Wang D. Is there agreement between worker self and supervisor assessment of worker safety performance? An examination in the construction industry. *J Safety Res*. 2018;**65**:29-37. DOI: doi/10.1016/j.jsr.2018.03.001
27. ISO 31000:2018 Risk management-Guidelines. 2018.
28. Liu R, Cheng W, Yu Y, Xu Q. Human factors analysis of major coal mine accidents in China based on the HFACS-CM model and AHP method. International Journal of Industrial Ergonomics. 2018;**68**:270-9. DOI: 10.1016/J.ERGON.2018. 08.009
29. Saaty TL. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int J Serv Sci*. 2008;**1**(1):83-98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590
30. Qiao GT, Zhu YN, He G. Evaluation of coal miners' safety behavior based on AHP-GRAP and MATLAB. *J Comput Methods Sci Eng*. 2016;**16(1)**:49-55. DOI: 10.3233/JCM-160601