

Research Paper

مقاله پژوهشی

**Risk Assessment for Gas Chlorination Units
of Water and Wastewater Treatment with
FMEA Method**

**ارزیابی ریسک در واحدهای کلرزنی تصفیه آب و
فاضلاب به روش FMEA**

Hanie Mohsenzade^{1,2}, Hesam Razmara², Ali Dashti^{*1,2}, Hadi Roosta^{1,2}, Hadi Nakhaee Fadafan³, Samaneh Tavakoli Aminian⁴, Masoud Rouhbakhsh⁴ and Ali Fazaeli Torabi³

حانیه محسن‌زاده^{۱,۲}، حسام رزم‌آرا^۲، علی دشتی^{۱,۲*}، هادی روستا^{۱,۲}، هادی نخعی فدافان^۳، ثمانه توکلی امینیان^۴، مسعود روحبخش^۴ و علی فاضالی ترابی^۳

1- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

۱- گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

2- Research Laboratory of Polymer Testing (RPT Lab.), Research Institute of Oil and Gas, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

۲- آزمایشگاه تحقیقاتی آزمون‌های قطعات پلیمری، پژوهشکده نفت و گاز، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

3- Mashhad Water and Wastewater Company, Chlorination Office, Mashhad, Iran.

۳- اداره کلرزنی، شرکت آب و فاضلاب مشهد، مشهد، ایران.

4- Mashhad Water and Wastewater Company, Research Office, Mashhad, Iran.

۴- دفتر تحقیقات، شرکت آب و فاضلاب مشهد، مشهد، ایران.

* Corresponding author, Email: dashti@um.ac.ir

* نویسنده مسئول، ایمیل: dashti@um.ac.ir

Received: 27/02/2020

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۸

Revised: 10/08/2020

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۵/۲۰

Accepted: 10/08/2020

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۰

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

In the present paper, based on case study, risk measurement using failure mode effects analysis (FMEA¹) methodology was performed in 4 chosen water and wastewater treatment plants in Mashhad. In this method, first the chlorination units were categorized to 6 classes including cylinders storage, chlorination room, gas cylinders, transportation of chlorine gas, joints of chlorination equipment, and educational systems of employee and management. The different potential modes of failures of these water and wastewater treatment units were listed and the severity rating, occurrence rating, and detectability rating were determined with interviewing the experts. According to these, risk priority number was calculated and the risk of mode of failure was prioritized in the parts of the water and wastewater treatment plants. The results indicate that in general, the first priorities corresponded to the risks in terms of electrical and transportation; and using standard equipment and appropriate means of transport were suggested.

در این پژوهش ارزیابی ریسک با روش بررسی حالات بالقوه خرابی و خطر و تحلیل اثرات ناشی از آن (FMEA^۱) در واحدهای کلرزنی ۴ تصفیه‌خانه منتخب در مشهد انجام گرفت. در این روش ابتدا واحدهای سیستم کلرزنی به ۶ زیرمجموعه شامل انبار سیلندرهای گاز کلر، اتاق کلرزنی، سیلندرهای گاز، حمل و نقل سیلندرهای گاز کلر، اتصالات کلرزنی‌های گازی و کارکنان، سیستم آموزشی و مدیریتی واحدهای کلرزنی، دسته‌بندی شدند. سپس، خطرات بالقوه در تصفیه‌خانه‌های منتخب، لیست شد و مقادیر شدت خرابی و خطر، احتمال وقوع خرابی و خطر و نیز قابلیت شناسایی خطر از طریق مصاحبه با متخصصان مشخص شد. پس از آن، مقادیر عدد اولویت ریسک محاسبه شد که براساس آن امکان اولویت‌بندی خطرات در هر حوزه از تصفیه‌خانه‌های منتخب فراهم شد. نتایج نشان دادند به‌صورت کلی خطرات بالقوه با اولویت نخست بیشتر مربوط به سیستم‌های الکتریکی و در بخش حمل و نقل است و استفاده از تجهیزات استاندارد و حمل و نقل با استفاده از وسایل نقلیه مناسب برای کاهش ریسک این خطرات پیشنهاد شد.

Keywords: Chlorination, FMEA, Risk Analysis, Risk Priority Number, Water and Wastewater Treatment.

واژه‌های کلیدی: تصفیه‌خانه آب و فاضلاب، کلرزنی، ارزیابی ریسک، FMEA، عدد اولویت ریسک.

می‌کرد. بعد از آن، FMEA در صنایع دفاعی و هوافضا مورد استفاده قرار گرفت، به طوری که در دهه ۱۹۶۰ استفاده از این روش در ساخت سفینه آپولو توسط ناسا و در دهه ۱۹۷۰ مؤسسات اتمی مورد توجه قرار گرفت و از سال ۱۹۷۶ در صنایع خودروسازی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، از سال ۱۹۹۲ یک استاندارد مرجع از FMEA در صنعت خودروسازی معرفی شد (Dhillon, 1992). مهم‌ترین اهداف FMEA شامل شناسایی کردن و اولویت‌بندی حالات بالقوه خرابی و خطر، انجام راه‌کارها و اقداماتی برای حذف و یا کاهش میزان وقوع حالات بالقوه خرابی و خطر و مطالعه و ثبت نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها برای حل مشکلات و از بین بردن خطرات است (Gheibi et al., 2019). بر این اساس، در این مطالعه خطرات مجموعه ۴ واحد منتخب کلرزی شرکت آب و فاضلاب مشهد از طریق روش FMEA ارزیابی و تحلیل شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- بررسی موردی (تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه)

شناسایی، تحلیل و ارزیابی خطرات در مجموعه تصفیه‌خانه‌های شرکت آب و فاضلاب مشهد شامل تصفیه‌خانه‌های منتخب ۱ الی ۴ انجام گرفت. فضاهای تشکیل‌دهنده واحد کلرزی گازی عبارتند از: اتاق استقرار سیلندرهای آماده مصرف، اتاق فرمان و کنترل، اتاق اپراتور، حوضچه خنثی‌سازی، اتاق خنثی‌ساز و اتاق کلرزی، که در بعضی تصفیه‌خانه‌ها ممکن است بعضی از این موارد وجود نداشته باشد.

۲-۲- روش تحقیق

مراحل کار به این صورت است که ابتدا پس از تعیین هدف، تیم تشکیل شد و با مشخص کردن فرآیند و اجزا و زیر مجموعه‌ها، شامل انبار سیلندرهای گاز کلر، اتاق کلرزی، سیلندرهای گاز، حمل و نقل سیلندرهای گاز کلر، اتصالات کلرزی‌های گازی و کارکنان، سیستم آموزشی و مدیریتی واحدهای کلرزی، برای هر کدام از زیر مجموعه‌ها یک سری مراحل انجام شد. این مراحل شامل شناسایی و فهرست کردن خرابی‌ها و خطرات بالقوه (شدت خرابی و خطر (S)، میزان وقوع خرابی و خطر (O)، و قابلیت شناسایی خرابی و خطر (D)) است که براساس یک سری معیارهای موجود در پژوهش‌های قبلی برای هر حوزه در ۴ تصفیه‌خانه طبق نظر کارشناسان مقاداردهی شد. بعد از لیست شدن خطرات بالقوه در هر حوزه برای تصفیه‌خانه‌های منتخب و

مدیریت ریسک امری لازم و ضروری برای هر سازمانی است، به خصوص سازمان‌هایی که با تجهیزات و فرآیندهایی مواجه هستند که خطرات، خرابی‌ها و خطاهای صورت گرفته در آن می‌تواند همراه با تهدیدات جدی برای موجودات زنده و محیط زیست باشد (Prabu et al., 2020). یکی از این سازمان‌ها، شرکت آب و فاضلاب است که در ارتباط با خطرات ناشی از نشت گاز سمی کلر در تصفیه‌خانه‌های خود است و به دنبال راه‌کارهایی برای جلوگیری از زیان است (رسول و براتی، ۱۳۹۵). با وجود تکنولوژی‌های تصفیه آب نظیر فیلتراسیون غشائی (Abdel-Fatah et al., 2019)، اشعه UV (Carra et al., 2020)، استفاده از ازن و هیدروژن پراکسید (اکسیداسیون پیشرفته)، تبادل یون و فیلتراسیون بیولوژیکی (Chu et al., 2020)، روش کلرزی برای تصفیه آب شهری هنوز روشی متداول است (Anthony et al., 2020). گاز کلر در غلظت ۱۰-۲۰ ppm در عرض ۳۰ دقیقه باعث ایجاد مسمومیت شده و در غلظت‌های ۱۰۰-۱۵۰ ppm در عرض ۵ تا ۱۰ دقیقه سبب مرگ انسان می‌شود. تماس دائم با مقادیر کم آن ریه‌ها را ضعیف می‌کند و آسیب‌پذیری ریه‌ها را در برابر بیماری‌های دیگر افزایش می‌دهد (Ghernaout and Elboughdiri, 2020). فاکتورهایی از قبیل نقشه سیلندر، جنس سیلندر، وزن خالی و پر سیلندر و گیره در ایمنی فرآیند مؤثر بوده و فاکتورهایی هستند که باید طبق استاندارد طراحی شوند. سیلندر گاز کلر حتماً باید دارای کلاهک باشد و کارکنان نیز به خوبی تحت آموزش نحوه کار با سیلندر قرار گرفته باشند. سیلندرهای مورد استفاده باید تحت انجام آزمایش استحکام و مقاومت بدنه قرار گرفته باشند (Srivastava et al., 2019). بر این اساس، بررسی حالات بالقوه خرابی و خطر و تحلیل اثرات ناشی از آن یا همان FMEA می‌تواند در شناسایی خطرات بالقوه، تعیین میزان شدت آن‌ها و احتمال وقوع آن‌ها کارآمد باشد و از وقوع حوادث بعضاً غیرقابل جبران پیشگیری به عمل آورد (ستوده مرام، ۱۳۹۸).

روش FMEA برای سالیان مدیدی در بخش‌های مختلف به خصوص حوزه صنعت برای مدیریت ریسک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wicaksono and Karnaningroem, 2019). در این خصوص کاربرد آن به اوایل دهه ۱۹۵۰ و هنگام طراحی و توسعه سیستم‌های کنترل پرواز نسبت داده می‌شود که ضوابط و معیارهای ناشی از این روش سیستماتیک به شناسایی حالات خطا در اثر تغییرات ناشی از طراحی در سیستم‌های کنترل پرواز کمک

اوایل شهریور تا اواخر آذر ماه سال ۱۳۹۸ براساس مصاحبه و طرح پرسشنامه موارد موجود در جدول FMEA، انجام شده است (Ben-Daya, 2009; Kiran, 2016; Bowles, 2002). به منظور انجام اقدامات ضروری برای حذف یا کاهش خطرات احتمالی و بالقوه نیاز است که خطرات براساس محدوده RPN اولویت بندی شوند تا به ترتیب پرخطرترین موارد در دست بررسی و اقدام قرار گیرند. جدول ۱ این محدوده را مشخص می کند (Stamatis, 2018; Babiker et al., 2018; Liu et al., 2019). براساس جدول ۱ می توان مشخص کرد که هر خطر در هر زیر مجموعه ای که قبلاً تعیین شد برای انجام، در چه اولیوی قرار دارد.

تعیین و مشخص شدن مقادیر (S)، (O) و (D) براساس نظر کارشناسان و نمایندگان هر تصفیه خانه منتخب با معیار نمره دهی بر اساس نمرات ۰ تا ۱۰، که براساس استاندارد برخی مراجع به شکل مستقل تعریف و مشخص و اولویت ها بررسی شدند (Ben-Daya, 2009). بررسی اولویت ها (میزان اهمیت هر ریسک) به این صورت است که از طریق عدد اولویت ریسک (RPN^۵) که حاصل ضرب سه مقدار S، O و D است، تعیین می شود. خطرات بالقوه با بالاترین عدد RPN در اولویت اول قرار می گیرند. پیشنهادات پیشگیرانه و اصلاحی برای کاهش عدد اولویت ریسک براساس اقداماتی که سبب کاهش احتمال وقوع خرابی و خطر شود نیز ارائه شد. تحلیل ریسک تصفیه خانه های نامبرده شده بین

جدول ۱- اولویت بندی خطرهای بالقوه بر اساس محدوده RPN پیشنهادی

محدوده RPN	اولویت	اقدامات/توضیحات
بیشتر از ۱۵۰	اول	توقف فرآیند و عملیات مورد نظر تا هنگامی که خطر بالقوه کاهش یابد
بین ۱۰۰ تا ۱۵۰	دوم	باید در اسرع وقت اقدامات اصلاحی صورت گیرد
بین ۵۰ تا ۹۹	سوم	باید اقدامات اصلاحی مورد نظر قرار گرفته و انجام شود
بین ۳۰ تا ۴۹	چهارم	انجام اقدامات اصلاحی پیشنهاد می شود
بین ۲۰ تا ۲۹	پنجم	عملیات می تواند ادامه یابد اگرچه کنترل و توجه بیشتر ترجیحاً مدنظر باشد
کمتر از ۲۰	ششم	خطر قابل تحمل است

یک سری مسائل ایمنی است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- لیست خرابی و خطرات بالقوه برای هر یک از زیر مجموعه ها

حالات بالقوه خرابی و خطر در ۴ تصفیه خانه منتخب و در حوزه های انبار سیلندرهای، سیلندرهای گاز و حمل و نقل سیلندرهای گاز کلر بر طبق جدول های ۲ تا ۴ شناسایی و کدگذاری شدند. در جدول ۲ خرابی ها و خطرات بالقوه مربوط به انبار سیلندرهای گاز کلر نشان داده شده است که این موارد در ۲۱ زیر مجموعه طبقه بندی شدند.

خرابی ها و خطرات بالقوه مربوط به اتاق کلرزنی (شناسه خطرات B)، اتصالات کلرزنی های گازی (شناسه خطرات E) و کارکنان، سیستم آموزشی و مدیریتی واحدهای کلرزنی (شناسه خطرات F) مطابق مرجع (دستی و همکاران، ۱۳۹۸) لیست و کدگذاری شده اند. حالاتی که در ارتباط با سیلندرهای گاز، منجر به یک سری خرابی و خطر می شود در جدول ۳ ارائه شده است. در جدول ۴ خرابی ها و خطرات بالقوه در ارتباط با حمل و نقل سیلندرهای گاز کلر کدگذاری شده است. این خطرات در مورد نامناسب بودن بارگیری، ماشین حمل، مسیر و رعایت نکردن

۳-۲- محاسبه عدد اولویت ریسک

در هر تصفیه خانه منتخب و برای هر کدام از خطرات بالقوه (شناسه خطرات A تا F)، مقادیر (S)، (O)، و (D) تعیین و مشخص شدند. نگذاشتن کلاهک ایمنی، دیواره و سرپوش نداشتن ماشین مخصوص حمل سیلندر، عدم اسکورت ماشین حمل سیلندر کلر و استفاده از وسایل نقلیه نامناسب بدون معاینه فنی بالاترین شدت خطر را دارد. به هر حال این پارامتر، بدون در نظر گرفتن احتمال وقوع و قابلیت شناسایی آن است و بنابراین برای اینکه خطر بر اساس روش FMEA به درستی قابل تحلیل باشد باید حاصل ضرب مقادیر سه نمودار بالا (مقدار RPN) در تحلیل ها مورد استفاده قرار گیرد که بر این اساس مقدار عدد RPN برای تصفیه خانه منتخب ۱ در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۲- خرابی‌ها و خطرات بالقوه در انبار سیلندرهای گاز کلر (شناسه خطرات A)

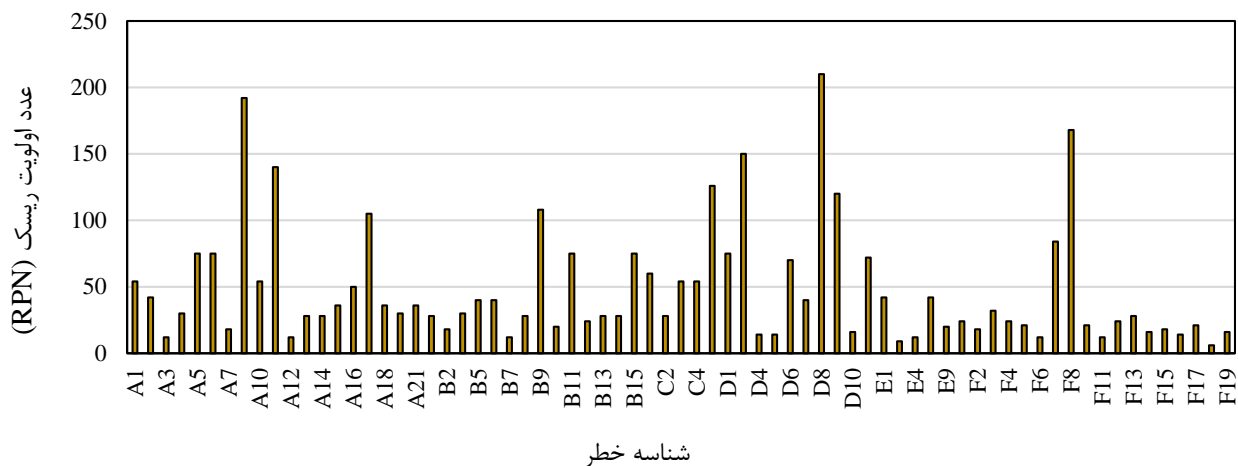
کد	حالات بالقوه خرابی و خطر
(A ₁)	کیفیت نامناسب سازه‌های انبار سیلندر و عدم استحکام بنای آن
(A ₂)	ابعاد نامناسب انبار سیلندر کلر
(A ₃)	جنس نامناسب سقف (بدون عایق حرارتی)، کف و دیواره‌ها
(A ₄)	بکارگیری مصالح بی‌کیفیت و آسیب‌پذیر در برابر حریق و زنگ‌زدگی
(A ₅)	تعداد و ابعاد نامناسب پنجره‌ها و محل نامناسب آن‌ها
(A ₆)	تعداد و ابعاد نامناسب درها و محل نامناسب درها
(A ₇)	فاصله نامناسب انبار سیلندر از منابع تولید گرما و حرارت و نزدیکی بیش از حد انبار به تأسیسات مکانیکی و برقی
(A ₈)	اتصالات معیوب و نامناسب الکترونیکی و برقی
(A ₉)	غیر استاندارد بودن حوضچه آب آهک
(A ₁₀)	مکانیزم نامناسب برای انتقال هوای داخل انبار به فضای آزاد یا اتاق خنثی‌ساز و عدم تهویه مناسب انبار و جهت نامناسب تهویه
(A ₁₁)	قرارگیری نامناسب تابلوی برق، کلیدهای قطع و وصل برق و دیگر ابزارآلات
(A ₁₂)	قراگیری نامناسب سیلندرها و جانمایی نامناسب تجهیزات انبار
(A ₁₃)	عدم فاصله مناسب بین سیلندرهای گاز کلر
(A ₁₄)	قرار نگرفتن سیلندرها و مخازن بزرگ روی پایه‌های مخصوص آن‌ها و احتمال جابه‌جایی آن‌ها در اثر بروز حوادثی مثل زلزله
(A ₁₅)	عدم پایش هوشمند انبار
(A ₁₆)	دمای نامناسب محیط انبار سیلندر گاز مخصوصاً در فصول سرد
(A ₁₇)	رطوبت بالا یا نامناسب انبار سیلندر گاز
(A ₁₈)	عدم وجود دیواره‌های بتونی کوتاه با ارتفاع مناسب (۵۰ تا ۸۰ سانتیمتر) در جلوی سیلندرها
(A ₁₉)	مهار نامناسب سیلندر داخل حوضچه آب آهک یا عدم وجود مهار بند
(A ₂₀)	ابعاد و محل نامناسب اتاق خنثی‌ساز
(A ₂₁)	مشکلات فنی سیستم‌های هشدار دهنده، اسکرابر و ترپ

جدول ۳- خرابی‌ها و خطرات بالقوه سیلندرهای گاز (شناسه خطرات C)

کد	حالات بالقوه خرابی و خطر
(C ₁)	نگذاشتن کلاهک ایمنی روی سیلندرهای گاز
(C ₂)	وجود رطوبت و موادی همچون آمونیاک، اکسیژن، روغن و هیدروکربن‌های گازی و مایع در سیلندرهای کلر گازی
(C ₃)	کهنگی و فرسودگی سیلندرها
(C ₄)	وجود سیلندرهای بدون انجام تست استحکام و تست مقاومت بدنه
(C ₅)	تعبیه شیر نامناسب یا آسیب‌دیده روی سیلندر گاز

جدول ۴- خرابی‌ها و خطرات بالقوه در حمل و نقل سیلندرهای گاز کلر (شناسه خطرات D)

کد	حالات بالقوه خرابی و خطر
(D ₁)	ضربه خوردن سیلندرهای گاز کلر یا در رفتن سیلندرها از فاصله نامناسب روی زمین یا روی پایه‌ها
(D ₂)	دیواره و سرپوش نداشتن ماشین حمل مخصوص سیلندر
(D ₃)	بلند کردن سیلندر از طریق کلاهک آن‌ها
(D ₄)	قرار ندادن کلاهک سیلندرها هنگام جابه‌جایی و حمل آن‌ها
(D ₅)	بارگیری غیر مکانیزه سیلندرها
(D ₆)	مشکلات فنی در تجهیزات مکانیزه برداشتن و گذاشتن سیلندرها
(D ₇)	بارگیری سیلندرها و حمل آن‌ها در زمان‌هایی که ترافیک و رفت و آمد زیاد است
(D ₈)	عدم اسکورت ماشین حمل سیلندر کلر
(D ₉)	استفاده از وسایل نقلیه نامناسب و بدون معاینه فنی برای حمل کپسول‌ها
(D ₁₀)	حمل بیش از حد ظرفیت کپسول‌ها هنگام جابه‌جایی آن‌ها
(D ₁₁)	حمل و نقل کپسول‌ها از مسیرهای پرخطر و حساس

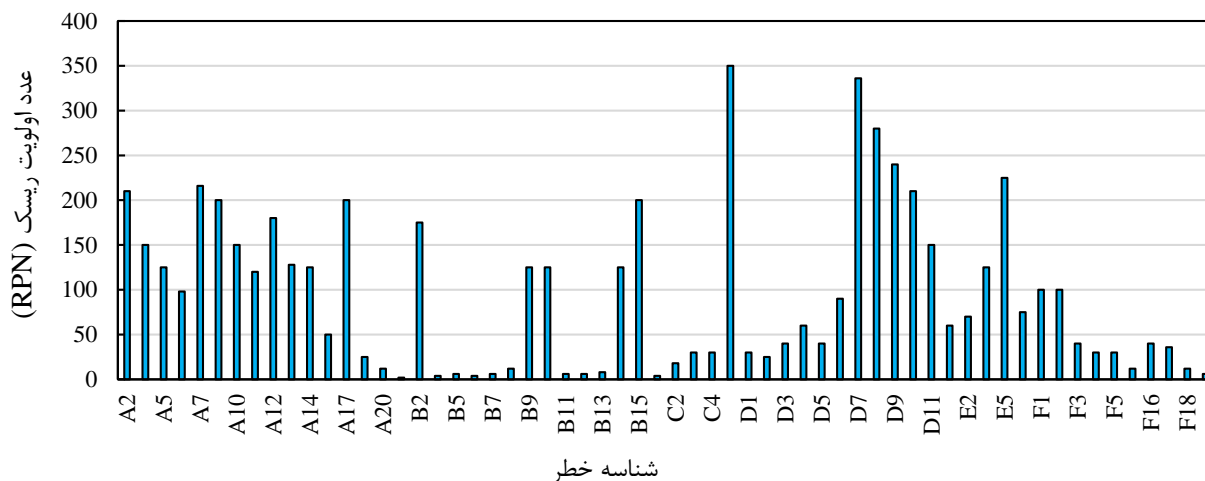


شکل ۱- عدد اولویت ریسک برای تصفیه‌خانه منتخب ۱

(شناسه خطر A₁₇). ضمن این که در این تصفیه‌خانه استفاده از تعداد مناسب بی‌سیم برای ارتباط بهتر هنگام وقوع خطر پیشنهاد شده است. ارزیابی ریسک با روش FMEA نشان می‌دهد که در تصفیه‌خانه منتخب ۲، رطوبت نامناسب اتاق کلرژنی (شناسه خطر B₁₅) عدد اولویت ریسک بالایی حدود ۲۰۰ دارد. با توجه به ابعاد کوچک اتاق کلرژنی، شناسه خطر B₂ نیز از عدد اولویت ریسک بالایی برخوردار است. همچنین، دمای نامناسب اتاق کلرژنی (شناسه خطر B₁₄) و نامناسب بودن اتاق کلرژنی از نظر ایجاد مکانیزمی برای انتقال هوای داخل اتاق کلرژنی به فضای آزاد یا اتاق خنثی‌ساز و عدم تهویه مناسب و برای تهویه نامناسب (شناسه خطر B₁₀) عدد اولویت ریسک قابل توجهی دارند. براساس نظرات کارشناس و ارزیابی خطرات بالقوه سیلندرهای گاز در تصفیه‌خانه منتخب ۲، در این تصفیه‌خانه نیز تعبیه شیر نامناسب یا آسیب‌دیده روی سیلندر گاز (شناسه خطر C₅) بیشترین ریسک را دارد، به‌خصوص آن که عدد اولویت ریسک آن هم در این تصفیه‌خانه مقدار بسیار بالایی دارد. در تصفیه‌خانه ۲ از دید کارشناسانه، بارگیری سیلندرها و حمل آن‌ها در زمان‌هایی که ترافیک و رفت و آمد زیاد است (شناسه خطر D₇) نیز خطر بالقوه بسیار بالایی را دارد و در مرتبه بعدی عدم اسکورت ماشین حمل سیلندر کلر (شناسه خطر D₈) و استفاده از وسایل نقلیه نامناسب و بدون معاینه فنی برای حمل کپسول‌ها (شناسه خطر D₉) از نظر خطرات بالقوه‌ای که در زمینه حمل و نقل می‌تواند باشد، قرار دارند. در این تصفیه‌خانه پیشنهاد شده است با تجهیز تصفیه‌خانه به برق اضطراری از مشکلاتی که ممکن است هنگام برداشتن و گذاشتن سیلندرها در ماشین های حمل گاز به وجود بیاید جلوگیری کرد.

برطبق شکل ۱ در تصفیه‌خانه منتخب ۱، اتصالات معیوب و نامناسب الکترونیکی و برقی در انبار سیلندرها (شناسه خطر A₈) و همچنین اتصالات معیوب در اتاق کلرژنی (شناسه خطر B₉) و قرارگیری نامناسب تابلوی برق (شناسه خطر A₁₁) و رطوبت بالای انبار سیلندر (شناسه خطر A₁₇) عدد اولویت ریسک بالایی داشته‌اند. همچنین، در این تصفیه‌خانه، تعبیه شیر نامناسب یا آسیب‌دیده روی سیلندر گاز (شناسه خطر C₅)، دیواره و سرپوش نداشتن ماشین حمل مخصوص سیلندر (شناسه خطر D₂) و به‌خصوص عدم اسکورت ماشین حمل سیلندر کلر (شناسه خطر D₈) می‌تواند ریسک بالایی را داشته باشد. علاوه بر این استفاده از وسایل نقلیه نامناسب و بدون معاینه فنی برای حمل کپسول‌ها (شناسه خطر D₉) نیز می‌تواند خطر بالایی داشته باشد. در تصفیه‌خانه منتخب ۱، عدم کالیبره منظم سیستم‌های پایش هوشمند و سیستم ایمنی (شناسه خطر F₈) نیز می‌تواند یکی از مهم‌ترین خطرهای بالقوه باشد.

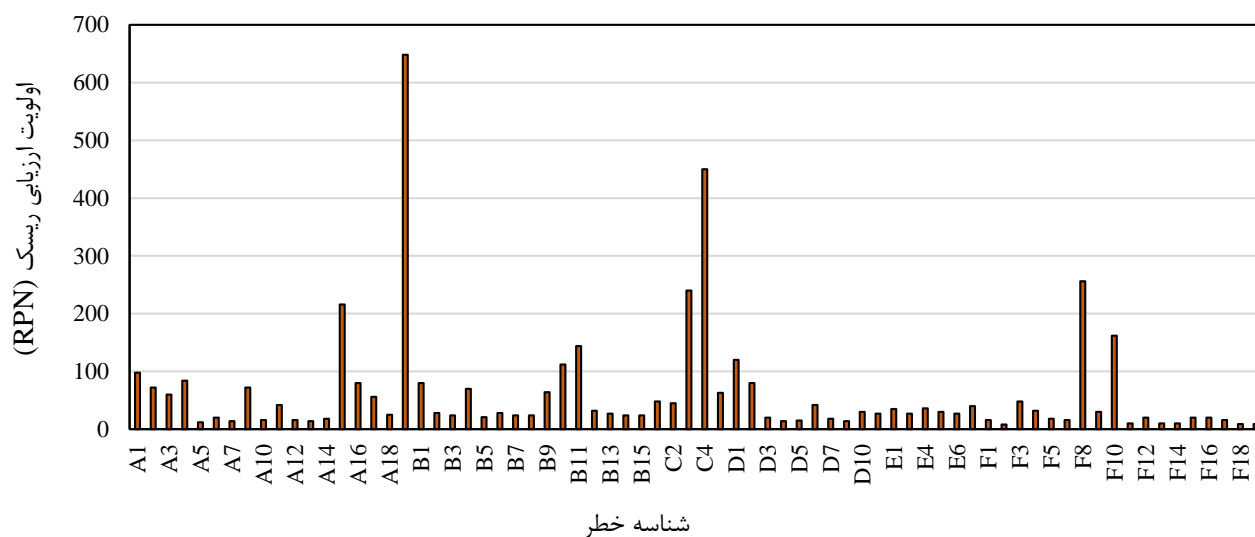
نتایج به‌دست آمده برای عدد اولویت ریسک (شکل ۲) در تصفیه‌خانه منتخب ۲ نشان‌دهنده آن است که ابعاد نامناسب انبار سیلندر گاز کلر و فاصله نامناسب انبار از منابع تولید گرما و تأسیسات مکانیکی و برقی (شناسه خطر A₇ و A₂) عدد اولویت ریسک بالاتر از ۲۰۰ داشته‌اند. در واقع در این تصفیه‌خانه فاصله بین کپسول‌ها کم است، ضمن این که به‌دلیل وضعیت انبار احتمال یخ‌زدگی سیلندرها و اتصالات نیز وجود دارد. از نظر تعداد و ابعاد درها و جانمایی آن‌ها این انبار ایزوله نیست، ضمن آن که از نظر جانمایی تجهیزات انبار نظیر ماسک‌ها و کپسول اکسیژن، خطر بالقوه در این خصوص نیز باید موردتوجه باشد (شناسه خطر A₁₂). در این تصفیه‌خانه وضعیت گرمایش مناسب نیست و نیز در ایام زمستان به‌دلیل کوهستانی بودن و وجود مه، رطوبت بالا است



شکل ۲- عدد اولویت ریسک برای تصفیه‌خانه منتخب ۲

اولویت ریسک نسبتاً قابل توجهی داشتند. ارزیابی خطرات بالقوه سیلندرهای گاز در تصفیه‌خانه منتخب ۳ مشخص کرد که در این مجموعه، سیلندرهای بدون آزمایش استحکام بدنه (شناسه خطر C4) بیش‌ترین عدد اولویت ریسک را بعد از شناسه خطر A21 داشتند. کهنگی و فرسودگی سیلندر (شناسه خطر C3) خطر بالقوه دیگری است که در این تصفیه‌خانه باید مورد توجه باشد. در تصفیه‌خانه منتخب ۳ و براساس تجربیات آن‌ها از ماشین‌های حمل کپسول، خطر مربوط به ضربه خوردن سیلندرهای گاز کلر یا در رفتن سیلندرها از فاصله نامناسب روی زمین یا روی پایه‌ها (شناسه خطر D1) از نظر عدد اولویت ریسک مقدار قابل توجهی داشت.

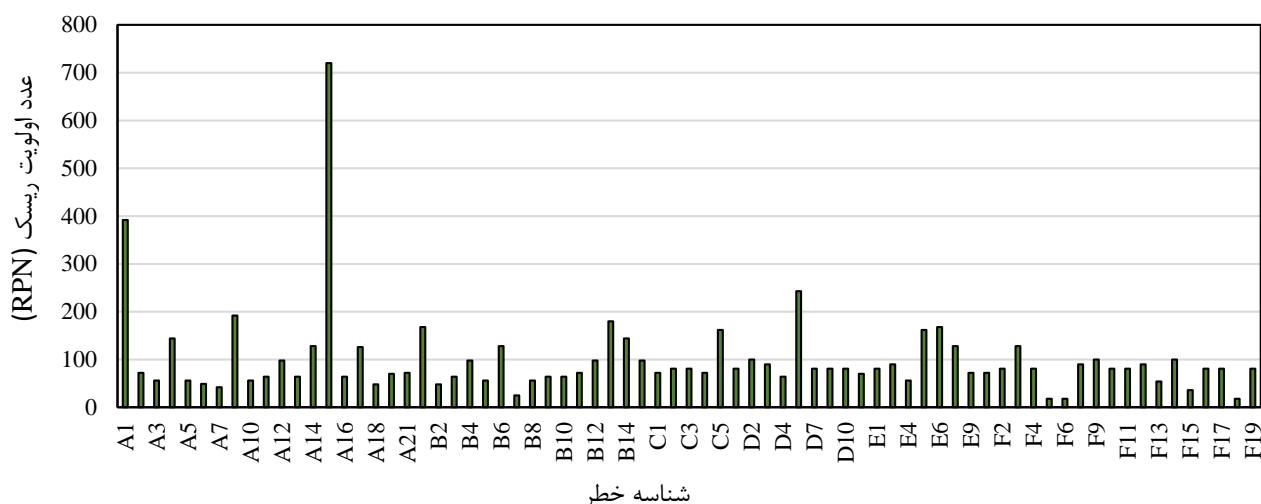
براساس ارزیابی ریسک به‌روش FMEA از تصفیه‌خانه منتخب ۳ (شکل ۳) مشخص شد مشکلات فنی سیستم‌های هشدار دهنده، اسکرابر و ترپ (با شناسه خطر A21) مهمترین ریسکی می‌تواند باشد که باید در حوزه انبار سیلندرهای گاز کلر مورد توجه باشد، به‌خصوص آن‌که تصفیه‌خانه منتخب ۳ فاقد اسکرابر و ترپ است و سیستم‌های هشداردهنده نیز مشکلاتی داشته‌اند (با شناسه خطر A15). یکی دیگر از مشکلات، باز شدن درب‌ها به داخل بود. در اتاق کلرزی تصفیه‌خانه منتخب ۳، قرارگیری نامناسب تابلوی برق و دیگر ابزارآلات (شناسه خطر B11) و نامناسب بودن اتاق کلرزی از نظر ایجاد مکانیزمی برای انتقال هوای داخل اتاق کلرزی به فضای آزاد یا اتاق خنثی‌ساز و عدم تهویه مناسب و برای تهویه نامناسب (شناسه خطر B10) نیز عدد



شکل ۳- عدد اولویت ریسک برای تصفیه‌خانه منتخب ۳

هستند که باید مورد توجه باشند. بررسی و ارزیابی خطرات بالقوه در حوزه سیلندرهای گاز کلر در تصفیه‌خانه منتخب ۴ نیز آشکار می‌سازد که تعبیه شیر نامناسب یا آسیب‌دیده روی سیلندر گاز (شناسه خطر C₅) بالاترین ریسک را نسبت به دیگر خطرات در این حوزه (شناسه خطرات C) می‌تواند داشته باشد، به خصوص آن‌که اعلام شده گاز کلر می‌تواند سبب خوردگی و آسیب به شیرهای بدون کیفیت شود. بر اساس مشاهدات و تجربیات در مجموعه تصفیه‌خانه منتخب ۴، مشکلات فنی در تجهیزات مکانیزه برداشتن و گذاشتن سیلندرها (شناسه خطر D₆) عدد اولویت ریسک بالاتر از ۲۰۰ را نشان داد.

بر طبق شکل ۴ و بررسی روی خطرات بالقوه در تصفیه‌خانه منتخب ۴، عدم پایش هوشمند انبار (شناسه خطر A₁₅) از مهم‌ترین خطرات بالقوه بود؛ چراکه این تصفیه‌خانه فاقد سیستم پایش هوشمند است. در اتاق کلرزی تصفیه‌خانه منتخب ۴، عدم پایش هوشمند اتاق کلرزی (شناسه خطر B₁₃) نیز ریسک بالقوه بالایی می‌تواند داشته باشد. در واقع اتاق کلرزی این تصفیه‌خانه فاقد سیستم پایش هوشمند گاز کلر است. براساس نتایج به‌دست آمده، کیفیت نامناسب سازه‌ها و عدم استحکام بنای انبار سیلندر و نیز اتاق کلرزی (شناسه خطر A₁ و B₁)، دمای نامناسب اتاق کلرزی (شناسه خطر B₁₄) تعداد و ابعاد نامناسب درها و محل نامناسب آن‌ها (شناسه خطر B₆) نیز در زمره خطرات بالقوه‌ای



شکل ۴- عدد اولویت ریسک برای تصفیه‌خانه منتخب ۴

است که اتصالات معیوب و نامناسب الکترونیکی و برقی از مهم‌ترین عوامل ایجاد ریسک در تصفیه‌خانه‌ها است. یک‌سری عوامل نیز مانند تجهیز نبودن به سیستم‌های ایمنی، رعایت نکردن یک‌سری استانداردها و قدیمی بودن ساختمان‌ها و وسایل از جمله عوامل خرابی و خطر بودند که RPN آن‌ها در تصفیه‌خانه‌ها یکسان نبود. به‌عبارت دیگر با وجود احتمال ریسک بالا در یک تصفیه‌خانه خاص، قابل‌تعمیم به سایر تصفیه‌خانه‌ها نبود. علاوه‌بر این، با توجه به جدول ۵، تعداد حرف D در اولویت‌های اول تا سوم خصوصاً برای تصفیه‌خانه‌های ۱ و ۲ بیشتر از سایر حروف دیده می‌شود و همچنین در شکل‌های ۱ تا ۴ بخش مربوط به D معمولاً ستون‌های نمودار بلندتری نسبت به سایر بخش‌ها دارد که از این داده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که در بخش حمل و نقل عدد ارزیابی ریسک بیشتر از سایر حوزه‌ها است و یک‌سری اقدامات برای مقابله با این خطرات باید انجام شود.

۳-۳- اولویت‌بندی خطرهای بالقوه در تصفیه‌خانه‌های منتخب برای انجام اقدامات

بر اساس اولویت‌ها (جدول ۱)، شناسه خطرات اولویت‌بندی شده و برای هر تصفیه‌خانه منتخب در جدول ۵ مشخص شده است. شناسه خطرانی که در اولویت اول هستند، باید در گام نخست موردتوجه قرار گرفته و برای رفع یا کاهش خطر آن‌ها اقدامات پیشگیرانه در هر حوزه انجام گیرد. بعد از انجام اولویت‌های اول نیز اقدامات لازم برای رفع یا کاهش خطرات اولویت‌های بعدی با توجه به حساسیت انجام آن اقدامات انجام شود.

طبق جدول ۵، A₈ برای تصفیه‌خانه‌های ۱، ۲ و ۴ در اولویت اول است. عدد ارزیابی ریسک برای A₈ در تصفیه‌خانه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب ۱۹۲، ۲۰۰، ۷۲ و ۱۹۲ است، که نشان می‌دهد در همه تصفیه‌خانه‌ها به‌جز شماره ۳ در اولویت اول است. این به‌آن معنا

فاکتورهای عامل ایجاد ریسک در تصفیه‌خانه بودند (Gheibi et al., 2019). طبق نتایج این پژوهش نیز در تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه بیشترین اعداد RPN مربوط به معیوب بودن سیستم الکتریکی و حمل و نقل بود. در نتیجه می‌توان گفت که ایمنی حمل و نقل و سیستم‌های الکتریکی از جمله فاکتورهای مهمی است که در سیستم کلرزنی آب باید مورد توجه قرار گیرد.

پژوهش (Gheibi et al., 2019) مهم‌ترین فاکتورها حضور ترکیباتی نظیر O_2 ، NH_3 ، هیدروکربن‌های گاز و مایع در سیلندرهای گاز کلر و غیرمکانیزه بودن تخلیه و بارگذاری سیلندرها بود و عدد RPN آن‌ها به ترتیب ۱۶۰ و ۱۲۰ است. بعد از این‌ها نگهداری سیلندر در نزدیکی آسانسور و بخش‌های الکتریکی و جای‌گیری نامناسب لوله برای اتصال تزریق‌کننده به ورودی آب از جمله

جدول ۵- اولویت‌بندی خطر (شناسه خطر) برای انجام اقدامات

شناسه خطر	اولویت	تصفیه‌خانه
D ₈ A ₈ F ₈	اول	تصفیه‌خانه منتخب ۱
D ₂ A ₁₁ C ₅ D ₉ B ₉ A ₁₇	دوم	
F ₇ A ₅ A ₆ B ₁₁ B ₁₅ D ₁ D ₁₁ D ₆ C ₁ A ₁ A ₁₀ C ₃ C ₄ A ₁₆	سوم	
A ₂ E ₁ E ₇ B ₅ B ₆ D ₇ A ₁₅ A ₁₈ A ₂₁ F ₃ A ₄ A ₂₀ B ₄	چهارم	
A ₁₃ A ₁₄ B ₁ B ₈ B ₁₃ B ₁₄ C ₂ F ₁₃ B ₁₂ F ₁ F ₄ F ₁₂ F ₅ F ₉ F ₁₇ B ₁₀ E ₉	پنجم	
A ₇ B ₂ F ₂ F ₁₅ D ₁₀ F ₁₄ F ₁₉ D ₄ D ₅ F ₁₆ A ₃ A ₁₂ B ₇ E ₄ F ₆ F ₁₁ E ₂ F ₁₈	ششم	
C ₅ D ₇ D ₈ D ₉ E ₅ A ₇ A ₂ D ₁₀ A ₈ A ₁₇ B ₁₅ A ₁₂ B ₂	اول	تصفیه‌خانه منتخب ۲
A ₃ A ₁₀ D ₁₁ A ₁₃ A ₅ A ₁₄ B ₉ B ₁₀ B ₁₄ E ₄ A ₁₁ F ₁ F ₂	دوم	
A ₆ D ₆ E ₇ E ₂ D ₄ E ₁ A ₁₅	سوم	
D ₃ D ₅ F ₃ F ₁₆ F ₁₇ C ₃ C ₄ D ₁ F ₄ F ₅	چهارم	
A ₁₈ D ₂	پنجم	
C ₂ A ₂₀ B ₈ F ₆ F ₁₈ B ₁₃ B ₅ B ₇ B ₁₁ B ₁₂ F ₁₉ B ₃ B ₆ C ₁ A ₂₁	ششم	
A ₂₁ C ₄ F ₈ C ₃ A ₁₅	اول	تصفیه‌خانه منتخب ۳
B ₁₁ D ₁ B ₁₀	دوم	
A ₁ A ₄ A ₁₆ B ₁ D ₂ A ₂ A ₈ B ₄ B ₉ C ₅ A ₃ A ₁₇	سوم	
C ₁ F ₃ C ₂ A ₁₁ D ₆ E ₇ E ₄ E ₁ B ₁₂ F ₄ D ₁₀ E ₅ F ₉	چهارم	
B ₂ B ₆ B ₁₃ D ₁₁ E ₂ E ₆ A ₁₈ B ₃ B ₇ B ₈ B ₁₄ B ₁₅ B ₅ A ₆ D ₃ F ₁₂ F ₁₅ F ₁₆	پنجم	
A ₁₄ D ₇ F ₅ A ₁₀ A ₁₂ F ₁ F ₆ F ₁₇ D ₅ A ₇ A ₁₃ D ₄ D ₈ A ₅ F ₁₁ F ₁₃ F ₁₄ F ₁₈ F ₁₉ F ₂	ششم	
A ₁₅ A ₁ D ₆ A ₈ B ₁₃ B ₁ E ₆ C ₅ E ₅	اول	تصفیه‌خانه منتخب ۴
A ₄ B ₁₄ A ₁₄ B ₆ E ₇ F ₃ A ₁₇ D ₂ F ₉ F ₁₄	دوم	
A ₁₂ B ₄ B ₁₂ B ₁₅ D ₃ E ₂ F ₈ F ₁₂ C ₂ C ₃ D ₁ D ₇ D ₈ D ₁₀ E ₁ F ₂ F ₄ F ₁₀ F ₁₁ F ₁₆ F ₁₇ F ₁₉ A ₂ A ₂₁ B ₁₁ C ₁ C ₄ E ₉ F ₁ A ₂₀ D ₁₁ A ₁₁ A ₁₃ A ₁₆ B ₃ B ₉ B ₁₀ D ₄ A ₃ A ₅ A ₁₀ B ₅ B ₈ E ₄ F ₁₃	سوم	
A ₆ A ₁₈ B ₂ A ₇ F ₁₅	چهارم	
B ₇	پنجم	
F ₅ F ₆ F ₁₈	ششم	

رفت و آمد کم و اسکورت ماشین حمل و نقل و استفاده از وسایل نقلیه مناسب، استاندارد و جدید از جمله اقدامات در اولویت هستند. برای تصفیه‌خانه ۳، خرید و تجهیز کردن به سیستم‌های هشداردهنده، اسکرابر و ترپ، انجام منظم و پیوسته تست استحکام و اجرای سیستمی که مانع از استفاده از سیلندرهای بدون تست شود، کالیبره کردن منظم سیستم‌های ایمنی و استفاده از تجهیزات استاندارد و به‌روز و از رده خارج کردن کپسول‌های قدیمی در اولویت اقدامات پیشنهادی هستند. برای

۳-۴- اقدامات پیشنهادی

از جمله اقدامات پیشنهادی برای کاهش ریسک در تصفیه‌خانه ۱ که در اولویت هستند می‌توان اسکورت کاملاً پوششی و (در بعضی موارد) نامحسوس ماشین حمل و نقل، تعویض کامل سیستم الکترونیکی برقی معیوب براساس استاندارد، کالیبره کردن منظم سیستم‌های ایمنی و استفاده از تجهیزات استاندارد و به‌روز را نام برد. برای تصفیه‌خانه ۲ تعویض شیر و استفاده از شیر استاندارد و تست‌شده، حمل و نقل از مسیرهای با

انتشار گاز سمی کلر در صورت بروز حادثه در تصفیه‌خانه‌های منتخب شرکت آبفای مشهد"، گزارش پروژه شرکت آب و فاضلاب مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رسولزاده، م.، و براتی، ج.، (۱۳۹۵)، "ارائه راهبردهای افزایش درآمد در شرکت آب و فاضلاب: مطالعه موردی آبفای مشهد"، فصلنامه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۱(۱)، ۲۰-۲۷.

ستوده مراد، ک.، (۱۳۹۸)، "ارزیابی و مدیریت ریسک ایمنی، بهداشت و زیست‌محیطی تصفیه‌خانه فاضلاب ارومیه با استفاده از روش FMEA"، فصلنامه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۴(۱)، ۲۴-۳۳.

Abdel-Fatah, M. A., Shaarawy, H. H., and Hawash, S. I., (2019), "Integrated treatment of municipal wastewater using advanced electro-membrane filtration system", *SN Applied Science*, 1(10), 1153.

Anthony, E.T., Ojemaye, M.O., Okoh, O.O., and Okoh, A.I., (2020) "A critical review on the occurrence of resistomes in the environment and their removal from wastewater using apposite treatment technologies: Limitations, successes and future improvement", *Environmental Pollution*, 263(Part A), 113791.

Babiker, A., Amer, Y.S., Osman, M.E., Al-Eyadhy, A., Fatani, S., Mohamed, S., Alnemri, A., Titi, M. A., Shaikh, F., Alswat, K.A., Wahabi, H. A., and Al-Ansary, L.A., (2018), "Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) may enhance implementation of clinical practice guidelines: An experience from the Middle East", *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 24(1), 206-211.

Ben-Daya, M., (2009), "Failure mode and effect analysis", In: M., Ben-Daya, S., Duffuaa, A., Raouf, J., Knezevic, D., Ait-Kadi, (eds.), *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, 75-90.

Bowles, J. B., (2002), "Failure modes and effects analysis", Computer Science and Engineering, University of South Carolina.

Carra, I., Fernandez Lozano, J., Autin, O., Bolton, J.R., and Jarvis, P., (2020), "Disinfection by-product formation during UV/Chlorine treatment of pesticides in a novel UV-LED reactor at 285 Nm and the mitigation impact of GAC treatment", *Science of the Total Environment*, 712, 136413.

Chu, Z., Chen, K., Xiao, C., Ji, D., Ling, H., Li, M., and Liu, H., (2020), "Improving pressure durability and fractionation property via reinforced PES loose nanofiltration hollow fiber membranes for textile wastewater treatment", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 108, 71-81.

Dhillon, B. S., (1992), "Failure modes and effects analysis-bibliography", *Journal of Microelectronics Reliability*, 32(5), 719-731.

Gheibi, M., Karrabi, M., and Eftekhari, M., (2019), "Designing a smart risk analysis method for gas chlorination units of water treatment plants with combination of failure mode effects analysis", *Journal*

تصفیه‌خانه ۴ نیز ضمن مجهز کردن سیستم به پایش مداوم، با توجه با استانداردهای ساختمان کلر، می‌توان مکانی جدید در محل مناسب برای این منظور در نظر گرفت و نیز استفاده از تجهیزات مکانیزه استاندارد برای مکانیزه برداشتن و گذاشتن سیلندرهای پیشنهاد می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارزیابی ریسک در ۴ تصفیه‌خانه منتخب شهر مشهد به روش FMEA انجام گرفت. نتایج نشان دادند که عدم اسکورت ماشین حمل سیلندر کلر، اتصالات معیوب و نامناسب الکترونیکی و برقی و نیز عدم کالیبره منظم سیستم‌های پایش هوشمند و سیستم ایمنی سه خطر با بیشترین مقدار RPN در تصفیه‌خانه منتخب ۱ بودند. هم‌چنین، در تصفیه‌خانه منتخب ۲ تعبیه شیر نامناسب یا آسیب دیده روی سیلندر گاز، بارگیری سیلندرها و حمل آن‌ها در زمان‌هایی که ترافیک و رفت و آمد زیاد است و عدم اسکورت ماشین حمل سیلندر کلر بیشترین مقدار عدد اولویت ریسک را داشتند. در تصفیه‌خانه منتخب ۳، مشکلات فنی سیستم‌های هشدار دهنده، اسکرابر و ترپ، وجود سیلندرها بدون انجام آزمایش استحکام و مقاومت بدنه، و عدم کالیبره منظم سیستم‌های پایش هوشمند و سیستم ایمنی سه خطر با بیشترین مقدار RPN و نیز در تصفیه‌خانه منتخب ۴ عدم پایش هوشمند انبار، کیفیت نامناسب سازه‌های انبار سیلندر و عدم استحکام بنای آن و مشکلات فنی در تجهیزات مکانیزه برداشتن و گذاشتن سیلندرها از مهمترین خطرات بالقوه برای بررسی بود که عدد اولویت ریسک بالاتری را در مقایسه با دیگر خطرات داشتند.

۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Failure Mode and Effects Analysis
- 2- Severity
- 3- Occurrence
- 4- Detection
- 5- Risk Priority Number

۶- منابع

دشتی، ع.، رزم آرا، ح.، روستا، ه.، محسن زاده، ح.، و عمرانی فرد، ح.، (۱۳۹۸)، "بررسی و شبیه‌سازی آنالیز پیامد و ریسک

- of *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171(30), 600-608.
- Ghernaout, D., and Elboughdiri, N., (2020), "Is not it time to stop using chlorine for treating water?", *Open Access Library Journal, OALib*, 07(01), 1-11.
- Goble, W., (2012), "The FMEA method, A powerful reliability tool for data analysis that lasts for decades", *INTECH March/April*, 15-20.
- Kiran, D. R., (2016), "Failure modes and effects analysis", In: D.R., Kiran, (ed.), *Total Quality Management: Key Concepts and Case Studies*, Butterworth-Heinemann, United Kingdom.
- Liu, B., Hu, Y., and Deng, Y., (2018), "New failure mode and effects analysis based on D numbers downscaling method", *International Journal of Computers Communications & Control*, 13(2), 205-220.
- Prabu, S. L., Suriyaprakash, T., Kandasamy, R., and Rathinasabapathy, T., (2020), *Effective Waste water treatment and its management*, In *Waste Management*, IGI Global, pp. 49-72.
- Stamatis, D. H., (2003), *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*, ASQ Quality Press, United States.
- Srivastava, P., Agrawal, M., Aditya Narayanan, G., Tandon, M., Tulsian, M. N., and Khanduja, D., (2019), *Risk analysis of water treatment plant using fuzzy-integrated approach*, Part of the *Advances in Intelligent Systems and Computing* book series (AISC) 741, 761-770.
- Wicaksono, A., and Karnaningroem, N., (2019), "Minimizing failure risk of refill drinking water production in Rungkut District Surabaya using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)" *IOP Conference Series, Earth Environmental Science*, Indonesia, pp. 8-9.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.