

ارزیابی جامع خطرات در فرآیند استحصال طلا با استفاده از روش EFMEA (مطالعه موردی کارخانه فرآوری طلای خمین)

مریم نصرآبادی^{۱*}، پروانه پیکانپورفرد^۲، سید رحمان دانیالی^۳

^۱ دانشجوی گروه محیط زیست، دانشکده کشاورزی، آب، غذا و فراسودمندها، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان، ایران

^۲ استادیار، گروه مدیریت HSE، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

^۳ کارشناس اداره محیط زیست استان اصفهان

چکیده

صنعت استحصال طلا به دلیل استفاده از مواد شیمیایی سمی (به ویژه سیانید) و فرآیندهای سنگین مکانیکی و حرارتی، با مخاطرات گسترده‌ای برای سلامت کارکنان و محیط زیست مواجه است. این مطالعه با هدف شناسایی و ارزیابی جامع خطرات شیمیایی، ارگونومیکی و زیست محیطی در کارخانه فرآوری طلای خمین انجام شد. تمامی واحدهای عملیاتی کارخانه با استفاده از روش سیستماتیک EFMEA مورد ارزیابی ریسک قرار گرفتند. عدد اولویت ریسک (RPN) بر اساس شدت اثر، احتمال وقوع و میزان کشف محاسبه و راهکارهای کنترلی ارائه گردید. مهم‌ترین مخاطرات شامل مواجهه با سیانید، گردوغبار سیلیسی و سیمان، گازهای سمی، مشکلات ارگونومیکی (جابجایی دستی بار، وضعیت‌های بدنی نامناسب، ارتعاشات) و خطرات زیست محیطی (نشت سیانید و آلودگی خاک و آب) بودند. بالاترین سطوح ریسک ($RPN > 400$) مربوط به گردوغبار سیلیسی ($RPN = 800$)، آئروسول سیانید ($RPN = 750$) و نشت سیانید ($RPN = 720$) بود. با اجرای اقدامات اصلاحی، سطح ریسک اکثر مخاطرات به طور قابل توجهی کاهش یافت. روش EFMEA ابزاری کارآمد برای مدیریت جامع ریسک در صنعت فرآوری طلا است. سیانید و گردوغبار سیلیسی به عنوان بحرانی‌ترین عوامل خطر شناسایی شدند. اجرای راهکارهای کنترلی مهندسی، مدیریتی و حفاظت فردی، همراه با آموزش مستمر کارکنان، می‌تواند سطح ایمنی و سلامت شغلی را ارتقا داده و از آلودگی‌های زیست محیطی جلوگیری نماید.

واژگان کلیدی: ارزیابی ریسک، EFMEA، استحصال طلا، سیانید، هیپ لیچینگ

۱-مقدمه

صنعت استحصال طلا به عنوان یکی از صنایع کلیدی و ارزشمند در اقتصاد کشورها، همواره با چالش‌های متعددی در حوزه‌های ایمنی، بهداشت حرفه‌ای و محیط‌زیست همراه بوده است (قندهاری و همکاران، ۱۴۰۴). پیچیدگی فرآیندهای شیمیایی، مکانیکی و حرارتی در کارخانه‌های فرآوری طلا، ماهیت خطرناک مواد مصرفی و شرایط عملیاتی ویژه، این صنعت را به یکی از حساسترین محیط‌های کاری از نظر مخاطرات بالقوه تبدیل کرده است. در این میان، کارخانه‌های فرآوری طلا با به‌کارگیری روش‌هایی نظیر هیپ لیچینگ و استفاده از مواد شیمیایی بسیار سمی مانند سیانید سدیم، علاوه بر تهدید سلامت نیروی انسانی، می‌توانند پیامدهای جبران‌ناپذیری بر محیط‌زیست پیرامونی نیز داشته باشند (رستمی و همکاران، ۱۴۰۱).

یکی از مهم‌ترین گام‌ها در مدیریت ایمنی و بهداشت شغلی در این صنایع، شناسایی سیستماتیک و ارزیابی دقیق تمامی خطرات موجود در واحدهای عملیاتی است. این خطرات می‌توانند در اشکال مختلفی از جمله مواجهه با عوامل شیمیایی (مانند گردوغبار سیلیسی، سیانید، اسیدها و گازهای سمی)، عوامل فیزیکی (نظیر سر و صدا و ارتعاش)، مشکلات ارگونومیک ناشی از وضعیت‌های بدنی نامناسب، جابجایی دستی بار و حرکات تکراری و همچنین ریسک‌های زیست‌محیطی نظیر نشت مواد خطرناک و آلودگی خاک و آب بروز کنند (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۵). عدم کنترل این مخاطرات، علاوه بر افزایش احتمال بروز حوادث و بیماری‌های شغلی، می‌تواند منجر به تحمیل هزینه‌های سنگین اقتصادی و زیست‌محیطی و نیز آسیب به اعتبار صنعت شود (مظفری جلالی، ۱۴۰۳).

از این رو، به‌کارگیری روش‌های نظام‌مند و کارآمد برای ارزیابی جامع ریسک، نقشی حیاتی در ارتقاء سطح ایمنی، حفظ سلامت کارکنان و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ایفا می‌کند. روش EFMEA^۱ به عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در این زمینه، با شناسایی حالات بالقوه خرابی و شکست در فرآیندها، اولویت‌بندی ریسک‌ها بر اساس شدت اثر، احتمال وقوع و میزان کشف و ارائه راهکارهای کنترلی هدفمند، امکان مدیریت بهینه مخاطرات را فراهم می‌سازد (کارگر راضی، ۱۴۰۳).

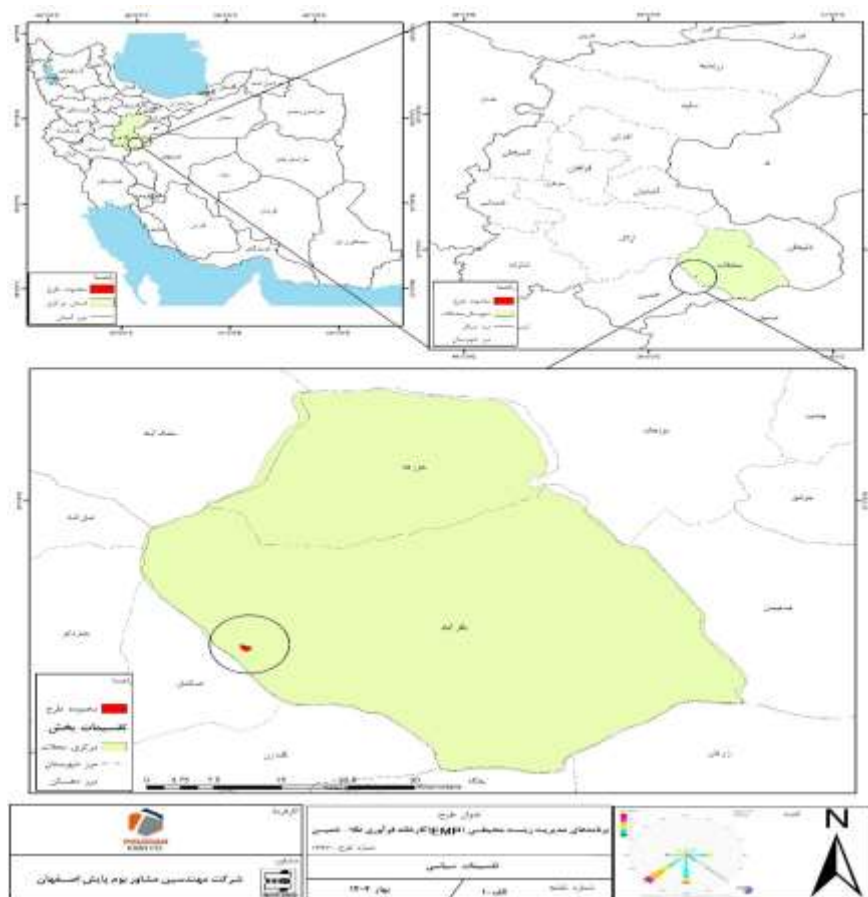
بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف شناسایی و ارزیابی جامع خطرات (شامل مخاطرات شیمیایی، فیزیکی، ارگونومیک و زیست‌محیطی) در واحدهای مختلف کارخانه فرآوری طلای خمین، شامل واحدهای سنگ‌شکن، بالمیل-درایر، آگلومراتور، مخازن آماده‌سازی سیانید، هیپ لیچینگ، جذب با کربن فعال، الوشن و فعال‌سازی مجدد کربن، با استفاده از روش EFMEA انجام شده است. در این پژوهش، پس از شناسایی دقیق عوامل زیان‌آور و پیامدهای احتمالی آنها، با محاسبه عدد اولویت ریسک (RPN)، سطوح ریسک تعیین شده و در نهایت، راهکارهای کنترلی مؤثر در سه حوزه مهندسی، مدیریتی و حفاظت فردی ارائه گردیده است تا ضمن کاهش احتمال بروز حوادث و بیماری‌های شغلی، زمینه‌های لازم برای بهبود عملکرد زیست‌محیطی کارخانه و ارتقاء سطح ایمنی و سلامت نیروی کار فراهم آید.

۲- مواد و روش‌ها

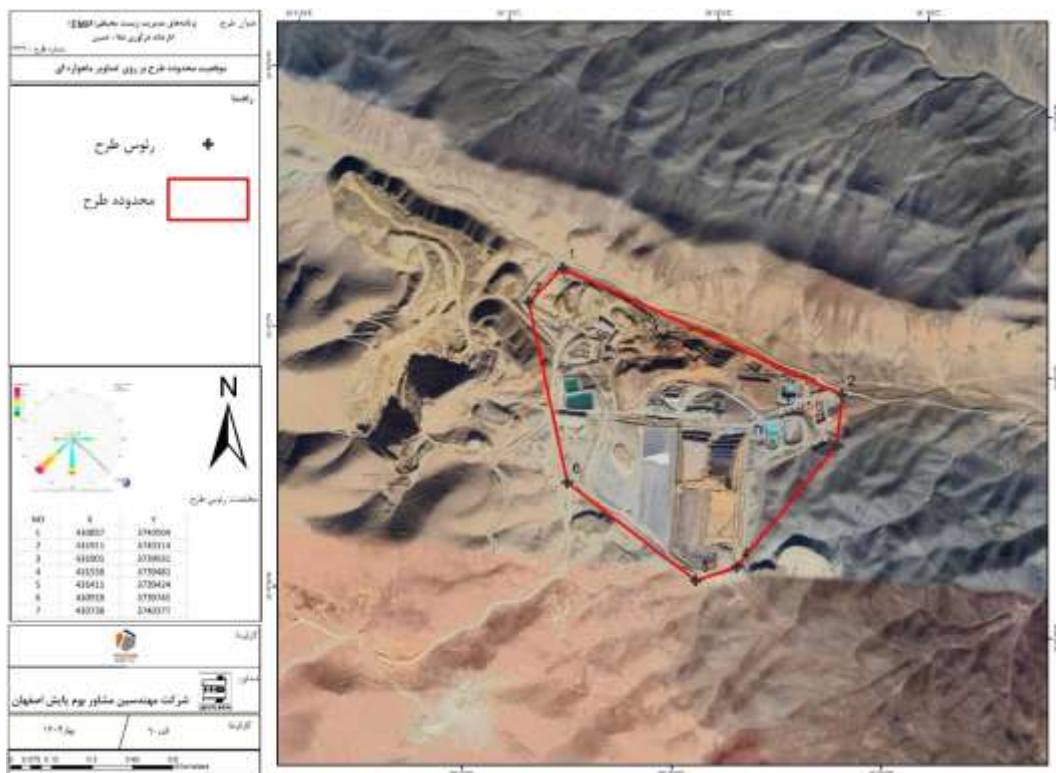
۲-۱- محدوده مورد مطالعه

محدوده طرح در فاصله ۵۵ کیلومتری مرکز استان مرکزی (شهر اراک)، ۲۱ کیلومتری شهر خمین و ۱۹ کیلومتری شهر محلات واقع است. نزدیکترین مراکز سکونتگاهی روستایی به محدوده طرح روستا کوه سفید و خوگان بوده که به ترتیب در فواصل ۴ و ۶ کیلومتری محل طرح قرار دارند. ناحیه صنعتی شهید سعیدی در فاصله ۷/۵ کیلومتری و شهرک صنعتی محلات در فاصله ۱۳ کیلومتری محل طرح قرار دارند. نزدیکترین جاده اصلی به محدوده، جاده محلات - خمین بوده که در فاصله ۳/۶ کیلومتری واقع است. محدوده طرح در مجاورت جاده دسترسی فرعی دارد.

¹ Environmental Failure Mode and Effects Analysis



شکل شماره ۱. موقعیت طرح در تقسیمات سیاسی



شکل شماره ۲. موقعیت طرح بر روی تصاویر ماهواره ای

۲-۲- ویژگی های فرآیندی کارخانه

فرآیند استحصال طلا در کارخانه پوزن کانی از مجموعه‌ای از واحدهای تخصصی تشکیل شده است که به‌صورت متوالی و هدفمند طراحی شده‌اند تا از ماده معدنی ورودی، محصول نهایی با خلوص بالا تولید نمایند. این واحدها به شرح زیر می‌باشند:

۱- واحد سنگ‌شکن

ماده معدنی استخراج شده پس از انتقال توسط کامیون به کارخانه، ابتدا وارد واحد سنگ‌شکن می‌شود که شامل دو مرحله خردایش درشت و ریز است. در این فرآیند، سنگ‌ها ابتدا توسط سنگ‌شکن اولیه خرد شده و سپس از طریق سرنده، ذرات درشت از ریز تفکیک می‌شوند؛ ذرات درشت مجدد به سنگ‌شکن بازگردانده شده تا به اندازه مطلوب برسند (اعظمی و همکاران، ۱۳۹۷). ذرات ریز عبوری از سرنده، پس از رسیدن به دانه‌بندی مناسب، به واحد درایر (خشک‌کن) منتقل می‌شوند تا فرآیند خشک‌سازی روی آن‌ها انجام گیرد.

۲- واحد بالمیل- درایر

فرآیند پس از خردایش به این صورت است که ماده معدنی برای کاهش رطوبت و آماده‌سازی جهت ورود به مراحل بعدی، توسط لودر وارد واحد درایر می‌شود (ارغوانیان و همکاران، ۱۳۹۰). در این واحد، ماده معدنی درون یک درام چرخان با دمای بالا قرار گرفته و با چرخش مداوم، رطوبت آن به کمتر از یک درصد کاهش می‌یابد. پس از خشک‌سازی، ماده وارد هاپر بالمیل شده و در آنجا با برخورد به گوی‌های بزرگ، به ذرات بسیار ریز و میکرونی تبدیل می‌شود. خروجی بالمیل از طریق نوار ماردونی تخلیه شده و سپس توسط لودر به واحد آگلومراتور منتقل می‌گردد.

۳- واحد آگلومراتور

در این واحد، مواد ابتدا از طریق نوار نقاله وارد درام چرخشی می‌شوند، سپس آب با فشار توسط نازل‌های افشانه پاشیده شده و همزمان درصدی سیمان از طریق بونکرهای سیمان به کمک نوار ماردونی به مخلوط افزوده می‌شود (اعظمی و همکاران، ۱۳۹۷). با چرخش مداوم درام و وجود رطوبت، مخلوط به صورت گوله‌های تیل‌ای شکل درمی‌آید که دارای خلل و فرج لازم برای نفوذ آب در فرآیند هیپ است. این گوله‌های تیل‌ای سپس از طریق نوار نقاله به واحد هیپ منتقل می‌شوند تا عملیات لیچینگ انجام شود.

۴- مخازن آماده سازی

در واحد آماده‌سازی محلول، سیانید توسط اپراتورهای آموزش‌دیده که مجهز به لباس مخصوص، ماسک و تجهیزات ایمنی کامل هستند، از بسته‌بندی‌های مخصوص به‌صورت کنترل‌شده داخل مخازن میکسر تخلیه می‌شود. هر بار، حدود ۹۰۰ کیلوگرم سیانید به همراه مقدار مشخصی آب در مخزن میکسر ریخته شده و پس از آن دستگاه شروع به هم‌زدن مخلوط می‌کند تا محلول یکنواختی از سیانید تهیه گردد. این محلول آماده‌شده سپس به‌صورت کنترل‌شده به واحد هیپ منتقل می‌شود (قندهاری و همکاران، ۱۴۰۴). در این بخش، حوضچه‌های ذخیره با لایه ژئوممبران برای جمع‌آوری محلول‌های مورد استفاده تعبیه شده است. همچنین برای کنترل شرایط اضطراری مانند سرریز یا تعمیرات احتمالی، یک حوضچه ذخیره پشتیبان نیز در نظر گرفته شده تا از بروز آلودگی‌های محیط‌زیستی جلوگیری شود.

۵- هیپ لیچینگ

در این روش، کانسنگ خردشده پس از طی مرحله آگلومراسیون، به‌صورت لایه‌هایی با ارتفاع حدود ۷ متر در محوطه‌ای از پیش آماده‌سازی شده انباشته می‌شود. سطح زیرین این محل ابتدا با لایه‌هایی از ژئوممبران و مواد نفوذناپذیر پوشانده می‌شود و سپس لایه‌ای از ژئوتکستایل حاوی بنتونیت و مواد جاذب رطوبت به‌منظور جلوگیری از نشت محلول‌های شیمیایی به زمین اجرا می‌گردد (شهپازی و همکاران، ۱۴۰۲). پس از انباشت مواد، محلول سیانیدی با دبی و غلظت کنترل‌شده توسط افشانک‌هایی بر روی توده پاشیده می‌شود. این محلول به‌آرامی از درون خلل و فرج موجود در گوله‌های آگلومره عبور کرده و به عناصر فلزی، به‌ویژه طلا را در خود حل می‌کند. محلول حاصل از این فرآیند از طریق سیستم زهکشی جمع‌آوری شده و به

مخازن واحد CIC هدایت می‌شود تا مراحل بعدی بازیابی فلزات انجام گیرد.

۶- واحد جذب با کربن فعال (CIC)

در این مرحله، محلول حاوی طلا که از بستر هیپ خارج شده است، وارد ستون‌های CIC می‌شود. این ستون‌ها حاوی کربن فعال هستند که توانایی بالایی در جذب طلا از محلول دارند (مدبری و همکاران، ۱۳۹۲). با عبور محلول از میان این ستون‌ها، طلا به سطح کربن فعال جذب شده و از محلول جدا می‌گردد. در پایان این مرحله، کربن‌های اشباع‌شده با طلا برای ادامه مراحل بازیابی به واحد الوشن منتقل می‌شوند.

۷- واحد الوشن

در این مرحله، کربن باردار ابتدا توسط سرند از محلول جدا شده و سپس از طریق پمپاژ وارد راکتور الوشن می‌شود. در گذشته، برای جداسازی طلا، کربن را می‌سوزاندند، اما امروزه از روش اسیدشویی استفاده می‌شود تا طلا بدون آسیب به کربن، از سطح آن جدا گردد. پس از جداسازی، کربن برای بازیابی مجدد و فعال‌سازی، به واحد کربن اکتیو منتقل می‌شود. محلول غنی‌شده از طلا نیز وارد واحد الکترووینینگ می‌شود، جایی که با استفاده از جریان الکتریکی، طلا روی صفحات کاتد رسوب می‌کند (صفری و همکاران، ۱۳۹۹). در این مرحله لجن‌هایی حاوی طلا تشکیل می‌شوند که ابتدا با استفاده از دستگاه فیلتر پرس آب‌گیری شده و سپس در کوره‌های مخصوص ذوب می‌شوند تا سرباره از فلز جدا گردد. در نهایت، با ذوب مجدد سرباره، شمش‌های طلا به‌عنوان محصول نهایی تولید می‌شوند.

۸- واحد فعال‌سازی مجدد کربن (Carbon Reactivation Unit)

پس از انجام فرآیند الوشن، کربن فعال مصرف‌شده به منظور حفظ کارایی و استفاده مجدد، به واحد فعال‌سازی حرارتی منتقل می‌شود. در این واحد، کربن فعال طی یک عملیات حرارتی در شرایط کنترل‌شده شامل دما و فشار معین، احیا می‌گردد.

۳-۲- روش پژوهش

هدف از این پژوهش، شناسایی و تحلیل جامع خطرات در واحدهای مختلف کارخانه فرآوری طلای خمین، شامل واحدهای سنگ‌شکن، بالمیل-درایر، آگلومراتور، هیپ لیچینگ، جذب کربن فعال (CIC)، الوشن و ذوب می‌باشد. در این مطالعه، با به‌کارگیری روش EFMEA، خطرات هر واحد به‌صورت نظام‌مند شناسایی و بر اساس معیارهای شدت اثر، احتمال وقوع و احتمال کشف، ارزیابی ریسک شد (جوزی، ۲۰۰۷). یافته‌های تحقیق نشان داد که مهم‌ترین خطرات شامل مواجهه با سیانید، گردوغبار سیلیسی، سروصدا، ارتعاش، شرایط ارگونومیکی نامناسب و خطرات حرارتی هستند که برخی از آن‌ها در رده ریسک‌های بالا ($RPN > 400$) قرار گرفتند. در نهایت، راهکارهای کنترلی مهندسی، اداری و حفاظت فردی متناسب با هر ریسک ارائه شد تا ضمن کاهش احتمال وقوع حوادث، سطح ایمنی و سلامت شغلی کارکنان ارتقاء یابد.

الف) شناسایی مخاطرات ناشی از عوامل زیان آور شیمیایی

۱. واحد سنگ شکن

جدول شماره ۱. خطرات شیمیایی واحد سنگ شکن

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	عوامل زیان آور
استفاده از ماسک‌های تنفسی با فیلتر P100، سیستم‌های تهویه و گردگیر، مرطوب‌سازی محیط، آموزش کارگران	سیلیکوزیس، تحریک دستگاه تنفسی، سرطان ریه، تحریک پوست و چشم	تولید گردوغبار حاوی سیلیس کریستالی در فرآیند خردایش	گردوغبار سیلیسی

۲. واحد آگلومراتور

- افزودن سیمان به مخلوط در درام چرخشی باعث تولید گردوغبار می‌شود که ممکن است از طریق استنشاق یا تماس پوستی وارد بدن شود.
- آسیب‌های احتمالی:

- تحریک پوست: تماس سیمان با پوست می تواند باعث التهاب، خشکی، یا سوختگی شیمیایی شود.
- تحریک دستگاه تنفسی: استنشاق گردوغبار سیمان باعث سرفه، تنگی نفس، یا التهاب مجاری تنفسی می شود.
- تحریک چشم: تماس گردوغبار با چشم می تواند باعث سوزش و التهاب شود.
- حساسیت های مزمن: مواجهه طولانی مدت ممکن است به حساسیت های پوستی یا تنفسی منجر شود (خسروی و همکاران، ۱۳۹۲).

جدول شماره ۲. خطرات شیمیایی واحد آگلومراتور

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب های احتمالی	توضیح	عامل زیان آور
استفاده از ماسک های تنفسی، دستکش و لباس محافظ، سیستم های تهویه و گردگیر، شستشوی منظم پوست و چشم	تحریک پوست، دستگاه تنفسی و چشم، حساسیت های مزمن	تولید گردوغبار در فرآیند افزودن سیمان به مخلوط	گردوغبار سیمان

۳. مخازن (سیانید)

- عوامل زیان آور شیمیایی: سیانید، گازهای ناشی از واکنش های شیمیایی
- سیانید سدیم به عنوان ماده ای بسیار سمی برای تهیه محلول لیچینگ استفاده می شود. نشت یا واکنش های نامناسب می تواند گازهای سمی (مانند سیانید هیدروژن) تولید کند (خسروی و همکاران، ۱۳۹۲).
- آسیب های احتمالی:
- مسمومیت حاد: استنشاق، تماس پوستی، یا بلعیدن سیانید می تواند باعث مسمومیت شدید و حتی مرگ شود.
- تحریک پوست و چشم: تماس سیانید با پوست یا چشم باعث سوختگی شیمیایی یا التهاب شدید می شود.
- آلودگی محیط زیست: نشت سیانید به خاک یا آب های زیرزمینی می تواند فاجعه زیست محیطی ایجاد کند.
- گازهای سمی: تولید گاز سیانید هیدروژن در شرایط خاص (مانند تماس با اسید) می تواند کشنده باشد.

جدول شماره ۳. خطرات شیمیایی مخازن سیانید

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب های احتمالی	توضیح	عامل زیان آور
استفاده از لباس، ماسک و دستکش های مخصوص، آموزش دقیق اپراتورها، ذخیره سازی ایمن، تهویه مناسب	مسمومیت حاد، تحریک پوست و چشم، مرگ	استفاده از سیانید سدیم برای تهیه محلول لیچینگ	سیانید
نصب سیستم های تشخیص گاز، تهویه قوی، حوضچه های ذخیره پشتیبان، آموزش اضطراری	مسمومیت شدید، مرگ	تولید گاز سیانید هیدروژن در شرایط خاص	گازهای سمی
استفاده از ژئوممبران با کیفیت، بازرسی منظم، حوضچه های ذخیره پشتیبان	آلودگی زیست محیطی، آسیب به اکوسیستم	نشت محلول به محیط	نشت سیانید

۴. هیپ لیچینگ

- محلول سیانیدی روی توده های آگلومره پاشیده می شود که می تواند از طریق تماس یا نشت خطر ایجاد کند.
- آسیب های احتمالی:
- مسمومیت حاد: تماس پوستی یا استنشاق بخارات سیانید می تواند کشنده باشد.
- تحریک پوست و چشم: تماس محلول سیانیدی باعث سوختگی شیمیایی یا التهاب می شود.
- آلودگی محیط زیست: نشت محلول به خاک یا آب های زیرزمینی باعث آلودگی شدید محیط زیست می شود.
- گازهای سمی: واکنش های شیمیایی ممکن است گازهای خطرناک تولید کنند (یعقوبی و همکاران، ۱۳۹۲).

جدول شماره ۴. خطرات شیمیایی واحد هیپ لیچینگ

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	عامل زیان‌آور
استفاده از تجهیزات ایمنی (ماسک، دستکش، لباس محافظ)، آموزش کارگران، نظارت دقیق	مسمومیت حاد، تحریک پوست و چشم، مرگ	پاشش محلول سیانیدی روی توده‌های آگلومره	سیانید
استفاده از ژئوممبران و ژئوتکستایل با کیفیت، سیستم‌های زهکشی ایمن، پایش محیط‌زیستی	آلودگی زیست‌محیطی، آسیب به اکوسیستم	نشت محلول به خاک یا آب‌های زیرزمینی	نشت سیانید
نصب سیستم‌های تشخیص گاز، تهویه مناسب، آموزش اضطراری	مسمومیت شدید، مرگ	تولید گازهای خطرناک در واکنش‌های شیمیایی	گازهای سمی

۵. واحد جذب با کربن فعال (CIC)

- محلول سیانیدی از ستون‌های کربن فعال عبور می‌کند و جابجایی کربن فعال می‌تواند گردوغبار تولید کند.
- آسیب‌های احتمالی:
- مسمومیت سیانید: تماس با محلول سیانیدی می‌تواند باعث مسمومیت شدید شود.
- تحریک پوست و چشم: تماس با سیانید یا گردوغبار کربن فعال باعث التهاب می‌شود.
- تحریک دستگاه تنفسی: استنشاق گردوغبار کربن فعال می‌تواند باعث سرفه یا تنگی نفس شود.
- آلودگی محیط‌زیست: نشت محلول سیانیدی از ستون‌ها می‌تواند محیط را آلوده کند.

جدول شماره ۵. خطرات شیمیایی واحد جذب با کربن فعال

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	عامل زیان‌آور
استفاده از تجهیزات ایمنی، آموزش کارگران، نظارت دقیق	مسمومیت حاد، تحریک پوست و چشم	محلول سیانیدی در ستون‌های CIC	سیانید
استفاده از ماسک‌های تنفسی، سیستم‌های تهویه، گردگیرهای صنعتی	تحریک دستگاه تنفسی، پوست و چشم	تولید گردوغبار در جابجایی کربن فعال	گردوغبار کربن فعال
بازرسی منظم ستون‌ها، استفاده از مواد عایق با کیفیت، حوضچه‌های ذخیره	آلودگی زیست‌محیطی	نشت محلول از ستون‌ها	نشت سیانید

۶. واحد الوشن

- اسیدشویی برای جداسازی طلا از کربن فعال و فرآیند ذوب سرباره می‌تواند گازهای سمی تولید کند. سیانید باقیمانده نیز ممکن است وجود داشته باشد.
- آسیب‌های احتمالی:
- سوختگی شیمیایی: تماس اسید با پوست یا چشم باعث سوختگی شدید می‌شود.
- مسمومیت تنفسی: استنشاق گازهای سمی (مانند گازهای ناشی از ذوب یا واکنش‌های اسیدی) می‌تواند باعث آسیب ریوی یا مسمومیت شود.
- تحریک دستگاه تنفسی: گازهای سمی یا بخارات اسیدی می‌توانند باعث سرفه، تنگی نفس، یا التهاب شوند.
- مسمومیت سیانید: سیانید باقیمانده در کربن فعال می‌تواند خطر ایجاد کند (افتخاری و همکاران، ۱۳۹۵).

جدول شماره ۶. خطرات شیمیایی واحد الوشن

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	عامل زیان‌آور
استفاده از لباس و دستکش مقاوم در برابر اسید، تهویه مناسب، آموزش کارگران	سوختگی شیمیایی، تحریک پوست و چشم	استفاده در فرآیند اسیدشویی برای جداسازی طلا	اسید

تهویه قوی، استفاده از ماسک‌های تنفسی با فیلتر مناسب، پایش گازهای محیطی	مسمومیت تنفسی، تحریک دستگاه تنفسی	تولید گازهای سمی در فرآیند ذوب یا واکنش‌های اسیدی	گازهای سمی
استفاده از تجهیزات ایمنی، بازرسی دقیق کربن، آموزش اضطراری	مسمومیت حاد، تحریک پوست و چشم	سیانید باقی‌مانده در کربن فعال	سیانید باقیمانده

۷. واحد فعال سازی مجدد کربن

- فرآیند حرارتی برای احیای کربن فعال می‌تواند گردوغبار و گازهای سمی (مانند مونوکسید کربن یا سایر گازهای ناشی از احتراق) تولید کند.
- آسیب‌های احتمالی:
- تحریک دستگاه تنفسی: استنشاق گردوغبار کربن فعال باعث سرفه یا تنگی نفس می‌شود.
- تحریک پوست و چشم: تماس گردوغبار با پوست یا چشم باعث التهاب می‌شود.
- مسمومیت گازی: گازهای سمی تولیدشده در فرآیند حرارتی می‌توانند باعث مسمومیت یا آسیب ریوی شوند.

جدول شماره ۷. خطرات شیمیایی واحد فعال سازی مجدد کربن

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	عامل زیان‌آور
استفاده از ماسک‌های تنفسی، سیستم‌های تهویه، گردگیرهای صنعتی	تحریک دستگاه تنفسی، پوست و چشم	تولید گردوغبار در جابجایی یا فرآیند حرارتی	گردوغبار کربن فعال
تهویه قوی، نصب سیستم‌های تشخیص گاز، استفاده از ماسک‌های تنفسی با فیلتر مناسب	مسمومیت گازی، آسیب ریوی	تولید گازهای سمی (مانند مونوکسید کربن) در فرآیند حرارتی	گازهای سمی

■ (ب) شناسایی مشکلات ارگونومیک کارگران در واحدهای مختلف استحصال طلا

بیماری‌های ارگونومیک به گروهی از اختلالات گفته می‌شود که ناشی از طراحی نامناسب محیط کار و حرکات نادرست در حین انجام فعالیت‌های شغلی بروز می‌کنند. این بیماری‌ها معمولاً به آسیب‌های عضلانی-اسکلتی و سایر مشکلات جسمی مرتبط با کار منجر می‌شوند.

۱. واحد سنگ شکن

- بلند کردن و جابجایی مواد سنگین: کارگران ممکن است نیاز به جابجایی دستی مواد معدنی یا تجهیزات داشته باشند.
- وضعیت‌های بدنی نامناسب: کار در نزدیکی سنگ‌شکن‌ها یا سرندها ممکن است نیازمند خم شدن، چرخش کمر، یا ایستادن طولانی‌مدت باشد.
- ارتعاشات: ارتعاشات ناشی از سنگ‌شکن‌ها و سرندها می‌توانند به دست‌ها، بازوها، یا کل بدن منتقل شوند.
- آسیب‌های احتمالی:
- دردهای کمر و گردن
- سندرم ارتعاش دست و بازو
- فشار بر مفاصل و عضلات
- خستگی و کاهش تمرکز (حقیر چهره قانی و همکاران، ۱۳۸۶)

جدول شماره ۸. مشکلات ارگونومیک واحد سنگ شکن

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	مشکل ارگونومیک
استفاده از تجهیزات مکانیکی (مانند لیفتراک)، آموزش تکنیک‌های صحیح بلند کردن بار	درد کمر و گردن، کشیدگی عضلانی	جابجایی دستی مواد معدنی یا تجهیزات	بلند کردن مواد سنگین
طراحی ایستگاه‌های کاری ارگونومیک، استفاده از	فشار بر مفاصل، درد مزمن	خم شدن، چرخش کمر، یا	وضعیت‌های بدنی

صندلی‌های قابل تنظیم، استراحت‌های منظم	کمر	ایستادن طولانی مدت	نامناسب
استفاده از دستکش‌های ضداارتعاش، نصب پایه‌های لاستیکی، کاهش زمان مواجهه	سندرم ارتعاش دست و بازو، دردهای عضلانی	ارتعاشات سنگ‌شکن‌ها و سرندها	ارتعاشات

۲. واحد بالمیل-درایر

- کار با تجهیزات سنگین: بارگیری مواد به درایر یا هاپر بالمیل ممکن است نیازمند تلاش فیزیکی باشد.
- وضعیت‌های بدنی نامناسب: نظارت بر درام چرخان یا جابجایی مواد ممکن است باعث خم شدن یا ایستادن طولانی مدت شود (حقیر چهره قانی و همکاران، ۱۳۸۶).
- ارتعاشات: چرخش درام و گوی‌های بالمیل ارتعاشات قابل توجهی تولید می‌کنند.
- آسیب‌های احتمالی:
- کشیدگی عضلانی و درد کمر
- سندرم ارتعاش دست و بازو
- خستگی جسمانی و کاهش دقت

جدول شماره ۹. مشکلات ارگونومیکی واحد بالمیل-درایر

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	مشکل ارگونومیکی
استفاده از لودر یا تجهیزات مکانیکی، آموزش تکنیک‌های جابجایی ایمن	کشیدگی عضلانی، درد کمر	بارگیری مواد به درایر یا هاپر بالمیل	کار با تجهیزات سنگین
طراحی ایستگاه‌های کاری ارگونومیک، استفاده از سکوها قابل تنظیم، استراحت‌های منظم	درد کمر و گردن، فشار بر مفاصل	خم شدن یا ایستادن طولانی مدت برای نظارت	وضعیت‌های بدنی نامناسب
نصب سیستم‌های کاهش ارتعاش، استفاده از دستکش‌های ضداارتعاش، کاهش زمان مواجهه	سندرم ارتعاش دست و بازو، خستگی	ارتعاشات درام و گوی‌های بالمیل	ارتعاشات

۳. واحد آگلومراتور

- جابجایی مواد: افزودن سیمان یا نظارت بر نوار نقاله ممکن است نیازمند جابجایی دستی باشد.
- وضعیت‌های بدنی نامناسب: کار با درام چرخشی یا نوار نقاله می‌تواند باعث خم شدن یا ایستادن طولانی مدت شود.
- حرکات تکراری: فعالیت‌های تکراری مانند تنظیم نازل‌ها یا نظارت بر فرآیند.
- آسیب‌های احتمالی:
- دردهای اسکلتی-عضلانی
- خستگی و کاهش دقت
- فشار بر مچ‌ها و شانه‌ها (حقیر چهره قانی و همکاران، ۱۳۸۶)

جدول شماره ۱۰. مشکلات ارگونومیکی واحد آگلومراتور

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	مشکل ارگونومیکی
استفاده از تجهیزات مکانیکی، آموزش تکنیک‌های جابجایی ایمن	درد کمر، کشیدگی عضلانی	افزودن دستی سیمان یا نظارت بر نوار نقاله	جابجایی مواد
طراحی ایستگاه‌های کاری ارگونومیک، استراحت‌های منظم	درد کمر و گردن، فشار بر مفاصل	خم شدن یا ایستادن طولانی مدت	وضعیت‌های بدنی نامناسب
چرخش وظایف بین کارگران، استفاده از ابزارهای ارگونومیک	فشار بر مچ‌ها و شانه‌ها، خستگی	تنظیم نازل‌ها یا نظارت مکرر	حرکات تکراری

۴. مخازن (سیانید)

- بلند کردن بسته‌های سیانید: تخلیه بسته‌های ۹۰۰ کیلوگرمی سیانید ممکن است نیازمند تلاش فیزیکی باشد.

- وضعیت‌های بدنی نامناسب: نظارت بر میکسرها یا کار در محیط بسته ممکن است باعث خم شدن یا ایستادن طولانی مدت شود.
- حرکات تکراری: انجام فعالیت‌های تکراری مانند تنظیم شیرها یا نظارت بر مخازن.
- آسیب‌های احتمالی:
- کشیدگی عضلانی و درد کمر
- فشار بر مفاصل
- خستگی و کاهش تمرکز

جدول شماره ۱۱. مشکلات ارگونومیکی واحد مخازن سیانید

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	مشکل ارگونومیکی
استفاده از جرثقیل یا تجهیزات مکانیکی، آموزش تکنیک‌های بلند کردن ایمن	کشیدگی عضلانی، درد کمر	تخلیه بسته‌های سنگین سیانید	بلند کردن بسته‌های سیانید
طراحی ارگونومیک ایستگاه‌های کاری، استفاده از سکوها قابل تنظیم	درد کمر و گردن، فشار بر مفاصل	نظارت بر میکسرها یا کار در محیط بسته	وضعیت‌های بدنی نامناسب
چرخش وظایف، استفاده از ابزارهای ارگونومیک، استراحت‌های منظم	فشار بر مچ‌ها و شانه‌ها	تنظیم شیرها یا نظارت مکرر	حرکات تکراری

۵. هیپ لیچینگ

- جابجایی مواد آگلومره: انباشت یا تنظیم توده‌های هیپ ممکن است نیازمند جابجایی دستی باشد.
- وضعیت‌های بدنی نامناسب: کار در فضای باز و روی توده‌های هیپ می‌تواند باعث خم شدن یا ایستادن طولانی مدت شود.
- حرکات تکراری: تنظیم افشانک‌ها یا نظارت بر فرآیند پاشش محلول.
- آسیب‌های احتمالی:
- دردهای اسکلتی-عضلانی
- خستگی جسمانی
- فشار بر کمر و شانه‌ها

جدول شماره ۱۲. مشکلات ارگونومیکی واحدهیپ لیچینگ

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	مشکل ارگونومیکی
استفاده از تجهیزات مکانیکی، آموزش جابجایی ایمن	درد کمر، کشیدگی عضلانی	انباشت یا تنظیم توده‌های هیپ	جابجایی مواد آگلومره
طراحی سکوها یا کاری ارگونومیک، استراحت‌های منظم	درد کمر و گردن، فشار بر مفاصل	کار روی توده‌های هیپ یا در فضای باز	وضعیت‌های بدنی نامناسب
چرخش وظایف، استفاده از ابزارهای ارگونومیک	فشار بر مچ‌ها و شانه‌ها	تنظیم افشانک‌ها یا نظارت مکرر	حرکات تکراری

۶. واحد جذب با کربن فعال (CIC)

- جابجایی کربن فعال: انتقال کربن فعال به ستون‌ها ممکن است نیازمند جابجایی دستی باشد.
- وضعیت‌های بدنی نامناسب: نظارت بر ستون‌ها یا تنظیم تجهیزات می‌تواند باعث خم شدن یا ایستادن طولانی مدت شود.
- حرکات تکراری: انجام فعالیت‌های تکراری مانند بازرسی ستون‌ها.
- آسیب‌های احتمالی:

- کشیدگی عضلانی
- درد کمر و شانه‌ها
- خستگی و کاهش دقت

جدول شماره ۱۳. مشکلات ارگونومیکی واحد جذب با کربن فعال

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	مشکل ارگونومیکی
استفاده از تجهیزات مکانیکی، آموزش جابجایی ایمن	کشیدگی عضلانی، درد کمر	انتقال دستی کربن به ستون‌ها	جابجایی کربن فعال
طراحی ایستگاه‌های کاری ارگونومیک، استراحت‌های منظم	درد کمر و شانه‌ها	نظارت بر ستون‌ها یا تنظیم تجهیزات	وضعیت‌های بدنی نامناسب
چرخش وظایف، استفاده از ابزارهای ارگونومیک	فشار بر مچ‌ها و شانه‌ها	بازرسی مکرر ستون‌ها	حرکات تکراری

۷. واحد الوشن

- جابجایی کربن باردار: انتقال کربن فعال یا لجن طلا ممکن است نیازمند تلاش فیزیکی باشد.
- وضعیت‌های بدنی نامناسب: کار با راکتور الوشن یا فیلتر پرس می‌تواند باعث خم شدن یا ایستادن طولانی مدت شود.
- حرکات تکراری: تنظیم تجهیزات
- آسیب‌های احتمالی:
- دردهای اسکلتی-عضلانی
- خستگی جسمانی
- فشار بر مفاصل

جدول شماره ۱۴. مشکلات ارگونومیکی واحد الوشن

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	مشکل ارگونومیکی
استفاده از تجهیزات مکانیکی، آموزش جابجایی ایمن	درد کمر، کشیدگی عضلانی	انتقال کربن یا لجن طلا	جابجایی کربن باردار
طراحی ایستگاه‌های کاری ارگونومیک، استراحت‌های منظم	درد کمر و شانه‌ها	کار با راکتور یا فیلتر پرس	وضعیت‌های بدنی نامناسب
چرخش وظایف، استفاده از ابزارهای ارگونومیک	فشار بر مچ‌ها و شانه‌ها	تنظیم تجهیزات یا نظارت مکرر	حرکات تکراری

۸. واحد فعال سازی مجدد کربن

- جابجایی کربن فعال: انتقال کربن مصرف‌شده به کوره‌های حرارتی ممکن است نیازمند تلاش فیزیکی باشد.
- وضعیت‌های بدنی نامناسب: نظارت بر فرآیندهای حرارتی یا تنظیم تجهیزات می‌تواند باعث خم شدن یا ایستادن طولانی مدت شود.
- ارتعاشات: تجهیزات حرارتی ممکن است ارتعاشات محدودی تولید کنند.
- آسیب‌های احتمالی:
- کشیدگی عضلانی
- درد کمر و مفاصل
- خستگی و کاهش دقت

جدول شماره ۱۵. مشکلات ارگونومیکی واحد فعال سازی مجدد کربن

اقدامات کنترلی پیشنهادی	آسیب‌های احتمالی	توضیح	مشکل ارگونومیکی
استفاده از تجهیزات مکانیکی، آموزش جابجایی ایمن	کشیدگی عضلانی، درد کمر	انتقال کربن به کوره‌های جابجایی کربن فعال	
طراحی ایستگاه‌های کاری ارگونومیک، استراحت‌های منظم	درد کمر و مفاصل	نظارت بر فرآیندهای حرارتی	وضعیت‌های بدنی نامناسب
نصب سیستم‌های کاهش ارتعاش، استفاده از دستکش‌های ضدارتعاش	خستگی، فشار بر مفاصل	ارتعاشات محدود تجهیزات حرارتی	ارتعاشات

ج- ارزیابی ریسک مجموعه

جهت ارزیابی کلی مخاطرات طرح حاضر، از روش EFMEA استفاده شده است. ارزیابی ریسک به روش EFMEA رویکردی گام به گام برای شناسایی حالات بالقوه خرابی و شکست در فرآیند طراحی، روشی سیستماتیک و سازمان یافته برای بررسی حالات شکست در سیستم می باشد (محمدفام، ۱۴۰۰). بدین ترتیب که کلیه ریسک‌های محتمل یا به عبارت دیگر جنبه‌های مهم زیست محیطی شناسایی شده، در این مرحله مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. عدد اولویت ریسک یا RPN تعریف شده برای این پروژه عبارت است از حاصلضرب وخامت خطر، احتمال وقوع خطر و احتمال کشف خطر. در جداول زیر، به ترتیب، رتبه بندی وخامت خطر، احتمال وقوع خطر و احتمال کشف خطر نشان داده شده است.

جدول شماره ۱۶. رتبه بندی شدت اثر

شدت	تعریف شدت	امتیاز
فاجعه آفرین	تولید شدید آلاینده / اثر غیر قابل جبران بر محیط‌زیست / تخریب غیر قابل جبران منابع انرژی	۱۰
جدی	تولید جدی آلاینده / اثر جدی و خطرناک / تخریب تاسفبار منابع و انرژی	۹
خیلی زیاد	خیلی زیاد آلاینده / اثر خیلی زیاد بر محیط‌زیست / اتلاف یا مصرف بسیار زیاد منابع انرژی	۸
زیاد	تولید زیاد آلاینده / اثر زیاد بر محیط‌زیست / اتلاف یا مصرف زیاد منابع و انرژی	۷
متوسط	تولید متوسط آلاینده / اثر متوسط بر محیط‌زیست / اتلاف یا مصرف متوسط منابع و انرژی	۶
کم	تولید کم آلاینده / اثر کم بر محیط‌زیست / اتلاف یا مصرف کم منابع و انرژی	۵
خیلی کم	تولید خیلی کم آلاینده / اثر خیلی کم بر محیط‌زیست / اتلاف یا مصرف خیلی کم منابع و انرژی	۴
جزئی	تولید جزئی آلاینده / اثر جزئی بر محیط‌زیست / اتلاف یا مصرف جزئی منابع و انرژی	۳
خیلی جزئی	تولید خیلی جزئی آلاینده / اثر خیلی جزئی بر محیط‌زیست / اتلاف یا مصرف خیلی جزئی منابع و انرژی	۲
هیچ	تولید آلاینده ندارد/ بدون اثر منابع و انرژی	۱

جدول شماره ۱۷. رتبه بندی احتمال وقوع خطر

امتیاز	نرخ‌های احتمالی خطر	احتمال رخداد خطر
۱۰	۱ در ۲ یا بیش از آن	خطر تقریباً بسیار زیاد

اجتناب ناپذیر است	۱ در ۳	۹
خطرهای تکراری زیاد	۱ در ۸	۸
	۱ در ۲۰	۷
خطرهای متوسط	۱ در ۸۰	۶
	۱ در ۴۰۰	۵
	۱ در ۲۰۰۰	۴
خطرهای نسبتاً نادر (کم)	۱ در ۱۵۰۰۰	۳
	۱ در ۱۵۰۰۰۰۰	۲
خطر نامحتمل است (بعید)	کمتر از ۱ در ۱۵۰۰۰۰۰۰	۱

جدول شماره ۱۸. رتبه بندی احتمال کشف خطر

شدت	تعریف احتمال کشف	امتیاز
مطلقاً هیچ	هیچ کنترلی وجود ندارد یا در صورت وجود، قادر به کشف خطر بالقوه آن نیست	۱۰
خیلی ناچیز	احتمال خیلی ناچیزی دارد که با کنترل های موجود خطر ردیابی و آشکار می شود.	۹
ناچیز	احتمال ناچیزی دارد که با کنترلهای موجود خطر ردیابی و آشکار شود	۸
خیلی کم	احتمال خیلی کمی دارد که با کنترل موجود ردیابی و آشکار شود	۷
کم	احتمال کمی دارد که با کنترل موجود ردیابی و آشکار شود.	۶
متوسط	در نیمی از موارد محتمل است که با کنترل موجود ردیابی و آشکار شود	۵
نسبتاً زیاد	احتمال نسبتاً زیادی وجود دارد که با کنترل موجود ردیابی و آشکار شود	۴
زیاد	احتمال زیادی وجود دارد که با کنترل موجود ردیابی و آشکار شود	۳
خیلی زیاد	احتمال خیلی زیادی وجود دارد که با کنترل موجود ردیابی و آشکار شود	۲
تقریباً حتمی	تقریباً به طور حتم با کنترلهای موجود ردیابی و آشکار شود	۱

(د) رتبه بندی ریسک

در این مرحله ارزیابی ریسکها با توجه به عدد ریسک برای خطرات زیست محیطی مربوطه محاسبه گردید. به منظور ارزیابی خطرات به روش EFMEA لازم است تا رتبه بندی شدت اثر، رتبه بندی احتمال وقوع ریسک و رتبه بندی میزان تماس هر یک از فعالیتها و جنبه های آن براساس جداول زیر استخراج شود. رتبه ریسک با استفاده از رابطه (۱) به دست می آید (محمدفام و همکاران، ۱۴۰۰).

رابطه (۱) $R = C \times P \times E$ رتبه ریسک

شدت پیامد اثر (C^2)

احتمال وقوع اثر (P^3)

میزان تماس (E^4)

جدول شماره ۱۹. تعیین درجه و سطح ریسک زیست محیطی

سطح ریسک	(RPN) درجه ریسک
$200 >$	کم
$200 - 400$	متوسط
$400 <$	زیاد

² Consequence

³ probability

⁴ Exposure

واحد	جنبه زیست محیطی	پیامد زیست محیطی	کنترل جاری	RPN اولیه	سطح ریسک	اقدامات اصلاحی	RPN ثانویه
سنگ شکن	ایجاد گرد و غبار خردایش و سنگ شکن	آلودگی هوا	ندارد	۸۰۰	بارز	محصور نمودن دستگاه خردایش، مرطوب نمودن خوراک ورودی، استفاده از داست کالکتور	۲۷۰
سنگ شکن	صدای دستگاه	آلودگی صوتی	ندارد	۳۵۰	متوسط	استفاده از یک سیستم محدود کننده جهت دریافت کننده صدا	۱۵۰
سنگ شکن	نشت روغن و گریس از دستگاه	آلودگی خاک و آب	دارد	۳۶۰	متوسط	دقت و نظارت بیشتر بر عملکرد دستگاه و سرویسهای منظم ادوات	۱۲۰
درایر، بالمیل، درام	ایجاد گرد و غبار	آلودگی هوا	بارمیل ندارد	۸۰۰	بارز	استفاده از بگ فیلتر و محصور کردن اطراف دستگاهها	۲۰۰
درایر، بالمیل، درام	نشت مخازن سوخت	آلودگی آب و خاک	دارد ولی کم	۴۰۰	بالا	بازدید مداوم از مخازن سوخت و برطرف کردن نشتی و آب بندی قطعات	۸۰
درایر، بالمیل، درام	دود حاصل از گرمایش درایر (سوخت گازوئیلی)	الودگی هوا	ندارد	۶۷۵	بارز	جایگزینی سوخت	۲۲۵
لیچینگ هیپ	بلند شدن گرد و غبار حاصل از حرکت باد روی هیپ	آلودگی هوا و خاک	ندارد	۶۴۰	بارز	آب پاشی یا تثبیت خاک	۴۰۰
لیچینگ هیپ	نشت سیانید سدیم از زیر و دیواره های هیپ	الودگی خاک و آب	دارد	۷۲۰	بارز	پایش دائم نشتی هیپ	۲۴۰
لیچینگ هیپ	تولید آئروسل ذرات حاوی سیانید سدیم	آلودگی هوا	دارد	۷۵۰	بارز	کنترل و دقت بر روی زمان پاشش آب بر روی هیپ. مخصوصا در روزهای بادی و استفاده از آبیاری قطره ای	۳۰۰

۲۴۰	دقت و نظارت مستمر از مخازن و لوله ها	بارز	۷۲۰	دارد ولی کم	آلودگی آب و خاک	نشت سیانید سدیم از مخازن و لوله های انتقال	CIC مخازن
۷۲	الزام جمع آوری پسماند انتقال به انبار به منظور فروش ضایعات به مراکز بازیافت	پایین	۱۴۸	ندارد	آلودگی محیطی	تولید پسماند صنعتی و ضایعات حاصل از تعمیرات نگهداری	CIC مخازن
۱۲۰	نظارت مستمر از ادوات	متوسط	۳۶۰	دارد ولی کم	آلودگی آب و خاک	ریزش روغن و اسکاژین از نگهداری پمپ ها و دیگر تجهیزات	CIC مخازن
۵۲۵	-	بالا	۵۲۵	دارد ولی کم	آلودگی آب و خاک	اسید شویی کربن فعال	کربن اکتیو
۳۰۰	استفاده از شیوه های نوین در فراوری کربنه ای فعال	متوسط	۳۰۰	دارد	آلودگی هوا	دود حاصل از حرارت دادن کربن	کربن اکتیو
۵	دقت و نظارت بیشتر در دفع پس ماند	متوسط	۳۷۵	دارد ولی کم	آلودگی آب و خاک	تولید پسماند توسط پرسنل	کربن اکتیو
۲۰۰	هدایت پساب به مخازن سپتیک	متوسط	۳۰۰	دارد	آلودگی خاک و آب	رها سازی پساب شستشو	الوشن
۵۲۵	-	بالا	۵۲۵	دارد	آلودگی آب و خاک و هوا	فرایند اسید شویی	الوشن
۳۶۰	-	متوسط	۳۶۰	دارد	آلودگی هوا	بخارات مواد کمک ذوب سرب و جیوه	الوشن

۴-۲- یافته‌های پژوهش

خطرات زیست‌محیطی عمدتاً از نشت سیانید، آلودگی آب و خاک، تولید گردوغبار، گازهای سمی و آتش‌سوزی ناشی از فرآیندهای شیمیایی و حرارتی ناشی می‌شوند. این خطرات در واحدهای زیر شناسایی شده‌اند:

- 0 واحد سنگ‌شکن: گردوغبار سیلیسی
- 0 واحد آگلومراتور: گردوغبار سیمان
- 0 مخازن آماده‌سازی (سیانید): نشت سیانید، گازهای سمی
- 0 هیپ لیچینگ: نشت سیانید، آلودگی آب و خاک
- 0 واحد جذب با کربن فعال (CIC): نشت سیانید، گردوغبار کربن
- 0 واحد الوشن: گازهای سمی، نشت اسید
- 0 واحد فعال‌سازی مجدد کربن: گازهای سمی، گردوغبار کربن
- 0 واحد بالمیل-درایر: گردوغبار معدنی، خطر آتش‌سوزی

۵-۲- بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه، با به‌کارگیری روش سیستماتیک EFMEA، کلیه مخاطرات بالقوه در واحدهای مختلف کارخانه فرآوری طلاي خمین شامل واحدهای سنگ‌شکن، بالمیل-درایر، آگلومراتور، مخازن آماده‌سازی سیانید، هیپ لیچینگ، جذب با کربن فعال (CIC)، الوشن و فعال‌سازی مجدد کربن، مورد شناسایی، ارزیابی و اولویت‌بندی قرار گرفتند. یافته‌های حاصل از این ارزیابی جامع، نشان‌دهنده تنوع و گستردگی قابل‌توجه ریسک‌های شیمیایی، فیزیکی، ارگونومیکی و زیست‌محیطی در این صنعت است که هر یک به نوبه خود می‌توانند پیامدهای جبران‌ناپذیری برای سلامت نیروی انسانی و محیط‌زیست پیرامونی به دنبال داشته باشند (دادکانی و همکاران، ۱۴۰۳).

الف) تحلیل مخاطرات شیمیایی

بر اساس نتایج به دست آمده، مهم‌ترین مخاطرات شیمیایی در این کارخانه مربوط به مواجهه با سیانید سدیم) در مخازن آماده‌سازی، هیپ لیچینگ و واحد (CIC، گردوغبار سیلیسی (واحد سنگ‌شکن)، گردوغبار سیمان (واحد آگلومراتور)، اسیدهای مورد استفاده در فرآیند الوشن و گازهای سمی ناشی از واکنش‌های شیمیایی و فرآیندهای حرارتی (در واحدهای الوشن و فعال‌سازی مجدد کربن) است (جورغلامی و همکاران، ۱۳۹۶). در این میان، ریسک ناشی از سیانید به دلیل سمیت بسیار بالا، احتمال بروز مسمومیت حاد و حتی مرگ و همچنین پتانسیل ایجاد آلودگی گسترده محیط‌زیستی در صورت نشت، به عنوان بحرانی‌ترین خطر شیمیایی شناسایی گردید. واحدهای هیپ لیچینگ و مخازن آماده‌سازی با عدد RPN برابر ۷۲۰ و ۷۵۰ (در مورد تولید آئروسول)، در سطح ریسک «بارز» قرار گرفتند که لزوم توجه ویژه و اقدامات کنترلی فوری را نشان می‌دهد. همچنین گردوغبار سیلیسی در واحد سنگ‌شکن با RPN اولیه ۸۰۰، بالاترین سطح ریسک را در بین عوامل شیمیایی به خود اختصاص داد که عمدتاً به دلیل فقدان کنترل‌های مهندسی مناسب در این بخش است. خوشبختانه، اجرای اقدامات اصلاحی پیشنهادی مانند محصورسازی دستگاه‌ها، استفاده از سیستم‌های گردگیر (بگ‌فیلتر)، مرطوب‌سازی خوراک و تهویه مناسب، توانست سطح ریسک این عوامل را به طور چشمگیری کاهش دهد؛ به طوری که RPN گردوغبار سیلیسی از ۸۰۰ به ۲۷۰ و گردوغبار سیمان نیز با اقدامات مشابه تا سطح قابل‌قبولی کاهش یافت.

(ب) تحلیل مشکلات ارگونومیکی

بررسی مشکلات ارگونومیکی در واحدهای مختلف نشان داد که عواملی نظیر جابجایی دستی مواد سنگین (به ویژه بسته‌های ۹۰۰ کیلوگرمی سیانید)، وضعیت‌های بدنی نامناسب (خم شدن، چرخش کمر و ایستادن طولانی‌مدت)، حرکات تکراری و ارتعاشات ناشی از تجهیزات سنگین، از جمله مهم‌ترین چالش‌های ارگونومیکی هستند. واحدهای سنگ‌شکن، بالمیل-درایر و مخازن سیانید به دلیل ماهیت کاری سنگین و نیاز به نظارت مستمر، بیشترین آسیب‌پذیری را در این زمینه نشان دادند (دهنوی و همکاران، ۱۳۹۵). پیامدهای این مشکلات شامل دردهای مزمن کمر و گردن، سندرم ارتعاش دست و بازو، کشیدگی عضلانی، خستگی جسمانی و کاهش تمرکز کارگران است که در بلندمدت می‌تواند به کاهش بهره‌وری و افزایش غیبت‌های شغلی منجر شود. برای کنترل این مخاطرات، راهکارهایی نظیر استفاده از تجهیزات مکانیکی (لیفتراک، جرثقیل)، طراحی ایستگاه‌های کاری ارگونومیک، آموزش تکنیک‌های صحیح بلند کردن بار، کاهش زمان مواجهه با ارتعاشات، چرخش وظایف بین کارگران و استراحت‌های منظم پیشنهاد گردید که اجرای آنها می‌تواند تا حد قابل‌توجهی از بروز اختلالات اسکلتی-عضلانی جلوگیری نماید.

(ج) تحلیل ریسک‌های زیست‌محیطی

ارزیابی ریسک زیست‌محیطی با استفاده از روش EFMEA نشان داد که مهم‌ترین جنبه‌های زیست‌محیطی در این کارخانه شامل نشت سیانید به خاک و آب‌های زیرزمینی، تولید گردوغبار و آئروسول‌های حاوی سیانید، آلودگی هوا ناشی از دود و گازهای حاصل از فرآیندهای حرارتی و نشت روغن و گریس از تجهیزات است. واحد هیپ لیچینگ با RPN اولیه ۷۲۰ (نشت سیانید از زیر و دیواره‌ها) و ۶۴۰ (بلند شدن گردوغبار) و نیز ۷۵۰ (تولید آئروسول سیانید) و واحد سنگ‌شکن با RPN ۸۰۰ (گردوغبار) و ۶۷۵ (دود حاصل از گرمایش درایر)، بالاترین سطوح ریسک زیست‌محیطی را به خود اختصاص دادند (بلقن آبادی و همکاران، ۱۳۹۹). علاوه بر این، فرآیند اسیدشویی کربن فعال در واحد کربن اکتیو و الوشن با RPN ۵۲۵ در سطح ریسک «بالا» قرار داشت که نشان‌دهنده ضرورت بازنگری در روش‌های کنترلی موجود است. هرچند برخی از این ریسک‌ها دارای کنترل‌های جاری (هرچند ناکارآمد) بودند، اما با اجرای اقدامات اصلاحی پیشنهادی نظیر پایش مداوم نشت، استفاده از ژئوممبران و ژئوتکستایل با کیفیت بالا، آب‌پاشی یا تثبیت خاک در توده‌های هیپ، کنترل دقیق زمان پاشش آب در روزهای بادی، هدایت پساب به مخازن سپتیک و دقت در دفع پسماندها، امکان کاهش چشمگیر RPN تا سطوح متوسط یا پایین به عنوان مثال کاهش RPN نشت سیانید از ۷۲۰ به ۲۴۰ و گردوغبار هیپ از ۶۴۰ به ۴۰۰ فراهم گردید.

نتیجه‌گیری نهایی

به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که صنعت فرآوری طلا با طیف وسیعی از مخاطرات شیمیایی، ارگونومیکی و زیست‌محیطی مواجه است که در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌توانند پیامدهای جبران‌ناپذیری برای سلامت کارکنان و محیط‌زیست به همراه داشته باشند (جان بزرگی و همکاران، ۱۳۹۱). استفاده از روش EFMEA به عنوان یک ابزار سیستماتیک و کارآمد، امکان شناسایی دقیق نقاط بحرانی و اولویت‌بندی ریسک‌ها بر اساس عدد RPN را فراهم نمود (محمدفام و همکاران، ۱۴۰۰). بر اساس یافته‌ها، ریسک‌های مربوط به سیانید (به ویژه در واحدهای هیپ لیچینگ و مخازن) و گردوغبار سیلیسی (در سنگ‌شکن) به عنوان بحرانی‌ترین مخاطرات شناسایی شدند که نیازمند اقدامات کنترلی فوری و مؤثر هستند. در مقابل، با اجرای راهکارهای پیشنهادی شامل اقدامات مهندسی (محصورسازی، تهویه، مرطوب‌سازی، استفاده از فیلترها و بگ‌فیلترها)، اقدامات مدیریتی (بازرسی منظم، آموزش کارگران، چرخش وظایف، طراحی ارگونومیک ایستگاه‌های کاری) و اقدامات حفاظت فردی (استفاده از ماسک‌های تنفسی مناسب، دستکش‌های مقاوم به اسید و شیمیایی، لباس‌های محافظ و عینک ایمنی)، امکان کاهش قابل‌توجه سطح ریسک در تمامی واحدها وجود دارد (محمدفام و همکاران، ۱۴۰۰).

تاکید بر آموزش مستمر کارکنان، ایجاد فرهنگ ایمنی، پایش مداوم محیط‌زیست و بازنگری دوره‌ای ارزیابی ریسک، از عوامل کلیدی در موفقیت پایدار این اقدامات کنترلی خواهد بود. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، جنبه‌های دیگری نظیر ریسک‌های آتش‌سوزی و انفجار، تحلیل اقتصادی اقدامات کنترلی و نیز ارزیابی اثرات تجمعی مواجهه با عوامل زیان‌آور بر

سلامت بلندمدت کارگران مورد بررسی قرار گیرد. در نهایت، به کارگیری رویکرد پیشگیرانه و سیستماتیک مدیریت ریسک در این صنعت، نه تنها به ارتقاء سطح ایمنی و بهداشت شغلی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر واحدهای مشابه در کشور مطرح گردد و گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار صنایع معدنی و فرآوری محسوب شود.

منابع

۱. اعظمی، جابر، بهرامی‌فر، نادر. (۱۳۹۷). ارتباط میزان سیانور با ارتفاع، عمق و فاصله از مجتمع طلای موته در خاک و آب پناهگاه حیات وحش موته، اصفهان. نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست، بهار ۱۳۹۷، شماره ۱، صص ۱-۱۶.
۲. افتخاری، محسن، علیائی، یاسر. (۱۳۹۵). (تکنولوژی استحصال طلا. Gold extraction technology = تهران: انتشارات کیفیت.
۳. ارغوانیان، آذر، درویش‌زاده، روشنک، رسا، ایرج، حسینی‌اصل، امین. (۱۳۹۰). استخراج نواحی دارای پتانسیل استحصال طلا در منطقه غرب مشکین‌شهر، با استفاده از تصاویر HYPERION. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، دوره ۳، شماره ۱ (پیاپی ۹، بهار ۱۳۹۰)، صص ۱-۱۸.
۴. بلقن‌آبادی، سمیه، خانزاده، فاطمه، غلامی، فاطمه، مقیمی، نجمه. (۱۳۹۹). بررسی ریسک فاکتورهای اختلالات اسکلتی عضلانی به روش ارزیابی سریع مواجهه و اثر مداخله ارگونومی بر کاهش اختلالات در کارگران صنعت کلید و پرز. نشریه دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی سبزوار، دوره ۲۷، شماره ۴ (مهر و آبان ۱۳۹۹)، صص ۴۴۷-۴۵۸.
۵. جان‌بزرگی، اعظم، کریمی، عبدالکریم، رهنما، نادر، کریمیان، راضیه، قاسمی، غلامعلی. (۱۳۹۱). ارزیابی ارگونومیک خطر ابتلا به اختلالات عضلانی-اسکلتی معلمان به روش QEC و تاثیر ۸ هفته حرکات اصلاحی منتخب و مداخلات ارگونومی شغلی بر میزان مواجهه آن‌ها. پژوهش در علوم توانبخشی، آذر و دی ۱۳۹۱، شماره ۵، صص ۸۴۳-۸۵۵.
۶. جوزی، سید علی؛ میرسلیمی، سیده مریم. (۱۳۹۵). مدیریت ریسک زیست محیطی سنگ آهن ماد کانسارف شهرستان خرمبید با استفاده از روش های تلفیقی EFMEA و ویلیام فاین. مجله مهندسی منابع طبیعی، شماره ۱، ص ۱۹-۲۷.
۷. حقیرچهره‌قانی، سجاد، علیپور، عارف. (۱۳۸۶). بررسی وضعیت ارگونومیک ماشین‌آلات ترابری در معادن. هفتمین همایش ایمنی، بهداشت و محیط زیست در معادن و صنایع معدنی، تهران.
۸. خسروی، مستوره، قلعه، سحر، محرم‌نژاد، ناصر، یوسفی، حسین. (۱۳۹۲). مدیریت ریسک ایمنی، بهداشت کارخانه استحصال طلا (مطالعه موردی: کارخانه زرشوان). سومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران.
۹. دادکانی، پیمان، حیدری، امید، شهنوازی، سعید، قنبری، امیرحسین. (۱۴۰۳). تجزیه و تحلیل مجموعه ریسک‌های ارگونومیک و ریسک‌های ماشین‌آلات در پروژه عمرانی (پروژه راه‌آهن چابهار-زاهدان، کارگاه قطعه ۶ ب). مطالعات علوم محیط زیست، دوره ۹، شماره ۲ (تابستان ۱۴۰۳)، صص ۸۳۷۴-۸۳۹۱.
۱۰. دهنوی، سارا، واحدی، عبدالله، معتمدزاده طرقله، مجید، مقیم‌بیگی، عباس. (۱۳۹۵). بررسی تاثیر مداخلات ارگونومی در فعالیت‌های دستی بر کاهش اختلالات اسکلتی و عضلانی به روش ارگونومی، زمستان ۱۳۹۵، شماره ۴، صص ۴۲-۵۳.
۱۱. رحیمی، فاطمه، حسن، جلال. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی استحصال طلا از کانی‌های حاوی آرسنیک و گوگرد. سومین همایش ملی تکنولوژی‌های نوین در شیمی، پتروشیمی و نانو ایران، تهران.
۱۲. رستمی طرزم، سکینه، غلامرضا فهیمی، فرید، امیرنژاد، رضا، رهنورد، آبتین، توانا، احمد. (۱۴۰۱). بررسی آلودگی به سیانید و فلزات سنگین آب‌های زیرزمینی، خاک و پسماندهای باطله کارخانجات استحصال طلا: مطالعه موردی کارخانه کانی‌کاران تکاب. پژوهش در بهداشت محیط، دوره ۸، شماره ۲ (تابستان ۱۴۰۱)، صص ۱۷۳-۱۸۶.

۱۳. شهبازی مهر، سهیلا، احمدزاده، غلامرضا. (۱۴۰۲). مدیریت پسماند در استحصال طلا. سومین کنفرانس ملی مدیریت سبز پسماند، تهران.
۱۴. صفری، حسن، رضائی، محمد، خداداد محمودی، غلامرضا. (۱۳۹۹). مروری بر استحصال طلا از کانسنگ‌های مقاوم. اولین کنفرانس بین‌المللی و چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن، تهران.
۱۵. قندهاری، امیر اسماعیل، طاهری ابرده، نسرين سادات. (۱۴۰۴). کاربرد نانوتکنولوژی در استحصال طلا: بهینه‌سازی فرآیند، کاهش هزینه و آلاینده‌گی. نهمین کنفرانس ملی نوآوری و فناوری علوم زیستی و شیمی ایران، تهران.
۱۶. کارگراسی، مریم. (۱۴۰۳). کاربرد گسترده «سیانید سدیم» در صنایع فولاد، معدنکاری، آبکاری فلزات و استحصال طلا/ چین بزرگ‌ترین تولیدکننده و آمریکا و بلژیک مهم‌ترین صادرکننده ماده شیمیایی معدنکاری. نشریه پردازش، دوره ۲۰، شماره ۱۸۶-۱۸۷ (اردیبهشت و خرداد ۱۴۰۳)، صص ۸۲-۸۹.
۱۷. مدبری، سروش، ثابتی محمدی، ساناز. (۱۳۹۲). معرفی روش لیچینگ حوضچه‌ای (VAT) به‌عنوان گزینه برتر زیست‌محیطی در استحصال طلا. اولین همایش تخصصی محیط زیست، انرژی و صنعت پاک، تهران.
۱۸. مظفرجلالی، مریم، حاجیانی، محمود. (۱۴۰۳). کارایی روش جذب سطحی در حذف سیانید از پساب کارخانجات فرآوری طلا (مقاله مروری). دومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی چالش‌های محیط زیست: صنعت و معدن سبز، تهران.
۱۹. محمدفام، ایرج؛ غلامی زاده، کامران؛. (۱۴۰۰). ارزیابی ریسک‌های امنیتی به دو روش FEMA و FEMA فازی و مقایسه نتایج آن‌ها: مطالعه موردی در یک نیروگاه سیکل ترکیبی. مهندسی بهداشت حرفه‌ای، شماره ۸، ص ۱۵-۲۰.
۲۰. یعقوبی، محسن، رحمانی، فریدون. (۱۳۹۱). بررسی روش‌های استحصال طلا و مسائل زیست‌محیطی مربوط به آن. نشریه پردازش، اسفند ۱۳۹۱، شماره ۶۴-۶۵، صص ۴۲-۴۹.

Comprehensive Hazard Evaluation in the Gold Recovery Process Using the EFMEA Approach: A Case Study of the Khomein Gold Ore Processing Plant

Maryam Nasri Nasrabadi^{*1}, Parvaneh Pekanpourfard², Rahman Daniali³

¹ Department of Environment, Department of Food Science and Technology, Institute of Agriculture, Water, Food, and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

² Department of HSE Management, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

³ Environmental Specialist, Isfahan Provincial Department of Environment

Abstract

The gold extraction industry faces extensive hazards to employee health and the environment due to the use of highly toxic chemicals (especially cyanide) as well as heavy mechanical and thermal processes. This study aimed to identify and comprehensively assess chemical, ergonomic, and environmental hazards in the Khomein Gold Processing Plant. All operational units of the plant were evaluated for risk using the systematic EFMEA (Environmental Failure Mode and Effects Analysis) method. The Risk Priority Number (RPN) was calculated based on severity, probability of occurrence, and detectability, and appropriate control measures were proposed. The most significant hazards included exposure to cyanide, crystalline silica and cement dust, toxic gases, ergonomic issues (manual material handling, awkward postures, and vibrations), and environmental risks (cyanide leakage and soil/water contamination). The highest risk levels (RPN>400) were related to silica dust (RPN=800), cyanide aerosol (RPN=750), and cyanide leakage (RPN=720). By implementing corrective actions, the risk levels of most hazards were significantly reduced. The EFMEA method is an effective tool for comprehensive risk management in the gold processing industry. Cyanide and crystalline silica dust were identified as the most critical risk factors. Implementing engineering, administrative, and personal protective control measures, along with continuous employee training, can improve occupational health and safety levels and prevent environmental pollution.

Keywords: Risk Assessment, EFMEA, Gold Extraction, Cyanide, Heap Leaching
