

مقاله پژوهشی

رتبه بندی عوامل موثر بر مخاطرات شغلی در معادن زیرزمینی با روش نقشه شناختی فازی و تئوری اعداد Z

سیدشهاب حسینی^۱، راشد پورمیرزائی^{۲*}، سیف الدین موسی زاده^۳

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، h.seyyedshahab@modares.ac.ir

۲. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، rashed.poormirzaee@gmail.com

۳. استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، s.moosazadeh@urmia.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۳/۲۴ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

چکیده

صنعت معدنکاری صنعتی پرخطر است که در زمینه بهداشت محیط و ایمنی معدنکاران و کارکنان خود با چالش‌هایی اساسی روبه‌رو است و همه ساله تعدادی زیادی از نیروی کار معادن دچار آسیب‌های شدید جسمانی می‌شوند و یا جان خود را از دست می‌دهند. برای کنترل حوادث، کاهش مخاطرات، افزایش امنیت و سلامت معدنکاران و کاهش تلفات انسانی شناسایی مهمترین عوامل موثر بر مخاطرات شغلی در معادن زیرزمینی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه فهرستی از ۲۱ عامل رایج در وقوع حوادث معادن زیرزمینی شناسایی و در سه دسته اصلی عوامل مستقیم، عوامل مربوط به محیط کار و عوامل سیستماتیک طبقه‌بندی شد. این عوامل با قرار گرفتن در چهارچوب نقشه شناختی فازی ارزیابی شدند و اثرات علی و معلولی بین آن‌ها مشخص شد. برای رفع عدم قطعیت روابط علی و معلولی بین مفاهیم از تئوری اعداد Z استفاده شد و ارتباطی قابل اعتماد و با قطعیت بالا به دست آمد. در نهایت، این ارتباطات با قرار گرفتن در یک الگوریتم یادگیری ترکیبی شبیه‌سازی شدند و پس از انجام ۳۰ بار شبیه‌سازی، وزن نهایی هر عامل به دست آمد. نتایج نشان داد که عامل ریزش با وزن ۰/۹۹۹ بیشترین تاثیر و عامل عدم آگاهی از خطرات با وزن ۰/۶۴۱ کمترین تاثیر را در وقوع حوادث معادن زیرزمینی دارند. عامل ریزش در کنار عوامل دیگری مانند نقض قوانین ایمنی، نبود برنامه‌ریزی، نبود مدیریت ریسک، شیوه‌های کاری نایمن، عدم شناسایی خطر، اشتباهات فردی، نبود نظارت و حسابرسی و نبود مدیریت تعمیر و نگهداری در ایجاد مخاطرات شغلی موثر است.

کلمات کلیدی

مخاطرات، معدنکاری زیرزمینی، ایمنی و بهداشت، تئوری اعداد Z، الگوریتم ترکیبی یادگیری، نقشه شناختی فازی.

۱- مقدمه

کشنده را به عنوان یک عامل مهم مرگ در گالری‌های زیرزمینی چین با استفاده از یک پایگاه داده از ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ ارزیابی کردند [۷]. ژانگ^۳ و همکاران با استفاده از یک روش مبتنی بر مدل‌سازی معادلات ساختاری، روابط بین عوامل موثر بر تصادفات را در گالری‌های زیرزمینی ارزیابی کردند که برای این کار ۳۲۰ تصادف در معادن زیرزمینی بررسی شد [۸]. در سال ۱۹۸۴، بنت^۴ و پاسمور^۵ ارتباط بین تصادفات و شدت صدمات را با عوامل مختلف بر اساس تجزیه و تحلیل آماری مجموعه داده‌های تاریخی گالری‌های زیرزمینی ایالات متحده بررسی کردند [۹]. در مطالعه دیگری، آسفاو^۶ و همکاران رابطه بین سودآوری و میزان بروز آسیب‌های مربوط به محل کار را بر اساس پایگاه داده گالری‌های زیرزمینی ایالات متحده بین سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۰۸، مطالعه کردند [۱۰]. دوزگون^۷ و انیشتین^۸ با تدوین رویکردی مبتنی بر توزیع احتمالات و تجزیه و تحلیل درخت تصمیم، خطرات ریزش سقف را در گالری‌های زیرزمینی ارزیابی کردند [۱۱].

با توجه به مطالعات مورد اشاره عواملی چون ریزش، اشتباهات فردی، نقض قوانین و مقررات ایمنی، استفاده نکردن از افراد متخصص، تجهیزات نامناسب، محیط فیزیکی، محیط رفتاری، شیوه‌های کاری نایمن، عدم مدیریت لحظه‌ای تغییرات، نبود نظارت، فقدان آموزش، نبود مدیریت ریسک، ناآگاهی از خطرات، نبود مدیریت تعمیر و نگهداری، نبود برنامه‌ریزی و همچنین نبود واکنش مناسب در شرایط اضطراری از علل اصلی ایجاد حوادث در معادن زیرزمینی‌اند.

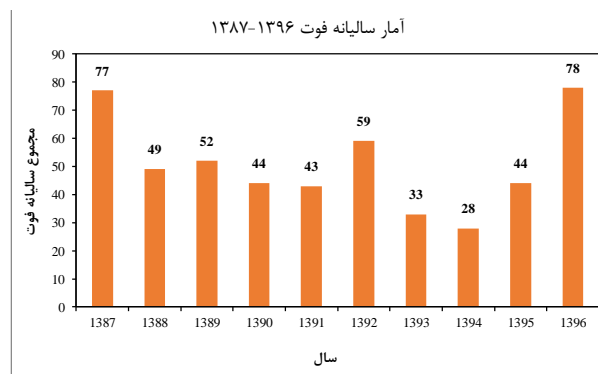
در این مطالعه پس از شناسایی مهم‌ترین عوامل موثر بر حوادث و مخاطرات معدنکاری زیرزمینی، برای ارزیابی و اولویت‌بندی این عوامل بر اساس میزان اهمیت و تاثیرگذاری علت و معلولی آن‌ها از تئوری نقشه شناختی فازی^۹ و برای رفع عدم قطعیت نظرات خبرگان از تئوری اعداد Z استفاده شد.

۲- روش‌شناسی مقاله

در مطالعه حاضر از دو روش مهم، یعنی روش نقشه شناختی فازی و یک روش سنجش عدم قطعیت مبتنی بر تئوری اعداد Z استفاده شده است که در ادامه توضیح داده می‌شوند. روندنمای انجام تحقیق حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است.

به لحاظ تاریخی معادن از جمله خطرناک‌ترین محیط‌های کاری در بسیاری از کشورهای جهان بوده‌اند و شدت و فراوانی مصدومیت‌ها، بیماری‌ها و مرگ و میرهای ناشی از این حوادث هزینه‌های سنگینی را به صنعت معدنکاری تحمیل می‌کند [۱]. مطالعات انجام شده درباره ایمنی در معادن نشان داده است که خطای انسانی تاثیرگذارترین عامل در حوادث معدنکاری است. مطالعه انجام شده به وسیله اداره معادن ایالات متحده نشان می‌دهد که خطای انسانی علت حدود ۸۵ درصد کل حوادث معدنی است [۲]. در استرالیا از هر سه حادثه شغلی دو مورد از خطای انسانی ناشی می‌شود [۳].

معدنکاری در ایران نیز از جمله صنایع پرخطر است که همه ساله حوادث منجر به فوت در آن رخ می‌دهد (شکل ۱). مقایسه آمار کشورهای مختلف نشان می‌دهد که ایمنی و بهداشت در معادن ایران فاصله زیادی با نقطه مطلوب دارد. بر اساس بررسی‌ها کمتر از ۲۰ درصد از معادن ایران واحد ایمنی و بهداشت دارند [۴].



شکل ۱- آمار فوت سالانه در معادن ایران [۵]

استخراج مواد معدنی از معادن، به دو شکل استخراج روباز و زیرزمینی انجام می‌گیرد. ریسک وقوع حوادث در معادن زیرزمینی در مقایسه با معدنکاری روباز بالاتر است. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه شناسایی و ارزیابی خطرات و حوادث معادن زیرزمینی انجام شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. ناسی^۱ عوامل اصلی حوادث محل کار را در یک معدن زیرزمینی بریتانیا مطالعه کرد [۶]. وانگ^۲ و همکاران سوانح ناشی از گازهای

⁶ Asfaw

⁷ Duzgun

⁸ Einstein

⁹ Fuzzy Cognitive Map (FCM)

¹ Nussey

² Wang

³ Zhang

⁴ Bennett

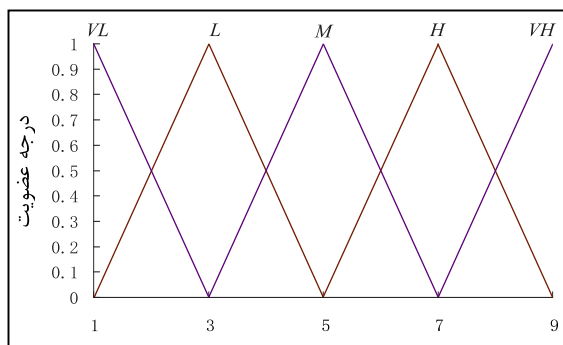
⁵ Passmore

از دحام ذرات مبتنی بر داده‌های سری زمانی‌اند. الگوریتم‌های مبتنی بر هبیین مانند الگوریتم‌های فعال^۳، غیرخطی و تفاضلی وزن حاصل از دیدگاه متخصصان و همگرایی نقشه را بهبود می‌بخشند. الگوریتم‌های ترکیبی از تلفیق الگوریتم‌های هبیین و الگوریتم‌های فراکاوشی به دست می‌آیند و وزن‌های موجود در نقشه را با نظرات متخصصان و داده‌های سری زمانی بهبود می‌بخشند [۱۵]. در این مطالعه برای تعیین دقیق وزن‌ها از ترکیب دو الگوریتم پرکاربرد هبیین غیرخطی^۴ و تکامل تفاضلی^۵ موسوم به NLH-DE استفاده شده است.

در مطالعه حاضر، ابتدا یک ماتریس حاوی مهم‌ترین عوامل موثر در حوادث ناشی از معدنکاری زیرزمینی تنظیم شد و در اختیار خبرگان معدن قرار گرفت. خبرگان دانش تخصصی خود را در زمینه حوادث بر اساس یک مقیاس تعریف شده بیان و ارتباط علی و معلولی بین مفاهیم را بر اساس متغیرهای زبانی ۵ گانه درج کردند. مقیاس تعریف شده در جدول ۱ ارایه شده است. برای تبدیل متغیرهای زبانی از اعداد فازی مثلثی استفاده شد که نمای نموداری این اعداد به همراه درجه عضویت آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. ارتباط بین مفاهیم ممکن است مثبت یا منفی باشد که توسط خبرگان بیان می‌شود.

جدول ۱- متغیرهای زبانی و عدد فازی مثلثی متناظر با آن [۱۶]

عدد فازی	نماد	متغیر زبانی	عدد قطعی
$\tilde{V} = (0.1, 0.1, 0.3)$	VL	خیلی کم	۱
$\tilde{L} = (0.1, 0.3, 0.5)$	L	کم	۳
$\tilde{M} = (0.3, 0.5, 0.7)$	M	متوسط	۵
$\tilde{H} = (0.5, 0.7, 0.9)$	H	زیاد	۷
$\tilde{VH} = (0.7, 0.9, 1)$	VH	خیلی زیاد	۹



شکل ۴- درجه عضویت متغیرهای زبانی اعداد فازی مثلثی [۱۷]

نکته بسیار مهم در ثبت نظرات خبرگان، میزان اطمینان

$$A_i^{(k+1)} = f \left(A_i^{(k)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n A_j^{(k)} \cdot W_{ij} \right) \quad (1)$$

که در آن:

$A_i^{(k+1)}$: ارزش مفهوم Ci در تکرار k+1

A_i^k : ارزش مفهوم Ci در تکرار k

f(x): تابع تبدیل

رابطه ۱ را می‌توان به صورت رابطه ۲ بازنویسی کرد.

$$A_{new} = f \left(A_{old} + \sum A_{old} \cdot W \right) \quad (2)$$

که در آن:

A: یک ماتریس (N×1) از مقادیر مفاهیم

W: یک ماتریس (N×N) از وزن مفاهیم سیستم (ارتباط علی و

معلولی بین مفاهیم)

f: یک تابع تبدیل

تابع تبدیل سطح معنی‌داری خاصی را برای هر مقدار تضمین می‌کند که می‌توان آن را با استفاده از توابع مختلف ریاضی مانند تانژانت هذلولی $\tanh(\lambda x)$ و حلقوی (sigmoid) با

تابع تبدیل سطح معنی‌داری خاصی را برای هر مقدار تضمین می‌کند که می‌توان آن را با استفاده از توابع مختلف ریاضی مانند تانژانت هذلولی $\tanh(\lambda x)$ و حلقوی (sigmoid) با

شناختی فازی با استفاده از رابطه ۲ تا رسیدن به یکی از موارد زیر ادامه دارد [۱۳]:

- حالت پایدار که در آن A_{old} و A_{new} باهم برابرند یا اختلاف جزئی دارند.
- حالت چرخه محدود که در آن مقادیر یک مفهوم در حلقه‌ای از مقادیر به دست آمده طی یک مدت مشخص به دست می‌آیند.
- حالت آشفته یا تصادفی که در آن هر مفهوم مقادیر مختلفی را تحت شرایط عدم اطمینان می‌پذیرد.

برای افزایش دقت وزن‌ها و هنگام ترسیم نقشه شناختی از الگوریتم‌های یادگیری استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها با کاهش وابستگی به نظرات متخصصان، ساختار نقشه شناختی را بهبود می‌بخشند (همگرایی نقشه). سه گروه اصلی الگوریتم‌های یادگیری شامل الگوریتم‌های فراکاوشی، هبیین^۱ و ترکیبی است [۱۴]. الگوریتم‌های فراکاوشی مانند الگوریتم ژنتیک^۲ و الگوریتم

⁴ Non-Linear Hebbian (NLH)

⁵ Differential Evolution (DE)

¹ Hebbian

² Genetic Algorithm (GA)

³ Active

درجه قطعیت هر عدد Z با استفاده از رابطه ۶ به دست می آید:

$$\alpha = \frac{\int x \mu_{\tilde{B}}(x) dx}{\int \mu_{\tilde{B}}(x) dx} \quad (6)$$

سرانجام، قابلیت اطمینان برای بخش محدودیت (B) از عدد Z اعمال شود:

$$\tilde{Z}^{\alpha} = \left\{ (x, u_{\tilde{A}}) \mid u_{\tilde{A}^{\alpha}}(x) = \alpha u_{\tilde{A}}(x), x \in [0, 1] \right\} \quad (7)$$

با یک مثال ساده می توان به درک موضوع پرداخت: اگر یک متخصص در مورد میزان تاثیرگذاری یک معیار، متغیر زبانی "متوسط" را به کار ببرد و همراه با آن متغیر زبانی "اطمینان زیاد" را برای بیان میزان اطمینان خود اعلام نماید. آنگاه عدد Z مربوط به این پاسخ به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$Z = (A, B) = [(0.3, 0.5, 0.7), (0.5, 0.75, 1)]$$

اولین گام محاسبه قابلیت اطمینان (α) با استفاده از رابطه ۶ است که درجه اطمینان را از حالت فازی به یک عدد قطعی تبدیل می کند. برای این کار از روش میانگین گیری برای تبدیل عدد فازی به عدد قطعی استفاده شده است:

$$\alpha = \frac{\int \mu_B dx}{\int \mu_B dx} = \frac{0.5 + 0.75 + 1}{3} = 0.75$$

گام دوم تاثیر دادن وزن هر بیان یا قابلیت اطمینان در دیدگاه متخصص است:

$$\tilde{Z}^{\alpha} = (0.3, 0.5, 0.7; 0.75)$$

در نهایت، یک عدد Z به صورت وزن دار به دست می آید که به عدد فازی معمولی تبدیل می شود و با نماد \tilde{Z}' نمایش داده می شود. برای این کار مجذور عدد Z در A ضرب تا تاثیر آن دیده شود [۱۸]:

$$\tilde{Z}' = (\sqrt{0.75} \times 0.3, \sqrt{0.75} \times 0.5, \sqrt{0.75} \times 0.7) \\ = (0.26, 0.43, 0.61)$$

همانطور که مشاهده می شود، میزان تاثیرگذاری یک معیار بعد از تاثیر دادن قابلیت اطمینان عدد Z از $(0.3, 0.5, 0.7)$ به $(0.26, 0.43, 0.61)$ تبدیل شد.

تبدیل اعداد فازی به اعداد جدید برای حالت های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است.

آن ها از پاسخ خودشان است. در حالت کلی، نظرات خبرگان با عدم قطعیت ذاتی همراه است و ممکن است یک متخصص دیدگاهی را ثبت کند که در مورد آن اطمینان کامل ندارد. برای برطرف کردن این مشکل، از تئوری اعداد Z که یک مفهوم ریاضی برای رفع عدم قطعیت است، استفاده شد.

۲-۲- تئوری اعداد Z

لطفی زاده در سال ۲۰۱۱ برای اولین بار مفهوم جدید تئوری اعداد Z را برای بررسی عدم قطعیت ارائه داد [۱۸]. تئوری اعداد Z به شکل یک زوج مرتب (A, B) بیان می شوند که در آن ها A و B محدودیتی برای توصیف رفتار اعداد Z بازنمایی می کنند. A معمولاً یک مجموعه فازی برای بیان دیدگاه تصمیم گیرنده است و B درجه قطعیت (اطمینان) را توصیف می کند. معنای ذاتی عدد Z به شرح رابطه ۳ است:

$$Z = (A, B) = Z^+ (A, \mu_A \cdot P_{X_A} \text{ is } B) \quad (3)$$

که در آن:

X: یک متغیر تصادفی

P_{X_A} : درجه احتمال متغیر تصادفی

μ_A : تابع چگالی احتمال A

برای بیان درجه اطمینان، یک مقیاس مشخص تعریف شده است. در جدول ۲ متغیرهای زبانی و عدد Z متناظر با آن ها بیان شده است. متخصصان پس از بیان دیدگاه خود در مورد هر معیار، میزان اطمینان از پاسخ خود را نیز بیان کردند.

جدول ۲- متغیرهای زبانی بخش قابلیت اطمینان عدد Z [۱۹]

عدد قطعی	متغیر زبانی	نماد	B
۱	نامطمئن	NS	(0, 0, 0.25)
۳	اطمینان کم	SS	(0, 0.25, 0.5)
۵	اطمینان متوسط	MS	(0.25, 0.5, 0.75)
۷	اطمینان زیاد	S	(0.5, 0.75, 1)
۹	کاملاً مطمئن	AS	(0.75, 1, 1)

درجه اطمینان در پاسخ خبرگان تاثیر داده می شود تا یک دیدگاه دقیق و قابل اعتماد به دست آید. برای تاثیر دادن اعداد Z در نظرات متخصصان از رویکرد زیر باید استفاده کرد.

اگر $Z = (\tilde{A}, \tilde{B})$ بیانگر یک عدد Z باشد که در آن:

$$\tilde{A} = (x, u_{\tilde{A}}) \mid x \in [0, 1] \quad (4)$$

$$\tilde{B} = (x, u_{\tilde{B}}) \mid x \in [0, 1] \quad (5)$$

جدول ۳- تبدیل متغیرهای زبانی در تئوری اعداد Z

\tilde{Z}'	α	متغیرهای زبانی و عدد Z متناظر با آن		
		Z	B	A
(0.29,0.29,0.87)	0.08	(VL,NS)	NS	VL
(0.50,0.50,1.50)	0.25	(VL,SS)	SS	VL
(0.71,0.71,2.12)	0.5	(VL,MS)	MS	VL
(0.87,0.87,2.60)	0.75	(VL,S)	S	VL
(0.96,0.96,2.87)	0.92	(VL,AS)	AS	VL
(0.29,0.87,1.44)	0.08	(L,NS)	NS	L
(0.50,1.50,2.50)	0.25	(L,SS)	SS	L
(0.71,2.12,3.54)	0.5	(L,MS)	MS	L
(0.87,2.60,4.33)	0.75	(L,S)	S	L
(0.96,2.87,4.79)	0.92	(L,AS)	AS	L
(0.87,1.44,2.02)	0.08	(M,NS)	NS	M
(1.50,2.50,3.50)	0.25	(M,SS)	SS	M
(2.12,3.54,4.95)	0.5	(M,MS)	MS	M
(2.60,4.33,6.06)	0.75	(M,S)	S	M
(2.87,4.79,6.70)	0.92	(M,AS)	AS	M
(1.44,2.02,2.60)	0.08	(H,NS)	NS	H
(2.50,3.50,4.50)	0.25	(H,SS)	SS	H
(3.54,4.95,6.36)	0.5	(H,MS)	MS	H
(4.33,6.06,7.79)	0.75	(H,S)	S	H
(4.79,6.70,8.62)	0.92	(H,AS)	AS	H
(2.02,2.60,2.60)	0.08	(VH,NS)	NS	VH
(3.50,4.50,4.50)	0.25	(VH,SS)	SS	VH
(4.95,6.36,6.36)	0.5	(VH,MS)	MS	VH
(6.06,7.79,7.79)	0.75	(VH,S)	S	VH
(6.70,8.62,8.62)	0.92	(VH,AS)	AS	VH

۳- شناسایی خطرات و حوادث موجود در معادن

مدیریت ریسک شامل شناسایی، پایش و ایجاد یک فرآیند پیوسته برای پیشگیری و کاهش مخاطرات بالقوه در یک سازمان است. هر علت آشکار^۱ خود می‌تواند چندین علت ریشه‌ای داشته باشد. در این میان شناسایی دلایل ریشه‌ای مخاطرات اهمیت زیادی دارد. با شناسایی عوامل ریشه‌ای، مدیریت ریسک می‌تواند با مستندسازی پیشنهادات مناسبی برای کاهش حوادث در آن سازمان ارایه دهد. در معادن زیرزمینی با توجه به شرایط کاری خاص حوادث متعددی ممکن است رخ دهد. عوامل موثر در بروز حادثه را می‌توان در سه دسته اصلی به صورت عوامل مستقیم، عوامل مربوط به محیط کار و عوامل سیستماتیک طبقه‌بندی کرد. در این مطالعه با استفاده از نظرات افراد خبره و متخصصان معدن، ۲۱ عامل آشکار شناسایی شد. عوامل معرفی شده، در تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. عوامل موثر بر حوادث رایج معادن زیرزمینی در جدول ۴ فهرست شده است.

جدول ۴- عوامل موثر بر حوادث معدنکاری زیرزمینی [۳،۲۰۰۲۱]

نوع عامل	نماد	عوامل
عوامل مستقیم	C1	ریزش
	C2	اشتباهات فردی
	C3	نقض عمدی مقررات ایمنی
	C4	نقض غیرعمدی قوانین ایمنی
	C5	عدم حضور افراد متخصص
عوامل محیط کار	C6	تجهیزات نامناسب
	C7	محیط فیزیکی
	C8	محیط رفتاری
	C9	شیوه‌های کاری نایمن
	C10	عدم مدیریت لحظه‌ای تغییرات
عوامل سیستماتیک	C11	عدم نظارت بر محیط
	C12	فقدان آموزش و تخصص
	C13	عدم مدیریت پیمانکار
	C14	عدم مدیریت ریسک
	C15	عدم آگاهی از خطرات
	C16	عدم مدیریت تعمیر و نگهداری
	C17	عدم شناسایی خطر
	C18	عدم نظارت و حسابرسی
	C19	عدم اخذ تصمیم استراتژیک
	C20	عدم برنامه‌ریزی کاری
	C21	عدم پاسخ اضطراری

هرکدام از ۲۱ عامل شناسایی شده در معادن زیرزمینی می‌تواند چندین علت ریشه‌ای داشته باشد. به طور مثال ریزش معدن در نتیجه شرایط ژئومکانیکی نامساعد زمین، طراحی یا اجرای نامناسب سیستم نگهداری، هجوم آب زیرزمینی، پدیده انفجار سنگ و یا عوامل دیگر رخ دهد.

۴- اولویت‌بندی حوادث با نقشه شناختی فازی

در این بخش عوامل موثر در مخاطرات معدنکاری زیرزمینی اولویت‌بندی می‌شوند. برای تعیین اهمیت عوامل مختلف و رابطه علی و معلولی بین آن‌ها از یک گروه متشکل از پنج نفر شامل

² Root causes¹ Obvious causes

در وقوع حوادث با استفاده از G0 بیان می‌شود. الگوریتم یادگیری ترکیبی استفاده شده در نقشه شناختی فازی از G0 برای سنجش میزان ارتباط علی و معلولی بین وقوع حوادث و عوامل بیان شده استفاده می‌کند.

بخشی از این ماتریس در جدول ۵ نشان داده شده است که در آن هر معیار از دو مقدار تشکیل می‌شود. مقدار اول بیانگر رابطه علی و معلولی تعیین شده توسط متخصص است و مقدار دوم درجه اطمینان متخصص نسبت به پاسخ خود را بازنمایی می‌کند.

جدول ۵- ماتریس اولیه شامل درجه اطمینان متخصص

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	(0,0,0) (0,0,0)	(0,0,0) (0,0,0)	(0,0,0) (0,0,0)	(0,0,0) (0,0,0)	(0,0,0) (0,0,0)
C2	(0.3,0.5,0.7) (0.75,1,1)	(0,0,0) (0,0,0)	(0,0,0) (0,0,0)	(0.3,0.5,0.7) (0.75,1,1)	(0,0,0) (0,0,0)
C3	(0.5,0.7,0.9) (0.75,1,1)	(0,0,0) (0,0,0)	(0,0,0) (0,0,0)	(0.1,0.3,0.5) (0.75,1,1)	(0,0,0) (0,0,0)
C4	(0.3,0.5,0.7) (0.5,0.75,1)	(0,0,0) (0,0,0)	(0,0,0) (0,0,0)	(0,0,0) (0,0,0)	(0,0,0) (0,0,0)
C5	(0.7,0.9,1) (0.5,0.75,1)	(0.7,0.9,1) (0.75,1,1)	(0,0,0) (0,0,0)	(0.5,0.7,0.9) (0.75,1,1)	(0,0,0) (0,0,0)
G0	(0.3,0.5,0.7) (0.75,1,1)	(0.5,0.7,0.9) (0.75,1,1)	(0.7,0.9,1) (0.75,1,1)	(0.1,0.3,0.7) (0.5,0.75,1)	(0.1,0.3,0.5) (0.75,1,1)

اولیه را پس از تاثیر قابلیت اطمینان در نظرات خبرگان را برای پنج عامل نشان می‌دهد.

اساتید دانشگاه و مهندسان شاغل در معادن (با تخصص‌های مهندسی معدن- مکانیک سنگ، مهندسی عمران، مهندسی تونل و فضاها‌ی زیرزمینی، مهندسی معدن- استخراج) که به مدت بیش از ۱۰ سال در حوزه معدن سابقه فعالیت داشتند، کمک گرفته شد. همانطور که اشاره شد با نظر متخصصان، با در نظر گرفتن علت‌های ریشه‌ای مختلف برای هر کدام از عوامل آشکار شناسایی شده، جمع‌آوری و طبقه‌بندی داده‌ها انجام شد.

ماتریس تصمیم شامل ۲۱ عامل و یک هدف (G0) تنظیم شد. منظور از هدف (G0)، همان وقوع حوادث معادن زیرزمینی در اثر عوامل ۲۱ گانه است. در واقع میزان تاثیرگذاری هر عامل

با تاثیر دادن درجه اطمینان هر پاسخ در آن، مقدار دقیق و قابل اعتماد نظرات خبرگان به دست می‌آید. جدول ۶ ماتریس

جدول ۶- ماتریس اولیه پس از تاثیر قابلیت اطمینان

	C1	C2	C3	C5	C5
C1	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
C2	(0.287,0.479,0.67)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.287,0.479,0.67)	(0,0,0)
C3	(0.479,0.67,0.862)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0.096,0.287,0.479)	(0,0,0)
C5	(0.26,0.433,0.606)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)	(0,0,0)
C5	(0.606,0.779,0.866)	(0.67,0.862,0.957)	(0,0,0)	(0.479,0.67,0.862)	(0,0,0)
G0	(0.287,0.479,0.67)	(0.479,0.67,0.862)	(0.67,0.862,0.957)	(0.087,0.26,0.433)	(0.096,0.287,0.479)

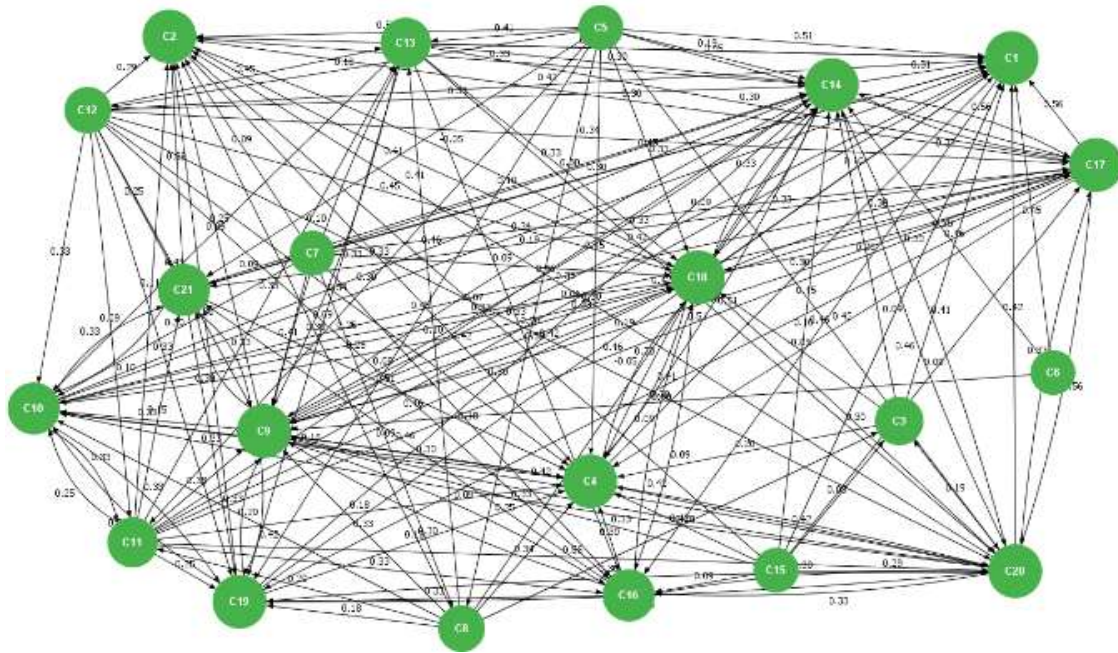
C1	0	0	0	0	0
C2	0.48	0	0	0.48	0
C3	0.67	0	0	0.29	0
C4	0.43	0	0	0	0
C5	0.75	0.83	0	0.67	0
G0	0.48	0.67	0.83	0.26	0.29

ماتریس نهایی در الگوریتم یادگیری فراخوانی شد و پس از تکرار ۳۰ مرحله شبیه‌سازی (شکل ۶)، وزن هر عامل به دست آمد. اولویت‌بندی عوامل موثر بر مخاطرات شغلی در جدول ۸ ارائه شده است.

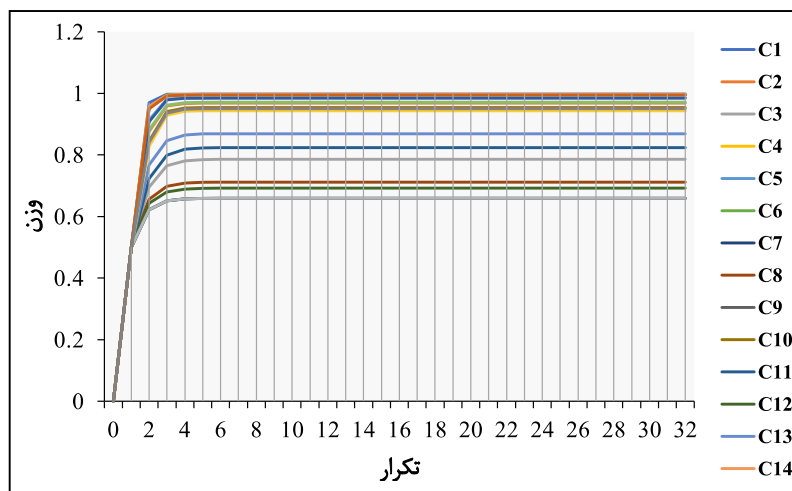
در نهایت، ماتریس قابلیت اطمینان به مقادیر قطعی تبدیل شد. این ماتریس در چهارچوب نقشه شناختی فازی قرار گرفت تا با فراخوانی در الگوریتم یادگیری ترکیبی NHL-DE وزن هر عامل شبیه‌سازی شود. جدول ۷ ماتریس اولیه قطعی را نشان می‌دهد. نقشه شناختی فازی یک رویکرد دینامیکی است که در طول زمان تکامل پیدا می‌کند. نقشه شناختی نهایی این مساله در شکل ۵ رسم شده است. تغییرات هر معیار در طول تکرارهای شبیه‌سازی نیز در شکل ۶ دیده می‌شود.

جدول ۷- ماتریس اولیه قطعی برای فراخوانی در الگوریتم یادگیری

	C1	C2	C3	C4	C5
--	----	----	----	----	----



شکل ۵- نقشه شناختی مربوط به ۲۱ عامل موثر در حوادث معدنکاری



شکل ۶- همگرایی وزن هر عامل پس از ۶ تکرار

جدول ۸- اولویت‌بندی عوامل موثر در مخاطرات شغلی معادن زیرزمینی

اولویت	وزن نهایی	عوامل	نماد
9	0.97774 8	عدم نظارت و حسابرسی	C1 8
10	0.96135 3	عدم مدیریت لحظه‌ای تغییرات	C1 0
11	0.95906 3	عدم پاسخ اضطراری	C2 1
12	0.95417 6	عدم مدیریت تعمیر و نگهداری	C1 6
13	0.87653 6	عدم مدیریت پیمانکار	C1 3
14	0.8744	عدم نظارت بر محیط	C1 1
15	0.84343	نقض عمدی مقررات ایمنی	C3

اولویت	وزن نهایی	عوامل	نماد
1	0.99912	ریزش	C1
2	0.99795 4	نقض غیرعمدی قوانین ایمنی	C4
3	0.99758 5	عدم برنامه ریزی کاری	C2 0
4	0.99758 2	عدم مدیریت ریسک	C1 4
5	0.99720 8	شیوه های کاری ناپایم	C9
6	0.99221 5	عدم شناسایی خطر	C1 7
7	0.98924 1	عدم اخذ تصمیم استراتژیک	C1 9
8	0.98068 7	اشتباهات فردی	C2

همزمان مورد توجه قرار گیرند.

۵- نتیجه گیری

صنعت معدنکاری همواره جزو صنایع پرخطر و با تلفات بالای انسانی بوده است. مخاطرات معدنکاری در روش استخراج زیرزمینی، به دلیل شرایط حاکم بر آن اهمیت بیشتری دارد. در این مقاله سعی شد تا با اولویت بندی عوامل موثر بر مخاطرات شغلی در معادن زیرزمینی، مهمترین و موثرترین عوامل شناسایی شوند. برای این منظور ۲۱ معیار رایج شناسایی شد و ارتباط علی و معلولی بین آنها به دست آمد. برای افزایش دقت نتایج و رفع عدم قطعیت نظرات خبرگان، از تئوری اعداد Z استفاده شد. همچنین برای کاهش وابستگی نتایج به نظرات متخصصان، الگوریتم یادگیری ترکیبی NHL-DE به کار گرفته شد. در نهایت برای محاسبه وزن عوامل مختلف از یک ماتریس قابلیت اطمینان در نقشه شناختی فازی استفاده شد. نتایج اولویت بندی نشان داد که عامل ریزش با وزن ۰/۹۹۹ بیشترین تاثیر و عامل عدم آگاهی از خطرات با وزن ۰/۶۴۱ کمترین تاثیر را در وقوع حوادث معادن زیرزمینی دارند.

منابع

1. J. P. Leigh, G. Waehrer, T. R. Miller, and C. Keenan, "Costs of occupational injury and illness across industries," *Scandinavian journal of work, environment & health*, pp. 199-205, 2004.
2. J. M. Patterson and S. A. Shappell, "Operator error and system deficiencies: analysis of 508 mining incidents and accidents from Queensland, Australia using HFACS," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 42, no. 4, pp. 1379-1385, 2010.
3. J. Bonsu, W. Van Dyk, J. P. Franzidis, F. Petersen, and A. Isafiade, "A systemic study of mining accident causality: an analysis of 91 mining accidents from a platinum mine in South Africa," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 117, no. 1, pp. 59-66, 2017.
4. پورمیرزایی، ر.؛ ۱۳۹۶؛ "بررسی نقش صنعت معدنکاری و منابع معدنی در توسعه پایدار کشور". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دوم، شماره ۳، ص ۱۲-۱.
5. سایت مرکز آمار ایران: <https://www.amar.org.ir>
6. C. Nussey, "Studies of accidents leading to minor injuries in the UK coal mining industry*," *Journal of Occupational Accidents*, vol. 2, no. 4, pp. 305-323, 1980.
7. L. Wang, Y.-P. Cheng, and H.-Y. Liu, "An analysis of fatal gas accidents in Chinese coal mines," *Safety Science*, vol. 62, pp. 107-113, 2014.

نماد	عوامل	وزن نهایی	اولوی ت
		3	
C8	محیط رفتاری	0.73677 4	16
C7	محیط فیزیکی	0.68110 6	17
C1 2	فقدان آموزش و تخصص	0.6773	18
C5	عدم حضور افراد متخصص	0.66227	19
C6	تجهیزات نامناسب	0.64091 1	20
C1 5	عدم آگاهی از خطرات	0.64091 1	21

نتایج نشان می دهد که ۱۲ عامل اصلی که بیشترین نقش را در بروز حوادث معادن زیرزمینی دارند به ترتیب اهمیت شامل ریزش، نقض غیرعمدی قوانین ایمنی، عدم برنامه ریزی کاری، عدم مدیریت ریسک، شیوه های کاری نایمن، عدم شناسایی خطر، عدم اخذ تصمیم استراتژیک، اشتباهات فردی، عدم نظارت و حساسی، عدم مدیریت لحظه ای تغییرات، عدم پاسخ اضطراری و عدم مدیریت تعمیر و نگهداری است.

نتایج به دست آمده توسط تیم متخصصان مورد تایید قرار گرفت. وقوع حوادث اخیر در کشور مانند ریزش معدن زغال سنگ رامیان گلستان در آبان ماه سال ۱۳۹۸ (یک نفر کشته)، ریزش معدن زغال سنگ آسفیج یزد در دی ماه سال ۱۳۹۸ (یک نفر کشته)، ریزش معدن زغال سنگ در گیلانغرب کرمانشاه در تیر ماه سال ۱۳۹۹ (یک نفر کشته)، ریزش معدن فرکروم منوجان کرمان در شهریور ماه سال ۱۳۹۹ (یک نفر کشته)، ریزش معدن هجدک کرمان در شهریور ماه سال ۱۳۹۹ (چهار نفر کشته)، ریزش در معدن منگنز قم در اسفند ماه سال ۱۳۹۹ (یک نفر کشته)، ریزش کارگاه استخراج معدن طزره در اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۰ (دو نفر کشته)، ریزش تونل در منطقه ۲ آزادراه تهران شمال در خرداد ماه سال ۱۴۰۰ (دو نفر کشته) و ریزش معدن خاک نسوز نیلچیان در خرداد ماه سال ۱۴۰۰ (دو نفر کشته) به تایید نتایج این تحقیق کمک می کند. نکته قابل توجه این است که عوامل بیان شده در جدول ۸، از نظر اهمیت مستقل از هم نیستند. به عبارت دیگر ترتیب اولویت بندی بیانگر میزان اهمیت یک عامل در کنار سایر عوامل است. به عنوان مثال عامل ریزش به طور همزمان در کنار سایر عوامل با شدت بیشتری بر حوادث معادن زیرزمینی تاثیر می گذارد. بنابراین، برای کاهش حوادث ناشی از ریزش که در رتبه نخست قرار دارد باید به نقض غیرعمدی قوانین ایمنی، نبود برنامه ریزی کاری، نبود مدیریت ریسک که رتبه کمتر و اهمیت بالایی دارد، توجه شود. به عبارت دیگر برای کاهش مخاطرات معدنکاری زیرزمینی باید مجموعه عواملی که رتبه بندی آنها در جدول ۷ آمده است، به طور

- forecast of vertical and horizontal distribution of dust emissions using artificial causality-weighted neural network," *Journal of Cleaner Production.*, vol. 283, p. 124562, 2021.
16. C. C. Chou, "The canonical representation of multiplication operation on triangular fuzzy numbers," *Comput. Math. with Appl.*, 2003.
 17. Nguyen, H. T., Md Dawal, S. Z., Nukman, Y., Aoyama, H., & Case, K. "An integrated approach of fuzzy linguistic preference based AHP and fuzzy COPRAS for machine tool evaluation". *PLoS one*, 10(9), e0133599. 2015.
 18. L. A. Zadeh, "A note on Z-numbers," *Information Sciences. (Ny)*, vol. 181, no. 14, pp. 2923–2932, 2011.
 19. Jumarni, R. F., & Zamri, N. "A new concept of fuzzy TOPSIS and fuzzy logic in a multi-criteria decision." *International Conference on Soft Computing and Data Mining*, pp. 161-170. Springer, Cham, 2018.
 ۲۰. بخت آور، ع.، شاهمرادی، م.، رحمتی، س.؛ "۱۳۹۷؛ " ارزیابی تاثیر عوامل مشکل ساز در ایجاد مخاطرات شغلی معادن زیرزمینی زغال سنگ ایران با رویکرد فازی اثرات متقابل علت و معلولی. نشریه مهندسی معدن، ۱۳(۴۰)، ۳۴-۴۵.
 21. Hull, B. P., Leigh, J., Driscoll, T. R., & Mandryk, J. "Factors associated with occupational injury severity in the New South Wales underground coal mining industry. " *Safety Science*, 21(3), 191-204. 1996.
 8. Y. Zhang, W. Shao, M. Zhang, H. Li, S. Yin, and Y. Xu, "Analysis 320 coal mine 1 using structural equation modeling with unsafe conditions of the rules and regulations as exogenous variables," *Accident Analysis & Prevention.*, vol. 92, pp. 189–201, 2016.
 9. J. D. Bennett and D. L. Passmore, "Probability of death, disability, and restricted work activity in United States underground bituminous coal mines, 1975-1981," *Journal of Safety Research.*, 1984.
 10. A. Asfaw, C. Mark, and R. Pana-Cryan, "Profitability and occupational injuries in US underground coal mines," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 50, pp. 778–786, 2013.
 11. H. S. B. Duzgun and H. H. Einstein, "Assessment and management of roof fall risks in underground coal mines," *Safety Science.*, vol. 42, no. 1, pp. 23–41, 2004.
 12. B. Kosko, "Fuzzy cognitive maps," *International journal of man-machine studies.*, vol. 24, no. 1, pp. 65–75, 1986.
 13. E. I. Papageorgiou, C. Stylios, and P. P. Groumpos, "Unsupervised learning techniques for fine-tuning fuzzy cognitive map causal links," *International Journal of Human-Computer Studies.*, vol. 64, no. 8, pp. 727–743, 2006.
 14. E. I. Papageorgiou and A. Kannappan, "Fuzzy cognitive map ensemble learning paradigm to solve classification problems: Application to autism identification," *Applied Soft Computing.*, vol. 12, no. 12, pp. 3798–3809, 2012.
 15. E. Bakhtavar, S. Hosseini, K. Hewage, and R. Sadiq, "Green blasting policy: Simultaneous