مجله محیط زیست و توسعه فرابخشی
Journal homepage: https://www.envjournal.ir

ارزیابی و مدیریت ریسک‌های محیط‌زیستی واحدهای فرآیندی صنایع کاغذسازی با استفاده از رویکرد E-FMEA (مطالعه موردی: کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا)

سارا دارابی[۱]، سپیده سعیدی[۱*]، سیدحامد میرکریمی[۱]

۱- گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

کلمات کلیدی:
ارزیابی ریسک، ریسک محیط‌زیستی، صنعت خمیرکاغذ و کاغذسازی، EFMEA، مدیریت بحران

چکیده

مقدمه: توسعه‌ی صنعتی، نتیجه تغییر در روش‌ها و توسعه‌ی ماشین‌آلات جدید است که به منظور تأمین مایحتاج جوامع انسانی ایجاد شده است، عدم ارزیابی پیامدهای این توسعه می‌تواند خطرات جدی برای انسان و محیط‌زیست ایجاد کند. به همین جهت دستیابی به ابزار مدیریتی و هدفمند که تهدیدات بالقوه و بالفعل را در زمینه‌ی بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست به روش‌های دقیق، تعیین و به شکل مؤثری کنترل کند، امری لازم و ضروری است. در بین صنایع مختلف، صنعت کاغذ و خمیرکاغذ با توجه به سرانه بالای تولید کاغذ برای تأمین نیازهای جامعه، یک صنعت در حال رشد است و به عنوان ششمین صنعت آلوده‌کننده در بین صنایع جهان معرفی شده است. این صنعت علاوه بر پیامدهای محیط‌زیستی ممکن است خطرات زیادی برای نیروی انسانی شاغل در آن به دنبال داشته باشد این خود باعث توجه بیشتر به موضوع ارزیابی ریسک بهداشتی- ایمنی و به ویژه محیط‌زیستی در این صنعت شده‌است. از این رو لازم است خطراتی که نیروی انسانی و همچنین محیط‌زیست را تهدید کرده، شناسایی شود و فعالیت‌هایی جهت کاهش این خطرات به این صنعت پیشنهاد شود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه از روش EFMEA (تجزیه و تحلیل حالات شکست و آثار محیط زیستی آن) که از روش‌های کارآمد ارزیابی ریسک محیط‌زیستی است، جهت شناسایی و ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا استفاده شد. در ابتدا ریسک‌های واحدهای فرآیندی (شامل واحد خمیرسازی، خط تولید و واحد دیگ‌بخار)، شناسایی شدند. در گام بعدی پیامد ریسک‌های شناسایی‌شده با استفاده از مؤلفه‌های شدت پیامد، احتمال وقوع و احتمال کشف و شناسایی ارزیابی شدند. پس از تعیین حد اطمینان، ریسک‌های محیط‌زیستی طبقه‌بندی شدند و در نهایت اقدامات کنترلی/ اصلاحی جهت حذف یا کاهش ریسک‌ها پیشنهاد گردید. در گام آخر ارزیابی ثانویه ریسک‌های محیط‌زیستی بعد از اقدامات اصلاحی انجام شد و اولویت اجرای اقدامات اصلاحی با توجه به درجه امکان‌سنجی مشخص شد.

نتایج: از ۱۶ ریسک محیط‌زیستی شناسایی شده، ۳ مورد در سطح ریسک با شدت بالا، ۱۱ مورد در سطح ریسک با شدت متوسط و ۲ ریسک در سطح ریسک با شدت کم قرار گرفتند. بالاترین سطح ریسک مربوط به ایجاد رسوب در دیگ‌بخار است که مصرف بیشتر سوخت و آلودگی هوا را به دنبال دارد. آلودگی

* پست الکترونیکی نویسنده مسؤول: s.saeidi @gau.ac.ir

خاک ناشی از ورود پساب خط تولید و واحد خمیرسازی قبل از انجام عملیات تصفیه به استخرخاکی جهت ته‌نشینی و همچنین فلش‌شدن کندانس (تبدیل فاز مایع به بخار) نیز از دیگر ریسک‌های اصلی کارخانه مورد مطالعه محسوب می‌شود. با ارائه راهکارهای اصلاحی تمامی ریسک‌ها به سطح ریسک با شدت کم کاهش یافتند.

بحث: نتایج تحقیق حاضر و بررسی تحقیقات مشابه انجام شده در صنایع مختلف نشان داد، انجام مطالعات ارزیابی ریسک و ارائه اقدامات اصلاحی تا حد قابل توجهی می‌تواند منجر به کاهش سطوح ریسک شود. تلفیق روش‌های ارزیابی ریسک‌های بهداشتی- ایمنی و محیط زیستی، با نظام‌مند ساختن فرآیند شناسایی جنبه‌ها، می‌توانند موجب افزایش دقت و صحت نتایج برآورد ریسک شوند و در نهایت راهکارهای شناسایی شده می‌تواند در قالب دستورالعمل مدیریت ریسک در واحد مورد مطالعه به کار گرفته شود و پس از شناسایی راهکارها و اتخاذ استراتژی مطلوب برای مهار هر یک از ریسک‌ها، امکان طرح سناریوهای عملیاتی متناسب با هر یک از این استراتژی‌ها و منطبق بر دستورالعمل مدیریت بحران فراهم خواهد شد.

مقدمه

توسعه‌ی صنعتی، نتیجه‌ی تغییر در روش‌ها و توسعه‌ی ماشین‌آلات جدید است که به منظور تامین مایحتاج جوامع انسانی ایجاد شده است، عدم ارزیابی این موارد می‌تواند خطرات جدی برای انسان و محیط‌زیست ایجاد کند (Belji-Kangarloo *et al.*,2021). از این رو، دستیابی به ابزارهای مدیریتی هدفمند برای شناسایی دقیق، ارزیابی و کنترل مؤثر تهدیدات بالقوه و بالفعل در حوزه‌های بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست (HSE[1]) امری حیاتی است (Hemmatinia *et al.*, 2020). در دهه‌های اخیر، با افزایش آگاهی عمومی و فشار ذینفعان، صنایع و سازمان‌ها علاوه بر رضایت مشتریان، ملزم به توجه ویژه به مسائل محیط‌زیستی و سلامت و رفاه کارکنان شده‌اند. این انتظارات، سازمان‌ها را به سمت استقرار و بهبود سیستم‌های مدیریت HSE سوق داده و منجر به کاهش مشکلات محیط‌زیستی، ارتقاء ایمنی، سلامت و بهره‌وری کارکنان می‌شود. چنین رویکردی، اعتبار سازمان را نزد سرمایه‌گذاران، مشتریان و سایر ذی‌نفعان حساس به این مسائل، تقویت می‌کند (Mollaverdijan *et al.*, 2020). تمام فعالیت‌های انسانی با نوعی ریسک همراه است (Jozi *et al.*, 2011) و بسیاری از این ریسک‌ها پیامدهای محیط‌زیستی دارند که اهمیت ارزیابی ریسک محیط‌زیستی را دوچندان می‌کند (Laribaghal *et al.*, 2011). حفاظت از محیط‌زیست به عنوان یکی از چالش‌های جهانی و یک ارزش بنیادین، جزء لاینفک توسعه پایدار محسوب می‌شود (Pourmirza *et al.*, 2020). در ایران نیز، دستیابی به توسعه پایدار چشم‌انداز ۲۰ ساله کشور را شکل می‌دهد و عوامل مختلفی از جمله عوامل اجتماعی، صنعتی، فرهنگی، اقتصادی و همچنین بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست بر روی آن تاثیر دارد (Alimohammadloo *et al.*, 2011). ارزیابی ریسک از جنبه‌های مختلف ایمنی، بهداشتی و محیط‌زیستی قابل برآورد است. ریسک، نتیجه‌ی عدم قطعیت و یا احتمال به وقوع پیوستن یک حادثه با اثرات منفی است (Jozi *et al.*, 2011). ارزیابی ریسک فرایند برآورد احتمال وقوع یک رویداد مطلوب یا نامطلوب و میزان تأثیر آن تعریف می‌شود و نتایج برآوردشده از ارزیابی ریسک به عنوان داده‌های ورودی در سایر مرحله‌های مدیریت ریسک در نظرگرفته می‌شود (Zahmatkesh *et al.*, 2022). ارزیابی ریسک محیط‌زیستی، به بررسی خطرات محتمل و پیش‌بینی احتمال به‌وقوع پیوستن آن، با درنظرداشتن شکنندگی و آسیب‌پذیری محیط اطراف آن می‌پردازد (Jozi *et al.*, 2010). در میان صنایع مختلف، صنعت کاغذ و خمیرکاغذ، با توجه به سرانه بالای تولید برای تامین نیازهای جامعه، صنعتی رو به رشد است، اما در عین حال به عنوان ششمین صنعت آلاینده در جهان شناخته می‌شود (Dixit *et al.*, 2019). این صنعت پتانسیل انتشار حجم قابل توجهی از پساب، پسماند و انتشارات هوابرد را

[1] Health-Safety-Environment

دارد. گازهای آلاینده می‌توانند اختلالات مزمن مانند سردرد و تهوع ایجاد کنند، و وجود فلزات سنگین در فاضلاب این صنایع، در صورت رها شدن به محیط زیست، اثرات محیط زیستی و اجتماعی گسترده‌ای به دنبال خواهد داشت. همچنین، پسماندهای این صنعت به طور مستقیم و غیرمستقیم بر چرخه غذایی مرتبط با کشاورزی و ماهیگیری تأثیر می‌گذارد و پساب‌های موجود در پهنه‌های آبی، محیط را برای رشد و تکامل میکروب‌ها، پلانکتون‌ها و ماهی‌های کوچک نامناسب می‌سازد (Dixit *et al*., 2019).

کشورهای پیشرفته با درک آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از گسترش صنایع، به دنبال توسعه راهکارهایی برای پیشگیری از آثار زیست‌محیطی فرآیندها با افزایش کارایی و کاهش آسیب برای انسان و محیط‌زیست هستند (Ehrampoush *et al*., 2017). این در حالی است که در ایران و سایر کشورهای در حال توسعه، توجه به مسائل و جنبه‌های زیست‌محیطی کمتر از جنبه‌های ایمنی پروژه بوده است (Moghadami *et al*., 2015).

تاکنون روش‌های مختلفی برای شناسایی، طبقه‌بندی و ارزیابی جنبه‌های زیست‌محیطی ارائه شده است. ارزیابی ریسک محیط‌زیستی یکی از ابزارهای مهم در مدیریت محیط‌زیست برای کاهش خطرات حاصل از پروژه‌ها و رسیدن به توسعه پایدار است که در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری بسیاری از کشورها مورد توجه قرار گرفته است (Kheirkhah & Amiri, 2019). این رویکرد فراتر از یک ارزیابی ساده است، زیرا علاوه بر تحلیل جنبه‌های گوناگون ریسک در منطقه تحت تأثیر، میزان حساسیت محیط‌زیست و ارزش‌های خاص زیست‌محیطی منطقه را نیز مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Ghaderi *et al*., 2015).

یکی از پرکاربردترین و کامل‌ترین تکنیک‌های ارزیابی ریسک، روش تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست محیط‌زیستی (EFMEA) است. این روش در شناسایی و رفع بسیاری از خطاهای پنهان و آشکار موجود در روند یک پروژه و همچنین کاهش هزینه‌های آن بسیار راهگشا خواهد بود (Kheirkhah & Amiri, 2019). مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی ریسک در صنعت کاغذسازی انجام شده است. به عنوان مثال، Dixit و همکاران (۲۰۱۹)، آلاینده‌های صنعت کاغذ و خمیرکاغذ را بررسی کرده، خطرات آن‌ها را برای محیط‌زیست و انسان شناسایی و با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی، اقدامات اصلاحی برای کاهش آلایندگی این صنعت ارائه کردند. Arun و Palanisamy نیز در سال ۲۰۱۸ به شناسایی خطراتی که کارکنان در صنعت کاغذسازی را تهدید می‌کند، پرداختند و راهکارهایی برای بهبود امنیت و سلامت آن‌ها پیشنهاد دادند، اما به خطرات و مسائل زیست‌محیطی این صنعت نپرداختند.

با توجه به اهمیت ارزیابی ریسک از منظر جنبه‌های زیست‌محیطی و بهداشت و ایمنی، و ضرورت اجرای آن در صنایع مختلف به ویژه صنعت کاغذسازی به عنوان یکی از صنایع با ریسک بالا، پژوهش حاضر به دنبال ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی واحدهای فرآیندی کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا (شامل دیگ بخار، خمیرسازی و خط تولید) با استفاده از روش EFMEA است. این واحدها به دلیل ماهیت عملیاتی، از آلاینده‌ترین بخش‌های صنعت کاغذسازی محسوب می‌شوند. در ادامه، روش‌های اصلاحی و کنترلی برای کاهش سطح ریسک‌های شناسایی شده ارائه خواهد شد. بر این اساس، پژوهش حاضر به دنبال پاسخگویی به پرسش‌های کلیدی زیر است:

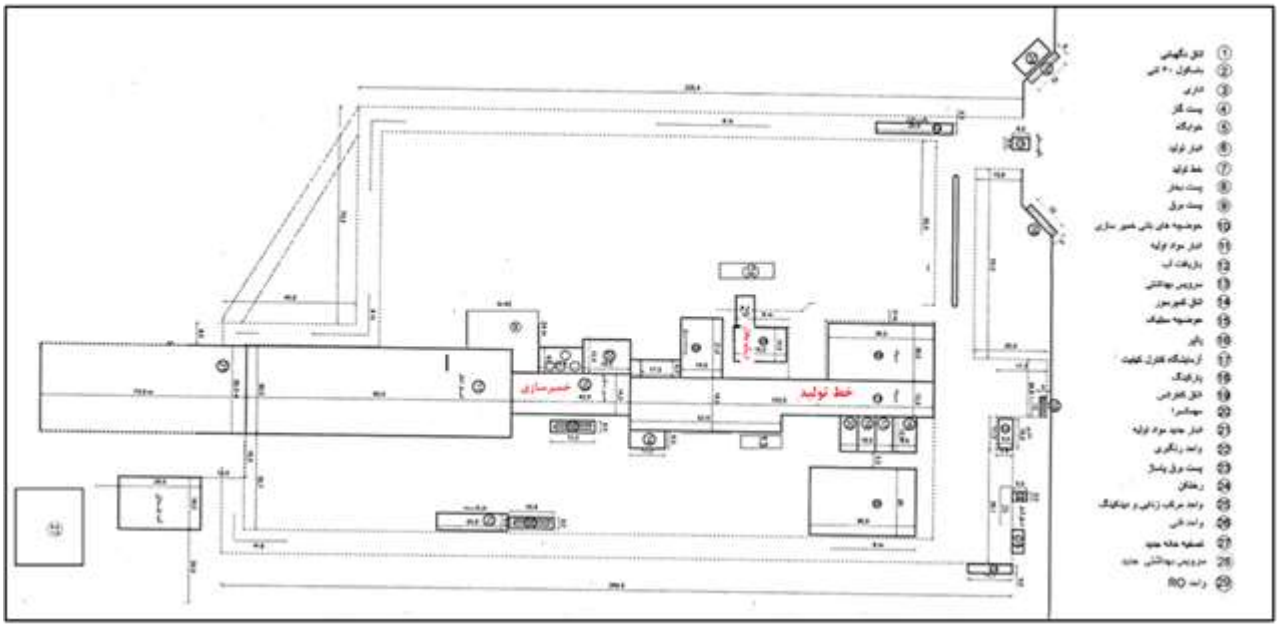
- ریسک‌های محتمل محیط‌زیستی در واحدهای مورد مطالعه (دیگ بخار، خمیرسازی و خط تولید) کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا کدامند؟
- جهت حذف یا کاهش این ریسک‌ها، چه اقدامات کنترلی و اصلاحی می‌بایست انجام پذیرد؟
- کدام اقدام کنترلی یا اصلاحی نسبت به سایر اقدامات، در اولویت مدیریت ریسک قرار دارد؟

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا با مساحت ۲۵۰۰۰۰ مترمربع واقع در شهرستان آق قلا در استان گلستان واقع شده است. این کارخانه دارای ۱۱ واحد مختلف شامل: ۱- انبار مواد اولیه، ۲- خمیرسازی، ۳- خط تولید، ۴- دیگ‌بخار، ۵- آزمایشگاه کنترل کیفی، ۶- تصفیه‌خانه، ۷- برق، ۸- انبار قطعات، ۹- واحد فنی، ۱۰- واحد اداری و ۱۱- انبار محصولات می باشد. واحدهای فرآیندی کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا

شامل: دیگ‌بخار، خمیرسازی و خط‌تولید می باشد که از آلاینده‌ترین بخش‌های صنعت کاغذسازی محسوب می‌شود و در این مطالعه جهت ارزیابی ریسک مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۱ سایت پلان کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سایت پلان کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر یک پژوهش تحلیلی- میدانی است. ابتدا با بررسی فرآیند واحدهای دیگ‌بخار، خمیرسازی و خط‌تولید و همچنین با استفاده از نقشه‌های PFD[1] و P&ID[2]، فهرستی ابتدایی از مهم‌ترین ریسک‌ها و خطرها در حوزه‌ی محیط‌زیست با تمرکز بر فعالیت‌های واحد تهیه شد. در ادامه تیمی متشکل از کارشناسان و خبرگان شامل افرادی از واحد HSE مجتمع، واحد تشکیل شد و با استفاده از روش‌هایی همچون چک‌لیست، بررسی مستندها، نظرخواهی از اپراتورهای مربوط به بخش‌های مختلف، علل و پیامدهای مرتبط با هر ریسک شناسایی و ارزیابی شد. درنهایت ریسک‌های محیط‌زیستی طرح با روش E-FMEA ارزیابی شده‌اند. EFMEA یک روش تخصصی از روش FMEA است که به طور خاص بر ارزیابی ریسک‌های مرتبط با عوامل محیطی تمرکز دارد (Ghaderi *et al.*, 2015). علاوه بر روش E-FMEA روش‌های دیگری مانند FTA[3]، ETA[4] و PHA[5] نیز جهت ارزیابی ریسک وجود دارد. از مزایای روش E-FMEA می‌توان به شناسایی علل و اثرات بالقوه ریسک اشاره کرد. در این روش نه تنها ریسک شناسایی می‌شود، بلکه علل و اثرات هر ریسک نیز بررسی می‌شود. این امر به درک بهتر ریسک و توسعه اقدامات پیشگیرانه موثرتر کمک می‌کند. علاوه بر این در این روش، ریسک‌ها با استفاده از شاخص‌هایی مانند: شدت، احتمال وقوع و احتمال کشف و شناسایی، اولویت‌بندی می‌شوند. این امر به تخصیص بهینه منابع برای کاهش مهم‌ترین ریسک‌ها منجر می‌شود. این روش یک فرآیند تکرارپذیر و قابل‌استفاده در صنایع مختلف است. از معایب این روش هم می‌توان به وابستگی به دانش و تجربه تیم ارزیاب، زمان‌بر بودن، ذهنی بودن ارزیابی‌ها (ارزیابی شدت، احتمال وقوع و قابلیت کشف و شناسایی) اشاره کرد. علاوه بر این، این روش معمولاً بر ریسک‌های منفرد و مستقل تمرکز دارد و

[1] Process Flow Diagram
[2] Piping and instrumentation diagram
[3] Fault Tree Analysis
[4] Event Tree Analysis
[5] Preliminary Hazard Analysis

ممکن است تعاملات پیچیده بین ریسک‌های متعدد رادر نظر نگیرد.

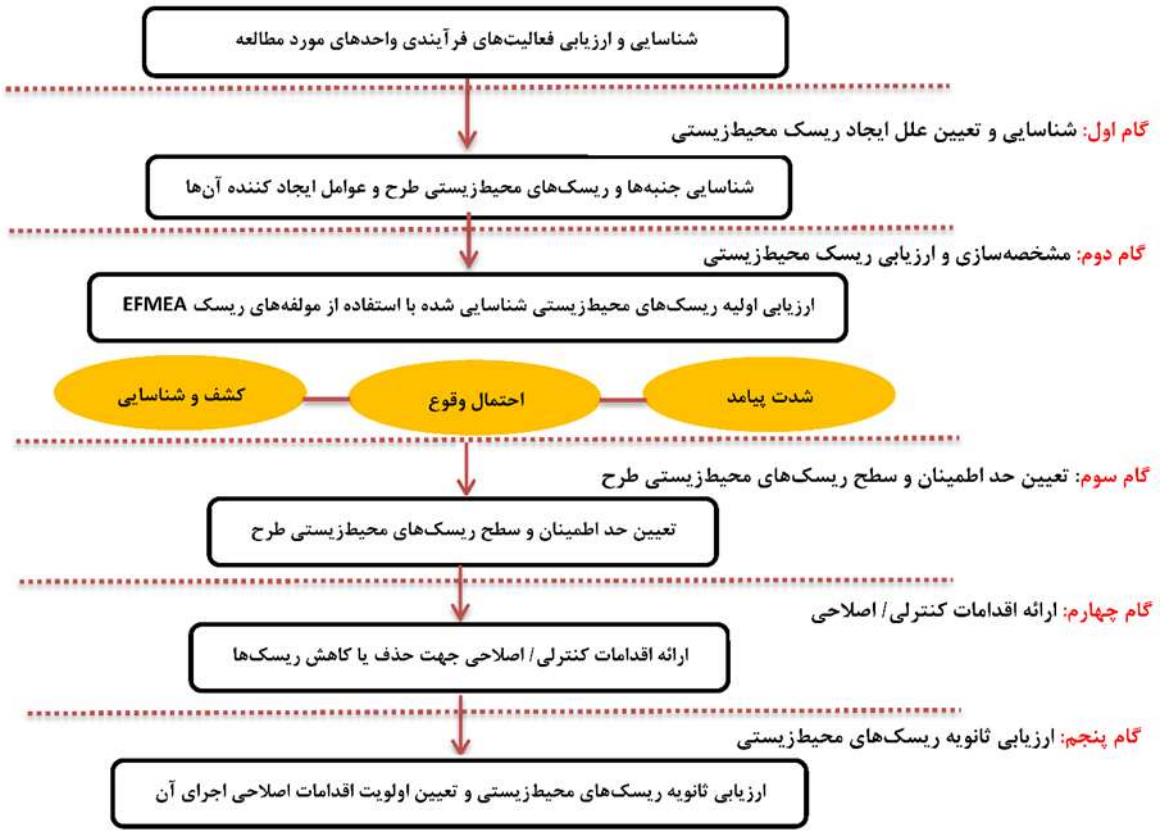
PHA به عنوان یکی یگر از روش‌های پرکاربرد ارزیابی ریسک در مقایسه با E-FMEA یک روش کلی‌تر و مقدماتی برای شناسایی خطرات در مراحل اولیه طراحی است و بیشتر بر جنبه‌های ایمنی و بهداشتی تأکید دارد و جنبه‌های محیط زیستی در این روش کمتر مورد توجه قرار گرفته اند. در مقایسه با FMEA ، PHA معمولاً دامنه وسیع‌تری دارد اما جزئیات کمتری را بررسی می‌کند (Qi *et al*., 2020).

FTA نیز یک روش تحلیلی نزولی است که صرفاً بر روی یک رویداد نامطلوب خاص تمرکز کرده و علل احتمالی آن را به صورت نمودار درختی نشان می‌دهد. FTA در تحلیل سناریوهای پیچیده ریسک و وابستگی بین ریسک‌ها قوی‌تر از FMEA است ولی نسبت به FMEA دامنه بسیار محدودی دارد (Mangla *et al*., 2016).

ETA یک روش تحلیلی صعودی است که از یک رویداد آغازین شروع شده و پیامدهای احتمالی آن را بررسی می‌کند. ETA برای تحلیل توالی ریسک‌ها و ارزیابی اثربخشی سیستم‌های ایمنی مناسب است، در حالی که FMEA بر شناسایی حالت‌های مختلف ریسک تمرکز دارد و در روش E-FMEA نیز به طور خاص بر مسائل محیط زیستی تأکید می‌گردد (Domínguez *et al*., 2021).

انتخاب روش مناسب ارزیابی ریسک بستگی به اهداف ارزیابی، مرحله چرخه عمر پروژه، پیچیدگی سیستم و منابع موجود دارد. لذا در این مطالعه با توجه به این که هدف ارزیابی ریسک‌های محیط زیستی است از روش E-FMEA استفاده شد. این روش در مقایسه با سایر روش‌ها ریسک‌های محیط زیستی را به طور اختصاصی مورد بررسی قرار می‌دهد و در مراحل بهره‌برداری نیز کاربرد دارد. با استفاده از روش EFMEA در کنار شناسایی سایر جنبه‌های ریسک، دو گروه از جنبه‌های محیط‌زیستی نیز شناسایی می‌شود: ۱- جنبه‌های محیط‌زیستی که تولید یا انتشار آلاینده‌ها، ضایعات، فاضلاب و پسماند را به دنبال دارد. ۲- جنبه‌های محیط‌زیستی که سبب هدررفت یا کاهش منابع‌طبیعی یا انرژی در اثر استفاده از آن‌ها می‌شود (Ghaderi *et al*., 2015).

مراحل ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی: مراحل انجام ارزیابی و مدیریت ریسک‌های محیط‌زیستی به شرح شکل ۲ می باشد (Blivband *et al*., 2004).



شکل ۲- فلودیاگرام فرآیند ارزیابی و مدیریت ریسک‌های محیط‌زیستی

گام اول: شناسایی ریسک‌ها و خطرات محیط‌زیستی و عوامل ایجادکننده آن‌ها به صورت تفکیک‌شده در واحدهای مختلف کارخانه: در این مرحله ریسک‌های محیط‌زیستی و عوامل ایجادکننده آن به صورت تفکیک شده در واحدهای مختلف با کمک و همکاری مسئول HSE کارخانه، نظرخواهی از اپراتورهای مربوطه و سپس با استفاده از روش‌هایی مانند: بررسی مستندها و بازدید میدانی از بخش‌های مختلف، شناسایی شد.

گام دوم: ارزیابی پیامد ریسک‌های محیط‌زیستی شناسایی‌شده با استفاده از مؤلفه‌های EFMEA: ارزیابی پیامدهای ریسک نیازمند شناسایی و برآورد سه فاکتور شدت پیامد ریسک، احتمال وقوع و احتمال کشف و شناسایی اثر پیش از رخداد اثر است.

شدت پیامد ریسک (Severity): درجه‌بندی شدت ریسک، برآوردی از میزان اهمیت و جدی بودن پیامد محیط‌زیستی اثرات است و نشان‌دهنده وسعت و دامنه خسارات و تلفاتی است که در صورت بالفعل شدن ریسک ایجاد می‌شوند. دستورالعمل طبقه‌بندی این مؤلفه به شرح جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- دستورالعمل طبقه‌بندی شدت پیامد ریسک (Roszak *et al.*, 2015)

امتیاز		شرح شدت اثر
۱	خیلی کم	ریسک پیامدی ندارد- خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات در فرایند طرح، تأثیری بر کیفیت محیط‌زیست منطقه ندارد- تخطی از استانداردهای محیط‌زیستی صورت نگرفته است.
۲-۳	کم	پیامد ریسک جزئی است- خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات نادر و دارای اثر جزئی بر محیط‌زیست است- غالباً تخطی از استاندارد زیست‌محیطی صورت نخواهد گرفت.
۴-۶	متوسط	پیامد ریسک متوسط است- خرابی و نقص در فرایند، اثرات مشخصی بر کیفیت محیط‌زیست دارد- افزایش تعداد خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات دارای اثر بارز بر محیط‌زیست است و برای بهبود نیازمند روش‌های اصلاحی استاندارد است- تخطی از استانداردهای محیط‌زیست نادر و دامنه پیامدهای محلی شامل محدوده حضور ماشین‌آلات و تجهیزات طرح (محدوده اثر بلافصل) است.
۷-۸	زیاد	پیامد ریسک زیاد است- بروز خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات دارای اثر قابل‌توجهی بر محیط‌زیست می‌باشد و نیازمند اقدامات اصلاحی فراتر از روش‌های استاندارد تثبیت فرایند طرح دارد- تخطی از استانداردهای زیست‌محیطی، محیط‌زیست پیرامون طرح (محدوده اثر مستقیم) را تحت تأثیر قرار می‌دهد.
۹-۱۰	خیلی زیاد/ بحرانی	پیامد ریسک بسیار زیاد است- خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات تأثیر بزرگی و قابل‌توجهی بر محیط‌زیست و مردم می‌گذارد- تخطی از استانداردهای زیست‌محیطی، منطقه‌ای بسیار بزرگ‌تر از طرح (محدوده اثر غیرمستقیم) را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

احتمال وقوع (Occurrence): احتمال رخداد شکست یا خرابی قابل‌انتظار در طول عمر یک سیستم است و بیانگر احتمال بروز یک جنبه زیست‌محیطی و پیامد ناشی از آن در تواتر زمانی معین می‌باشد. دستورالعمل طبقه‌بندی مؤلفه احتمال وقوع به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲- رتبه‌بندی مولفه احتمال وقوع ریسک محیط‌زیستی (Roszak *et al.*, 2015)

امتیاز		شرح احتمال وقوع
۱	غیرمحتمل	اتفاق نمی‌افتد. تخطی از محدوده‌های استانداردها زیست‌محیطی تعیین‌شده در فرآیند صورت نمی‌گیرد. وضعیت پایدار و فاقد عملیات و شرایط اضطراری در ماشین‌آلات و تجهیزات.
۲	بعید و دور از باور	تقریباً غیرممکن است- تقریباً تخطی از استانداردهای تعیین‌شده و محدوده‌های زیست‌محیطی غیرممکن است و تضمین خیلی زیادی از عدم خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات وجود دارد.
۳	به‌ندرت	نقص وجود دارد، اما به‌ندرت. تخطی جزئی و کوتاه‌مدت از استانداردهای زیست‌محیطی و تضمین زیاد از عدم خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات وجود دارد.
۴-۵-۶	متوسط (معمول)	احتمال وقوع بسیار محتمل است- تخطی موقت از محدوده استانداردهای محیط‌زیستی- احتمال خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات محتمل یا بسیار محتمل است.
۷-۸	مکرر	خرابی و شکست‌های مکرر پیش‌بینی می‌گردد- فرآیند همراه با تخطی مکرر از محدوده‌های استانداردهای زیست‌محیطی مشخصه‌سازی می‌شود- خرابی مکرر تجهیزات و ماشین‌آلات همراه با اثر بر محیط‌زیست رخ می‌دهد.
۹-۱۰	حتمی	وقوع شکست و خرابی اجتناب‌ناپذیر است- فرایند اغلب در سطحی صورت می‌گیرد که محدوده‌های استانداردهای محیط‌زیستی را نقض می‌کند- خرابی خیلی مکرر تجهیزات و ماشین‌آلات همراه با اثر بر محیط‌زیست.

احتمال کشف و شناسایی (Detection): احتمال این‌که بتوان پیامد، یا علل به وجود آورنده شکست و آلودگی ایجادشده را قبل از به وقوع پیوستن آن با استفاده از روش‌های شناسایی و کنترلی موجود تشخیص داد. به بیان‌دیگر، توانایی سیستم برای شناسایی علل و مکانیسم وقوع ریسک است. دستورالعمل طبقه‌بندی مؤلفه احتمال کشف و شناسایی به شرح جدول ۳ است.

جدول ۱- رتبه‌بندی مولفه احتمال کشف و شناسایی ریسک محیط‌زیستی (Roszak *et al.*, 2015)

امتیاز		شرح کشف و شناسایی
۲-۱	خیلی کم	نقص یا اختلال فرایند تقریباً به‌طور قطعی با اقدامات کنترلی و نظارت موجود ردیابی و شناسایی خواهد شد. پیش‌بینی خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات و محافظت از آن‌ها در برابر بروز ریسک محیط‌زیستی- پایداری فرآیند در محدوده پذیرفته‌شده استانداردهای زیست‌محیطی می‌ماند.
۴-۳	کم	اقدامات کنترلی مورداستفاده و نظارت، فرصتی مناسب برای تشخیص نقص در محصول یا اختلال در فرآیند طرح فراهم می‌کند- پیش‌بینی خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات و محافظت از آن‌ها در برابر بروز ریسک محیط‌زیستی - تشخیص عدم وجود پایداری فرایند مطابق استانداردهای پذیرفته‌شده و محدوده‌های زیست‌محیطی.
۶-۵	متوسط	اقدامات کنترلی مورداستفاده و نظارت، فرصتی مناسب برای تشخیص نقص در محصول یا اختلال در فرآیند طرح و پیش‌بینی شکست و خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات و حفاظت از آن‌ها در برابر بروز ریسک محیط‌زیستی را فراهم می‌کند؛ اما توانایی محدودی در کنترل ۱۰۰٪ دارند.
۸-۷	زیاد	بسیار محتمل است که اقدامات کنترل و نظارت، نقص یا اختلال در فرایند طرح را تشخیص ندهند. سیستم و اقدامات نظارتی قادر به پیش‌بینی شکست و خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات و حفاظت از آن‌ها در برابر بروز ریسک محیط‌زیستی نیستند.
۹	خیلی زیاد	با اطمینان بسیار زیاد می‌توان فرض کرد که اقدامات کنترلی اتخاذشده، نقص موجود در محصول یا اختلال فرایند را تشخیص نمی‌دهند. سیستم و اقدامات نظارتی مورداستفاده برای پیش‌بینی شکست و خرابی ماشین‌آلات و تجهیزات و محافظت از آن در برابر بروز ریسک محیط‌زیستی تا حد بسیار کمی امکان‌پذیر است.
۱۰	غیرممکن	هیچ روش و ابزار شناخته‌شده‌ای برای کنترل و نظارت بر تشخیص نقص محصول یا اختلال فرآیند وجود ندارد. هیچ‌گونه سیستم و اقدامات نظارتی برای پیش‌بینی خرابی ماشین‌ها و تجهیزات و محافظت از آن در برابر بروز ریسک محیط‌زیستی در دسترس نیست.

گام سوم: تعیین حد اطمینان و سطح ریسک‌های محیط‌زیستی: میزان ریسک تحت عنوان عدد اولویت ریسک (RPN7) از حاصل‌ضرب سه مؤلفه شدت اثر (S)، احتمال وقوع (O) و احتمال کشف (D) به دست می‌آید و حاصل نهایی محاسبات عددی بین ۱ و ۱۰۰۰ خواهد بود. بعد از به دست آوردن عدد اولویت ریسک برای مشخص کردن سطح ریسک‌ها، حد اطمینان (حد بالا و پایین ریسک) با استفاده از میانگین و انحراف معیار داده‌ها تعیین می‌گردد. میانگین حسابی داده‌ها با استفاده از رابطه ۱ به‌دست می‌آید:

(۱)

$$۱x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} xi = \frac{x1+x2+\cdots+xn}{N}$$

X = میانگین حسابی، N = تعداد داده، Xi = (RPN) داده‌ها

انحراف معیار داده‌ها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد:

(۲)

$$۲\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(xi-\bar{x})^2}$$

[7] Risk Priority Number

با استفاده از انحراف معیار، پخش‌شدگی مقادیر RPN محاسبه‌شده و μ حول مقدار میانگین حد پایین و حد بالای ریسک‌ها بر اساس رابطه ۳ به دست می‌آید.

(۳)

حد پایین ریسک $= \sigma - X$

حد متوسط ریسک $\sigma - X < RPN < \sigma + X =$

حد بالای ریسک $\sigma + X < RPN < 2\sigma + X =$

گام چهارم: ارائه اقدامات کنترلی/ اصلاحی جهت حذف یا کاهش ریسک‌ها: در این مرحله فهرستی از اقدامات اصلاحی جهت کاهش و یا مدیریت ریسک ارائه شد و سپس سه فاکتور شدت پیامد ریسک، احتمال وقوع و احتمال کشف پس از اقدامات اصلاحی امتیازدهی شدند و مقدار RPN برآورد گردید.

گام پنجم: ارزیابی ثانویه ریسک‌های محیط‌زیستی بعد از اقدامات اصلاحی و تعیین اولویت اجرای آن‌ها: روش EFMEA مبنای انتخاب اقدام اصلاحی بهینه را فراهم می‌کند. پس از شناسایی راهکارها جهت مدیریت یا کاهش سطح ریسک، سطح ریسک‌های باقیمانده مجدداً محاسبه می‌گردد. پس از تعیین درجه امکان‌سنجی اجرای اقدامات کنترلی و اصلاحی مطابق جدول ۴، جهت برآورد عدد اولویت ریسک، اختلاف RPN به دست آمده قبل و بعد از اقدام اصلاحی را بر درجه امکان سنجی تقسیم کرده تا عدد اولویت اقدام اصلاحی مشخص شود (رابطه ۴). هر چه عدد حاصل بزرگتر باشد اولویت مدیریت آن ریسک ارجح تر خواهد بود.

$$X = \frac{\Delta RPN}{F} \qquad (۴)$$

X: اولویت انجام اقدام اصلاحی، ΔRPN: اختلاف RPN قبل و بعد از انجام اصلاحات، F: درجه امکان سنجی

جدول ۴- رتبه‌بندی مولفه امکان‌سنجی اجرای اقدامات اصلاحی

رتبه (F)	شرح
۱۰	مشکل ایمنی- عدم مقررات دولتی- در دسترس نبودن منابع ضروری- هزینه و زوال زمان غیرقابل‌قبول- شانس موفقیت صفر- احتمال اثر نامطلوب ۱۰۰٪
۹	دسترسی بسیار سخت به منابع لازم- هزینه و زوال زمان تقریباً غیرقابل‌قبول- شانس موفقیت تقریباً صفر- احتمال اثر نامطلوب تقریباً ۱۰۰٪
۸	دسترسی سخت به منابع لازم- هزینه و زوال زمان حدوداً غیرقابل‌قبول-شانس موفقیت حدوداً صفر- احتمال اثر نامطلوب حدوداً ۱۰۰٪
۷	دسترسی بسیار کم به منابع لازم- هزینه و زوال زمان خیلی زیاد- شانس موفقیت خیلی کم- احتمال اثر نامطلوب خیلی زیاد
۶	دسترسی کم به منابع لازم- هزینه و زوال زمان زیاد- شانس موفقیت کم- احتمال اثر نامطلوب زیاد
۵	دسترسی نسبتاً کم به منابع لازم- هزینه و زوال زمان نسبتاً زیاد- شانس موفقیت نسبتاً کم- احتمال اثر نامطلوب نسبتاً زیاد
۴	دسترسی متوسط به منابع لازم- هزینه و زوال زمان متوسط- شانس موفقیت و احتمال اثر نامطلوب متوسط
۳	دسترسی نسبتاً زیاد به منابع لازم- هزینه و زوال زمان نسبتاً کم- شانس موفقیت نسبتاً زیاد و احتمال اثر نامطلوب نسبتاً کم
۲	دسترسی زیاد به منابع لازم- هزینه و زوال زمان کم- شانس موفقیت زیاد و احتمال اثر نامطلوب کم
۱	دسترسی کامل به منابع لازم- هزینه و زوال زمان خیلی کم- شانس موفقیت حدوداً ۱۰۰ و احتمال اثر نامطلوب حدوداً صفر

نتایج

شناسایی ریسک‌ها و خطرات محیط‌زیستی واحدهای مورد مطالعه: ریسک‌های محیط‌زیستی با توجه به شرح فرآیند واحدهای موردمطالعه، شناسایی شده‌اند. نتایج مربوط به ریسک‌های شناسایی‌شده در جدول ۶ ارائه شده است، پس از انجام ارزیابی اولیه ریسک‌های محیط‌زیستی باحدود اطمینان مطابق با جدول ۵ حاصل شد.

مشخصه سازی و ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی: نتایج ارزیابی اولیه و ثانویه ریسک‌های محیط‌زیستی ناشی از فعالیت واحدهای مورد مطالعه در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۵- تعیین حدود اطمینان ارزیابی ریسک محیط‌زیستی

سطوح ریسک	فاز بهره‌برداری	توضیحات
سطح ریسک کم/ عادی (LoW Risk)	RPN کمتر از ۲۴	نیاز به اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه احساس نمی‌شود.
سطح ریسک متوسط / نیمه بحرانی (Medium Risk)	۲۴<*RPN*<۷۴	ارائه اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه پیشنهاد می‌شود.
سطح ریسک زیاد/ بحرانی (High Risk)	۷۴<*RPN*<۱۰۰	ارائه اقدامات پیشگیرانه فوری و توقف عملیات تا حصول اطمینان از اجرای اقدامات ایمنی ضرورت دارد.

جدول ۶- نتایج ارزیابی اولیه و ثانویه ریسک‌های محیط زیستی واحدهای مورد مطالعه

فعالیت/فرآیند	جنبه‌های محیط‌زیستی (علل بروز ریسک)	موقعیت مکانی	پیامدهای بالقوه ریسک	ارزیابی اولیه جنبه‌های محیط‌زیستی				اقدام کنترلی/ اصلاحی	ارزیابی ثانویه جنبه‌های محیط‌زیستی				امکان سنجی اجرای اقدامات اصلاحی (F)	ΔRPN/ F	اولویت اقدام
				شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN) سطح ریسک موجود		شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN) سطح ریسک باقیمانده			
احتراق سوخت‌های فسیلی جهت تامین انرژی در دیگ بخار	۱- تولید دود ناشی از تولید گازهای حاصل از احتراق شامل: SO2، CO2 و... (درصورت استفاده از سوخت جایگزین مانند گازوئیل و یا مازوت مقدار این ذرات و احتمال وقوع آن بیشتراست)	دیگ‌بخار	آلودگی هوا و ایجاد غبار در محیط – گرمایش جهانی	۳	۳	۵	۴۵ سطح ریسک متوسط	۱-استفاده از فیلتراسیون جهت حذف ناخالصی‌ها و ذرات معلق موجود در دود ۲- حدالامکان استفاده از سوخت گاز و درصورت قطع گاز از گازوئیل استفاده شود و پیشبرد کارخانه به سمت استفاده از انرژی‌های پاک در آینده	۲	۲	۵	۲۰ سطح ریسک کم	۳	۸.۳	۸

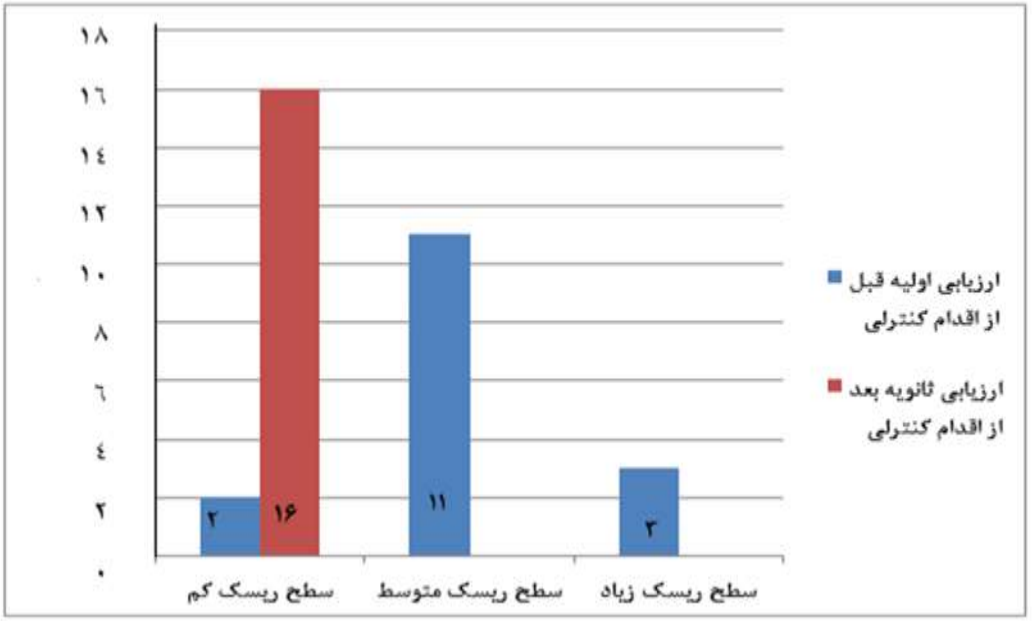
فعالیت/فرآیند	جنبه‌های محیط‌زیستی (علل بروز ریسک)	موقعیت مکانی	پیامدهای بالقوه ریسک	ارزیابی اولیه جنبه‌های محیط‌زیستی				اقدام کنترلی/ اصلاحی	ارزیابی ثانویه جنبه‌های محیط‌زیستی				امکان سنجی اجرای اقدامات اصلاحی (F)	ΔRPN/ F اولویت اقدام
				شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN) سطح ریسک موجود		شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN) سطح ریسک باقیمانده		
۱- عدم کارکرد صحیح مشعل نسبت وزنی سوخت در احتراق بیش از مقدار مجاز باشد (یعنی اکسیژن خالص اضافه‌ی در احتراق نسبت به حالت استوکیومتری واکنش سوخت و اکسیژن کمتر از حد مجاز باشد) ۲- وجود آب در داخل گازوئیل	انتشار بیش از حد CO یا دوده به دلیل احتراق ناقص گاز یا گازوئیل و مصرف بیشتر سوخت	دیگ‌بخار	آلودگی هوا ناشی از انتشارات CO	۳	۴	۵	۶۰ سطح ریسک متوسط	۱- پرکردن چک‌لیست‌های روزانه مربوط به رنگ شعله و رنگ دود ۲- تست هفتگی دود حاصل از احتراق با استفاده از آنالایزر سوخت ۳- محکم‌بستن درب مخزن گازوئیل (جهت جلوگیری از مخلوط شدن آب باران با گازوئیل در داخل مخزن گازوئیل) ۴- استفاده از روش‌ها نوین حذف co	۲	۳	۳	۱۸ سطح ریسک کم	۳	۱۴	۲
تنظیم نبودن مشعل و در نتیجه بهم خوردن نسبت وزنی سوخت و هوا در احتراق (به طوری که مقدار اکسیژن خالص اضافه در احتراق نسبت به حالت استوکیومتری واکنش سوخت و اکسیژن بیش ازحد مجاز باشد) به دلیل ۱- کثیف بودن فیلترهای مسیر سوخت و درنهایت گرفتگی فیلتر و بسته شدن مسیر سوخت ۲- باز بودن بیش از حد دمپرهای ورود هوا به مشعل	تولید NOx بیش از حد مجاز پایین آمدن راندمان احتراق و هدر رفت سوخت جهت گرم‌کردن هوای اضافه خروجی از دودکش	دیگ بخار	۱-آلودگی هوا ناشی از انتشارات (NOx) ۲- هدررفت سوخت	۳	۴	۴	۴۸ سطح ریسک متوسط	راهکار تشخیص: تشخیص چشمی رنگ دود (اگر رنگ دود سفید باشد نشانگر هوای بیش از حد مجاز در احتراق می‌باشد). اقدام کنترلی: ۱- پرکردن چک‌لیست‌های روزانه مربوط به رنگ شعله و رنگ دود ۲- انجام تنظیمات هوای ورود به مشعل توسط دمپرهای هوا ۳- استفاده از آنالایزر دود	۱	۲	۳	۶ سطح ریسک کم	۳	۱۴	۲
ایجاد لایه‌های گردوغبار و دود در جداره‌ی داخلی کوره و لوله‌های آتش‌خوار	کاهش انتقال حرارت از شعله به آب در دیگ‌بخار در نتیجه مصرف سوخت بیشتر جهت تولید بخار موردنیاز	دیگ‌بخار	افزایش آلودگی بیش از حد هوا - هدررفت انرژی	۲	۳	۵	۳۰ سطح ریسک متوسط	۱- محل وجود دیگ‌بخار عاری از گردوغبار باشد ۲- دودزدایی سالانه‌ی دیگ‌بخار ۳- نصب ترموکوبل متصل به آژیرخطر در مسیر دودکش	۲	۲	۲	۸ سطح ریسک کم	۳	۷.۳	۹

فعالیت/فرآیند	جنبه‌های محیط‌زیستی (علل بروز ریسک)	موقعیت مکانی	پیامدهای بالقوه ریسک	ارزیابی اولیه جنبه‌های محیط‌زیستی				اقدام کنترلی/ اصلاحی	ارزیابی ثانویه جنبه‌های محیط‌زیستی				امکان سنجی اجرای اقدامات اصلاحی (F)	ΔRPN/ F	اولویت اقدام
				شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN) سطح ریسک موجود		شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN) سطح ریسک باقیمانده			
ایجاد رسوب در دیگ‌بخار (رسوب حاصل از سختی آب)	۱- نیاز دیگ‌بخار به صرف انرژی و سوخت بیشتر جهت تولید بخار مورد نیاز ۲- افزایش تولید آلاینده‌ها	دیگ‌بخار	۱- هدر رفت سوخت، ۲- افزایش آلودگی هوا	۵	۴	۵	۱۰۰ سطح ریسک زیاد	راهکار تشخیص: تست روزانه‌ی سختی آب و نصب ترموکوپل متصل به آژیرخطر در مسیر دودکش اقدام کنترلی: ۱- احیای ستون‌های سختی‌گیر کاتیونی ۲- استفاده از سیستم RO جهت کاهش TDS آب ورودی به دیگ‌بخار ۳- بازدید سالانه‌ی مقدار رسوب حاصل از سختی آب بر روی سطوح انتقال حرارت و در صورت وجود رسوب رفع نمودن آن توسط شرکت‌های متخصص	۲	۲	۳	۱۲ سطح ریسک کم	۶	۱۴۶	۱
افزایش TDS در دیگ‌بخار به علت تولید مداوم بخار و افزایش تدریجی مقدار TDS در آب دیگ‌بخار	مشکل‌شدن انتقال حرارت بین لوله‌های آتش‌خوار و آب موجود در دیگ‌بخار	دیگ‌بخار	افزایش آلودگی بیش از حد هوا - هدر رفت انرژی	۴	۵	۴	۶۰ سطح ریسک کم	انتقال TDS موجود در دیگ‌بخار به خارج از دیگ‌بخار توسط فرآیند بلودان، استفاده از سیستم RO جهت کاهش TDS دیگ‌بخار	۲	۲	۲	۸ سطح ریسک کم	۶	۸۶	۷
فلش‌شدن کندانس (تبدیل فاز مایع به بخار)	از دسترس خارج‌شدن بخار حاصل از کندانس	مخزن کندانس	هدر رفت آب و انرژی گرمایی توسط کندانس	۴	۱۰	۲	۸۰ سطح ریسک زیاد	کندانس بایستی توسط لوله و نازل به کف آب داخل مخزن کندانس هدایت شود جهت جلوگیری از تشکیل فاز بخار و هدر رفت آب و انرژی گرمایی	۲	۳	۲	۱۲ سطح ریسک کم	۶	۱۱.۳	۳
انحراف مسیر زیرآب خروجی از دیگ‌بخار در مسیر تا ورود آن به استخر بتنی دیگ‌بخار	ورود زیرآب به محیط	مسیر انتقال زیرآب	آلودگی خاک	۴	۴	۲	۳۲ سطح ریسک	لایروبی مسیر انتقال زیرآب – بازرسی	۳	۳	۲	۱۸ سطح ریسک کم	۳	۴۶	۱۲

فعالیت/فرآیند	جنبه‌های محیط‌زیستی (علل بروز ریسک)	موقعیت مکانی	پیامدهای بالقوه ریسک	ارزیابی اولیه جنبه‌های محیط‌زیستی				اقدام کنترلی/ اصلاحی	ارزیابی ثانویه جنبه‌های محیط‌زیستی				امکان سنجی اجرای اقدامات اصلاحی (F)	ΔRPN/ F اولویت اقدام
				شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN) سطح ریسک موجود		شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN) سطح ریسک باقیمانده		
نشت سوخت مایع از مخازن زمینی (به دلیل مسائل ایمنی مخازن سوخت بایستی از حالت کنونی به حالت دفنی تغییر یابد)	ورود گازوئیل به خاک	مخازن ذخیره سوخت جایگزین	آلودگی خاک	۳	۳	۶	۵۴ سطح ریسک متوسط	آب‌بندی شیرآلات و انجام عایق رطوبتی بر روی جداره‌ی خارجی مخازن فلزی با استفاده از لایه‌های قیرگونی و استفاده از دیپ (نوعی میله‌ی مدرج اندازه‌گیری) به صورت هفتگی و ثبت و مقایسه سوخت	۲	۲	۳	۱۲ سطح ریسک کم	۳	۱۴	۲
مسدودشدن مسیر انتقال پساب از خمیرسازی به تصفیه‌خانه	سرریزشدن پساب از مسیرخود و ورود آن به خاک	مسیر انتقال پساب از خمیرسازی به	آلودگی خاک	۵	۳	۲	۳۰ سطح ریسک متوسط	لایروبی مسیر انتقال پساب و بازرسی دوره‌ای	۲	۲	۲	۸ سطح ریسک کم	۲	۱۱	۴
ورود پساب خط تولید و خمیرسازی قبل از انجام عملیات تصفیه به استخرخاکی جهت ته‌نشینی اولیه	ورود الاینده‌ها به خاک و آب زیرزمینی	خط تولید- خمیرسازی	آلودگی خاک	۶	۸	۲	۹۶ سطح ریسک زیاد	تغییر سیستم تصفیه کنونی و حذف استخرهای خاکی از روند تصفیه پساب	۲	۳	۲	۱۲ سطح ریسک کم	۹	۹.۳	۶
			آلودگی آب زیرزمینی	۵	۵	۲	۵۰ سطح ریسک متوسط		۱	۲	۲	۴ سطح ریسک کم	۹	۵.۱	۱۱
مسدودشدن مسیر انتقال پساب از خط‌تولید به تصفیه‌خانه	ورود پساب به محیط	مسیر انتقال پساب از خط‌تولید به تصفیه‌خانه	آلودگی خاک	۵	۳	۲	۳۰ سطح ریسک متوسط	لایروبی مسیر انتقال پساب – بازرسی دوره‌ای	۲	۲	۲	۸ سطح ریسک کم	۳	۷.۳	۹
خرابی دستگاه اسکرو	تلنبارشدن پسماندها و ورود شیرابه حاصل از آن به محیط	دستگاه اسکرو	آلودگی خاک	۲	۳	۲	۱۲ سطح ریسک کم	بازرسی دوره‌ای و نگهداری- رفع نواقص آن به صورت فوری	۲			۴ سطح ریسک کم	۲	۴	۱۳
خرابی دستگاه پرس	تلنبارشدن پسماندها و نشت پشیرابه از آن	محل دپوی پسماند	آلودگی خاک	۳	۴	۲	۲۴ سطح ریسک کم	بازرسی دوره‌ای دستگاه پرس و رفع نواقص آن به صورت فوری	۲	۳	۲	۱۲ سطح ریسک کم	۲	۶	۱۰

فعالیت/فرآیند	جنبه‌های محیط‌زیستی (علل بروز ریسک)	موقعیت مکانی	پیامدهای بالقوه ریسک	ارزیابی اولیه جنبه‌های محیط‌زیستی					اقدام کنترلی/ اصلاحی	ارزیابی ثانویه جنبه‌های محیط‌زیستی					امکان سنجی اجرای اقدامات اصلاحی (F)	ΔRPN/ F	اولویت اقدام
				شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN)	سطح ریسک موجود		شدت	احتمال وقوع	احتمال کشف	(RPN)	سطح ریسک باقیمانده			
نشت شیرآبه از پسماندها	تجمع شیرابه	محل دپوی پسماند	آلودگی خاک	۴	۵	۲	۴۰	سطح ریسک‌متوسط	ساخت بستر ژئومبرینگ به‌جای چاله‌ی خاکی	۲	۲	۲	۸	سطح ریسک کم	۳	۱۰۶	۵

نتایج حاصل از ارزیابی ریسک محیط‌زیستی واحدهای دیگ‌بخار، خمیرسازی و خط‌تولید با روش EFMEA: در ارزیابی اولیه انجام شده، بنا بر نتایج به دست آمده، تعداد ۱۶ ریسک محیط‌زیستی با روش EFMEA مورد شناسایی قرار گرفت که ۳ مورد در سطح ریسک با شدت بالا، ۱۱ مورد در سطح ریسک با شدت متوسط و ۲ مورد در سطح ریسک با شدت کم بودند. با اجرای اقدامات اصلاحی، در ارزیابی ثانویه تمامی این ریسک‌ها به سطح ریسک با شدت کم تغییر نمودند (شکل۳). مولفه‌ی امکان‌سنجی اجرای اقدامات اصلاحی نیز براساس جدول ۴ برآورد شد. از تقسیم تغییرات عدد اولویت ریسک بر مولفه امکان‌سنجی ریسک، اولویت اجرای اقدامات اصلاحی حاصل گردید، به طوری که هر چه عدد به دست آمده بزرگتر باشد اجرای اقدام کنترلی یا اصلاحی نسبت به سایر اقدامات در اولویت مدیریت ریسک قرار دارد و بدین ترتیب بامشخص شدن اولویت مدیریت ریسک‌ها، امکان طرح سناریوهای عملیاتی متناسب با هر یک از این استراتژی‌ها و اجرای آن‌ها بر اساس دستورالعمل مدیریت بحران حاصل خواهد شد.



شکل ۳- نمودار فراوانی ریسک‌های محیط‌زیستی واحدهای مورد مطالعه

بحث

جهت ارزیابی و مدیریت ریسک، تکنیک‌های متعددی معرفی شده است، که هرکدام از آن‌ها با توانمندی‌ها و محدودیت‌های خاص خود، به فرآیند شناسایی خطرات و ارزیابی اثرات آن‌ها می‌پردازند. در این میان، E-FMEA، به عنوان روشی سامانمند، جهت تجزیه‌وتحلیل خطرات سیستم‌ها در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از شناسایی ریسک‌ها، با توجه به علل ریشه‌ای و پیامد بالقوه شناسایی شده، راهکارها و اقدامات پاسخ به سطح ریسک‌های شناسایی شده در قالب استراتژی حذف منشأ، انتقال، کاهش پیامد و کاهش احتمال وقوع ارائه شده است. برای ریسک‌های موجود در این مطالعه سه ناحیه سطح ریسک زیاد، متوسط و کم در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که بالاترین سطح ریسک محیط‌زیستی مربوط به ایجاد رسوب در دیگ بخار است. علت این مشکل به کنترل ناکافی سختی آب ورودی و احتمالاً عدم کارایی مطلوب سیستم‌های سختی‌گیر کنونی باز می‌گردد. تجمع رسوبات نه تنها راندمان انتقال حرارت دیگ را کاهش داده و مصرف سوخت و هزینه‌های عملیاتی را بالا می‌برد، بلکه با افزایش انتشار آلاینده‌های هوا، پیامدهای مخرب محیط زیستی جدی نیز به دنبال دارد. راهکارهای پیشنهادی، از جمله پایش روزانه سختی آب و نصب ترموکوپل متصل به آژیر خطر در مسیر دودکش، به تشخیص زودهنگام این مشکل کمک می‌کنند. اقدامات اصلاحی مانند احیای دوره‌ای ستون‌های سختی‌گیر کاتیونی، استفاده از سیستم اسمز معکوس (RO) برای کاهش TDS آب ورودی و رسوب‌زدایی سالانه توسط متخصصین، منجر به رفع این ریسک خواهند شد. فلش‌شدن کندانس و آلودگی خاک ناشی از ورود پساب خط تولید و خمیرسازی به استخرهای خاکی قبل از تصفیه کامل نیز از ریسک‌های اصلی و دارای اولویت بالا در این کارخانه بودند. فلش‌شدن کندانس، که به دلیل اختلاف فشار و دمای نامناسب در خطوط بازگشت و طراحی ضعیف سیستم مخزن کندانس رخ می‌دهد، منجر به هدررفت قابل توجه انرژی گرمایی و آب می‌شود. آلودگی خاک نیز مربوط به استفاده از روش‌های تصفیه سنتی و ناکارآمد استخرهای خاکی دارد که خطر نشت آلاینده‌ها به خاک و آب‌های زیرزمینی را به همراه دارد. این چالش‌ها نیازمند بازنگری اساسی در زیرساخت‌های فرآیندی و سیستم تصفیه پساب هستند. در مقایسه، ریسک‌هایی نظیر خرابی دستگاه اسکرو که باعث تلنبار شدن پسماند و شیرابه می‌شود و نیز آلودگی صوتی و هدررفت منابع آبی (با توجه به رویکرد بازچرخانی پساب)، در سطح پایین‌تری از اولویت مدیریت ریسک قرار گرفتند. این موضوع نشان می‌دهد که در این کارخانه، برخی جنبه‌های مدیریت پسماند جامد، آلودگی صوتی و بازچرخانی آب به خوبی کنترل می‌شوند. ریسک‌های شناسایی‌شده در این مطالعه، به طور خاص با ویژگی‌های فرآیندی صنعت کاغذ و خمیرکاغذ و سایر مطالعات انجام شده در این زمینه مرتبط هستند، این صنعت به شدت آب‌بر است و حجم قابل توجهی پساب حاوی مواد آلی، لیگنین، ترکیبات کلردار و فلزات سنگین تولید می‌کند. ریسک‌هایی مانند آلودگی خاک ناشی از پساب و نیاز به سیستم‌های تصفیه پیشرفته، نشان‌دهنده چالش‌های منحصربه‌فرد این صنعت در مدیریت منابع آبی و جلوگیری از آلودگی هستند (Ince *et al*, 2011; Jaworska *et al*., 2020). علاوه بر این فرآیندهایی مانند تولید بخار در دیگ‌ها، انرژی‌بر هستند (Kong *et al*., 2016). ریسک ایجاد رسوب در دیگ بخار نه تنها کارایی را کاهش می‌دهد، بلکه به طور مستقیم به انتشار بیشتر آلاینده‌های هوا و گازهای گلخانه‌ای (SO_x, NO_x, CO_2) می‌انجامد که یک چالش کلیدی در صنعت کاغذ محسوب می‌شود (Martin *et al*., 2000; Sun *et al*., 2018). تولید پسماندهای خمیری و لجن‌های سلولزی از دیگر ویژگی‌های این صنعت است که نیازمند راهکارهای نوآورانه برای بازیافت یا دفع ایمن آن‌هاست (Turner *et al*., 2022). پسماند خمیری تولیدی در کارخانه، مورد استفاده مجدد (در کارخانه‌های تولیدکننده‌ی شانه‌تخم‌مرغ) قرارمی‌گیرد، از این رو پسماند خمیری در این کارخانه تهدیدی برای محیط‌زیست ایجاد نخواهد کرد. مقایسه وضعیت کارخانه مورد مطالعه با صنایع مشابه در خارج کشورنشان می‌دهد، کارخانه مورد مطالعه در برخی زمینه‌ها نیازمند ارتقاء است. به عنوان مثال، استفاده از استخرهای خاکی برای تصفیه اولیه پساب یک روش نسبتاً سنتی است که ریسک بالای نشت آلاینده‌ها به خاک و آب‌های زیرزمینی را به همراه دارد. در حالی که

در بسیاری از کشورهای پیشرفته، سیستم‌های تصفیه بیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی پیشرفته‌تر و کارآمدتر (مانند MBR, UASB, Fenton) به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند که کارایی بالاتری در حذف آلاینده‌ها و ردپای محیط‌زیستی کمتری دارند (Cheremisinoff, 2018; Alvarenga *et al.*, 2019). همچنین، در زمینه مدیریت رسوب دیگ بخار، سیستم‌های پایش آنلاین و اتوماتیک پیشرفته و نرم‌افزارهای بهینه‌سازی می‌توانند کارایی را به مراتب افزایش دهند (Grotzner *et al.*, 2018). با این حال، استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده و بازیافت پسماندهای خمیری در این کارخانه، نشان‌دهنده حرکت در مسیر پایداری است که با رویکردهای نوین همخوانی دارد (Simao *et al.*, 2018; Gupta *et al.*, 2020). این مقایسه نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌ها، هنوز فرصت‌های زیادی برای ارتقاء فناوری و رویه‌های محیط‌زیستی در صنایع داخلی وجود دارد.

براساس تحلیل نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که تمامی ریسک‌های محیط‌زیستی شناسایی شده در کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا، با طرح‌ریزی و اجرای دقیق اقدامات کنترلی و اصلاحی پیشنهادی، به سطح ریسک کم یا ریسک قابل قبول خواهد رسید. این نتیجه با مطالعات مشابه در صنعت کاغذسازی (Dixit *et al.*, 2019؛Arun & myPalannisa, 2018) و همچنین سایر صنایع (Ahmadi & Rasoulzadeh, 2015; Ghaderi *et al.*, 2015; Jozi *et al.*, 2011) هم‌راستا است و تأکید می‌کند که طراحی و اجرای راهکارهای کنترلی نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش ریسک‌های محیط زیستی دارد. با توجه به نتایج این تحقیق، مهم‌ترین اقدامات پیشنهادی شامل: بهبود فرآیند تصفیه پساب صنعتی با استفاده از فناوری‌های پیشرفته، کنترل نشر آلاینده‌های هوا از طریق سیستم پایش آنلاین و نصب فیلترهای کارآمد، توجه به بهینه‌سازی مصرف انرژی، و آموزش کارکنان در زمینه مدیریت پسماند و اقدامات اضطراری محیط‌زیستی است که می‌تواند منجر به کاهش سطوح ریسک شود. در ادامه مسیر مدیریت ریسک، پس از اولویت‌بندی و انتخاب استراتژی‌های مناسب برای هر ریسک، تدوین سناریوهای عملیاتی و اجرای برنامه‌های مدیریت بحران ضروری خواهد بود. استفاده از رویکرد E-FMEA در این پژوهش، مدلی ساختاریافته و قابل‌اتکا برای شناسایی، ارزیابی و مدیریت ریسک‌های محیط‌زیستی ارائه داد که می‌تواند به‌عنوان یک الگوی عملی برای سایر صنایع کاغذسازی یا صنایع مشابه به‌کار گرفته شود.

در راستای توسعه تحقیقات آینده، می‌توان به طراحی نسخه بومی‌شده E-FMEA برای صنایع مختلف با در نظر گرفتن ویژگی‌های فرایندی، فنی، محیط‌زیستی یا الزامات قانونی خاص هر صنعت پرداخت. همچنین بررسی تطبیقی اثربخشی E-FMEA در مقایسه با سایر روش‌های مدیریت ریسک از جمله FTA، HAZOP و ETA می‌تواند به توسعه یک رویکرد ترکیبی و جامع برای مدیریت ریسک‌های محیط‌زیستی منجر شود.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر افرا مدیریت محترم کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا که زمینه و بستر این پژوهش را مهیا نمودند و همچنین جناب آقای مهندس کیانی کارشناس محترم واحد HSE کارخانه کاغذسازی گلستان پرشیا، به دلیل همراهی ارزنده ایشان صمیمانه تشکر می‌نماییم.

منابع

1. **Ahmadi, A. and Rasoulzadeh, Y., 2015.** Risk assessment of grass cutting tools and equipment using the PHA method. National Conference on Occupational Health and Safety.
2. **Ali Mohammadloo, M., Shaker, S., Mirghaderi, S.H., Bab Al-Hawaeji, M. and Ghorbani, M.J., 2011.** Developing a Strategic Health, Safety and Environment Plan (Case Study: Ports and Maritime Organization). Strategic Management Studies, 2(8): 61-82.
3. **Alvarenga, P., Rodrigues, D., Mourinha, C., Palma, P., De Varennes, A., Cruz, N., ... and Rodrigues, S., 2019.** Use of wastes from the pulp and paper industry for the remediation of soils degraded by mining activities: Chemical, biochemical and ecotoxicological effects. Science of the Total Environment, 686, 1152-1163.

4. **Arun, N. and Palanisamy., 2019.** Risk Assessment and Hazard Evaluation for Paper Industries. International Journal of Engineering and Techniques.
5. **Bandarja, M. and Jozi, S.A., 2013.** Health, safety and environmental risk assessment of the hydrocracker unit of Bandar Abbas Oil Refining Company using EFMEA method. Environment, 39(4(68)): 105-124.
6. **Belji-Kangarloo, M., Naebi-Taheri, M., Dehdashti, A., Fatemi, F. and Basharatzadeh, A., 2021.** Risk assessment of occupational health and safety hazards using the occupational safety analysis method: a case study of the steel industry. Preventive Medicine, 8(4): 25-35
7. **Blivband, Z., Grabov, P. and Nakar, O., 2004.** Expanded fmea (efmea). In Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004-RAMS (pp. 31-36). IEEE.
8. **Cheremisinoff, P., 2018.** Air pollution control and design for industry. Routledge.
9. **Dixit, M., Gupta, GK., Liu, H. and Shukia, P., 2019.** Pulp and Paper Industry based Pollutants, their Health Hazards and Environmental Risks, Journal Pre-proof.
10. **Domínguez, R., Gomez, C. and Cerezo, O., 2021.** Risk Analysis based on ETA, FTA and Bowtie methodologies for the bulk coal discharge process. In Advances in Safety Management and Human Performance: Proceedings of the AHFE 2021 Virtual Conferences on Safety Management and Human Factors, and Human Error, Reliability, Resilience, and Performance, July 25-29, 2021, USA (pp. 193-199). Springer International Publishing.
11. **Ehrampoosh, M., Halvani, G., Ghaneian, M., Dehghani, A., Shafiei, M. and Arani, M., 2017.** Identifying environmental hazards of Kavir Steel hot rolling industry equipment using the What if method and assessing its risk using the William Fine method. Specialized Scientific Quarterly Journal of Occupational Medicine, 9(1): 84-95.
12. **Ghaderi, S., Rahimi, A., Hedayatifar, M. and Arabnajafi, S.M., 2015.** Environmental Risk Assessment and Management of Tehran Metro and Suburbs Using EFMEA Method (Case Study: Sadeghieh Terminal). Environmental Science and Technology, 17(2(Issue 65)): 61-71.
13. **Grötzner, M., Melchiors, E., Schroeder, L.H., dos Santos, A.R., Moscon, K.G., de Andrade, M.A., ... and Xavier, C.R., 2018.** Pulp and paper mill effluent treated by combining coagulation-flocculation-sedimentation and Fenton processes. Water, Air, & Soil Pollution, 229, 1-7.
14. **Gupta, G.K. and Shukla, P., 2020.** Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: challenges, perspectives and innovations. Bioresource technology, 297, 122496.
15. **Hemmatinia, S., Rezaian, S. and Jozi, A., 2020.** Environmental risk assessment of development projects of the Urban Services Department of District 19 of Tehran Municipality using the localized EFMEA method. Journal of Sustainability, Development and Environment, 3(2): 69-82.
16. **Ince, B.K., Cetecioglu, Z. and Ince, O., 2011.** Pollution prevention in the pulp and paper industries. Environmental Management in Practice, 5, 224-246.
17. **Jaworska, H., Matuszczak, K. and Różański, S., 2020.** Impact of pulp and paper industry on the content of selected elements in soils and plants. Catena, 193, 104579.
18. **Jozi, S.A., Gliji, N. and Mohammadfam, A., 2011.** Environmental risk assessment and management of the polyethylene unit of Ariasassol Polymer Company using EFMEA method. Natural Resources Sciences and Technologies, 6(4): 147-159.
19. **Jozi, S.A., Hosseini, S.M. and Tabib Shushtari, M., 2010.** Environmental risk assessment of the Balaroud Dam in Khuzestan during the construction phase using the Analytical Hierarchy Process (AHP). Marine Science and Technology Research, 5(1): 71-88.
20. **Kahmark, K.A. and Unwin, J.P., 1999.** Pulp and paper effluent management. Water environment research, 71(5), 836-852.
21. **Khairkhah, J. and Amiri, M., 2019.** Environmental risk assessment of the Songun copper mine tailings dam using the EFMEA method. Geography and Environmental Hazards, 8(32): 173-189.
22. **Kong, L., Hasanbeigi, A. and Price, L., 2016.** Assessment of emerging energy-efficiency technologies for the pulp and paper industry: a technical review. Journal of Cleaner Production, 122, 5-28.
23. **Laribaghal, M., Haghighifard, N. and Rafiei, M., 2011.** Application of FMEA in Environmental Risk Assessment: The

Case of Dredging of Imam Khomeini Port Piers. Quarterly Scientific-Research Journal of Wetlands/ Islamic Azad University, Ahvaz Branch, 3(9): 3-14.

24. **Mangla, S.K., Kumar, P. and Barua, M.K., 2016.** An integrated methodology of FTA and fuzzy AHP for risk assessment in green supply chain. International Journal of Operational Research, 25(1), 77-99.
25. **Martin, N., Anglani, N., Einstein, D., Khrushch, M., Worrell, E. and Price, L.K., 2000.** Opportunities to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions in the US pulp and paper industry.
26. **Moghadami, S., Abedinzadeh, N., Khommami, M., 2015.** Prioritizing the environmental risk assessment of the construction of the Anzali Free Zone wharf using Analytic Hierarchy Process and topsis Journal of Environmental Science and Engineering, 2(2): 35-44.
27. **Molavivardanjani, R.A., Rafati, M. and Zaimdar, M., 2020.** Performance evaluation of health, safety and environmental management system in Pegah Shahr-e-Kord powdered milk factory using balanced scorecard approach. Environmental Science and Technology, 22(9(100)): 115-125**.**
28. **Pourmirza, S.A., Bahrami, S. and Eidi, H., 2020.** Investigating factors affecting the improvement of health, safety and environmental culture in sports venues. Environmental Education and Sustainable Development, 9(2): 83-96**.**
29. **Qi, Z., Wang, H., Zhao, X. and Chen, J., 2020. April.** The occupational hazard risk assessment method based on PHA and risk matrix. In 2020 International Conference on Urban Engineering and Management Science (ICUEMS) (pp. 684-687). IEEE.
30. **Roszak, M., Spilka, M. and Kania, A., 2015.** Environmental failure mode and effects analysis (FMEA)–a new approach to methodology. Metalurgija, 54(2), pp.449-451.
31. **Simão, L., Hotza, D., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J.A. and Montedo, O.R.K., 2018.** Wastes from pulp and paper mills-a review of generation and recycling alternatives. Cerâmica, 64, 443-453.
32. **Sun, M., Wang, Y., Shi, L. and Klemeš, J.J., 2018.** Uncovering energy use, carbon emissions and environmental burdens of pulp and paper industry: A systematic review and meta-analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 92, 823-833.
33. **Turner, T., Wheeler, R. and Oliver, I.W., 2022.** Evaluating land application of pulp and paper mill sludge: A review. Journal of Environmental Management, 317, 115439.
34. **Zhamtekhkash, F., Kiani Sadr, M. and Cheraghi, M., 2022.** Environmental Risk Assessment of Steel Factory Using ANP and TOPSIS Methods (Case Study: Vian Steel Factory, Hamadan). Environmental Science and Technology, 24(3 (118th Consecutive Issue): 157-169.

2026, The Author(s). Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Environment & Interdisciplinary Development
Journal homepage: https://www.envjournal.ir

Environmental Risks Assessment and Management of Process Units in Paper Industry Using, E-FMEA Approach (Case Study: Persia Golestan Paper Factory)

Sara Drabi [1], Sepideh Saeidi [*1], Seyedhamed Mirkarimi [1]

1[*] -Department of Environmental Sciences, Faculty of Fisheries and Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Original Article

Received: 2025.04.25

Accepted: 2025.07.17

Keywords:
Risk Assessment,
Environmental Risk,
Pulp and Paper Industry,
EFMEA,
Crisis Management

Abstract

Introduction: Industrial development is the result of changes in methods and development of new machines that have been created in order to provide the needs of human societies, failure to impact assessment of these issues can leads to serious risks for humans and environment. Therefore, it is necessary and essential to achieve management and purposeful tool that accurately identifies and effectively controls potential and actual threats to health, safety, and the environment. Among various industries, the pulp and paper industry are a growing industry due to the high per capita production of paper to provide the needs of society and has been identified as the sixth most polluting industry in the world. In addition to environmental impacts, this industry may pose many risks to the workforce that are working in it, which has led to greater attention to the issue of health-safety and especially environmental risk assessment. Therefore, it is necessary to identify the risks that threaten human resources and the environment and to propose solutions to reduce these risks to this industry.

Material and Methods: In this study, the EFMEA (Environmental Failure Mode and Effects Analysis) method, which is an efficient method of the environmental risk assessment, was used to identify and assess the environmental risks of the Golestan Persia Paper Company. Initially, the risks of process units (including the pulping unit, production line, and steam boiler unit) were identified. In the next step, the impacts of the identified risks were evaluated using the components of consequence severity, probability of occurrence, and probability of detection and identification. After determining the confidence limit, environmental risks were classified and finally control/corrective measures were proposed to eliminate or reduce the risks. In the final step, a secondary assessment of environmental risks was conducted after corrective actions, and the priority of implementing the corrective measures was determined according to the degree of feasibility.

* Corresponding Author's email: s.saeidi@gau.ac.ir

Results: Of the 16 environmental risks identified, 3 were at high risk level, 11 at medium risk level, and 2 at low risk level. The highest risk level is related to the formation of sediment in the steam boiler, which leads to higher fuel consumption and air pollution. soil contamination resulting from the entry of wastewater from the production line and pulping unit into a soil pond for sedimentation before treatment is performed as well as Condensate flashing (conversion of the liquid phase to vapor) are also considered to be other major risks of the plant under study. By providing corrective solutions, all risks were reduced to a low-severity risk level.

Discussion: The results of the present study and a review of similar research conducted in different industries showed that conducting risk assessment studies and providing corrective actions can significantly reduce risk levels. Combining of the methods of health, safety, and environmental risk assessment by systematizing the process of identifying aspects can increase the accuracy and precision of risk assessment results. And finally, the identified solutions can be used in the form of risk management guidelines in the study area. After identifying solutions and adopting the desired strategy to control each of the risks, it will be possible to design operational scenarios appropriate to each of these strategies and in accordance with the crisis management guidelines.