Incidents and Disasters Resilience
Online ISSN: 3134-0881
Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

Resilience-based maintenance management in industrial disruption scenarios: a maturity framework and empirical validation

Hamzeh Soltanali[1]✉, **Saeed Ramezani**[2]

1. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran. Email: h.soltanali@ihu.ac.ir
2. Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran. Email: ramezani.sr@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 4 February 2026
Received in revised form 21 February 2026
Accepted 15 March 2026
Available online 29 March 2026

Keywords:
Resilience Engineering,
Resilience-Based Maintenance,
Resilience Assessment,
Resilience Framework,
Industrial Disruptions.

ABSTRACT

Objective: Maintenance management for physical assets in process industries has evolved beyond a purely technical activity to become a strategic pillar of operational continuity, production stability, and organizational safety. As industrial systems become more complex and are increasingly exposed to unforeseen disruptions, conventional approaches such as reliability-centered and risk-based maintenance are, on their own, insufficient for managing complex, multifactor crisis conditions. In this context, resilience-based maintenance (REBM) is a complementary approach that emphasizes a system's ability to absorb disruptions, adapt to changing conditions, restore functionality, and learn from experience. However, the existing literature lacks an integrated, operational framework for assessing resilience within core maintenance processes. Drawing on resilience engineering literature, relevant international standards, and established conceptual models, this study proposes a five-stage framework for assessing and improving maintenance resilience. The stages are 'Preparedness and Prevention', 'Monitoring, Warning, and Prediction', 'Response and Countermeasures', 'Absorption, Adaptation, and Recovery', and 'Learning, Transformation, and Continuous Improvement'. Together, they extend logically from before a disruption to the period following full recovery.

Method: The framework comprises 194 assessment questions across 21 subsections and uses a five-level maturity scale (from 'no requirements' to 'excellence') to assess maintenance resilience. It was validated through a case study in a petrochemical complex. Data were collected through semi-structured interviews with managers and specialists, supplemented by a review of documents.

Results: The petrochemical complex was assessed at the 'development' maturity level, with an average score of 2.04 out of 4. 'Response and Countermeasures' received the highest score (2.4), while 'Learning, Transformation, and Continuous Improvement' (1.8) and 'Monitoring, Warning, and Prediction' (1.9) received the lowest scores.

Conclusions: The findings indicate that the organization has relatively good capacity to respond to routine failures but substantial structural weaknesses in predicting disruptions and systematically learning from experience. The main gaps identified include the absence of performance thresholds, a lack of analysis of combined scenarios, the absence of intelligent monitoring and self-monitoring systems, failure to follow up on corrective actions, and the lack of a 'build back better' approach to recovery. The proposed framework has high practical applicability to other industries in Iran and can provide a basis for improving maintenance resilience to industrial disruptions.

Cite this article: Soltanali., H, Ramezani., S. (2026). Resilience-based maintenance management in industrial disruption scenarios: a maturity framework and empirical validation. ***Incidents and Disasters Resilience***, *2*(5), 37-64.

© Author(s) retain the copyright.

Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح
شاپا الکترونیکی: ۰۸۸۱-۳۱۳۴
Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir

مدیریت نگهداشت مبتنی بر رویکرد تاب‌آوری در سناریوهای اختلال صنعتی: چهارچوب بلوغ و اعتبارسنجی تجربی

حمزه سلطانعلی[۱]✉، سعید رمضانی[۲]

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین علیه‌السلام، تهران، ایران. رایانامه: h.soltanali@ihu.ac.ir
۲. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین علیه‌السلام، تهران ایران. رایانامه: ramezani.sr@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹

کلیدواژه‌ها:
مهندسی تاب‌آوری،
نگهداشت،
ارزیابی تاب‌آوری،
چهارچوب تاب‌آوری،
اختلالات صنعتی.

چکیده

هدف: مدیریت نگهداشت دارایی‌های فیزیکی در صنایع فرایندی، امروزه از یک فعالیت فنی صرف فراتر رفته و به یکی از ارکان راهبردی تداوم عملیات، پایداری تولید و ایمنی سازمانی تبدیل شده است. با افزایش پیچیدگی سامانه‌های صنعتی و تشدید مواجهه با اختلالات پیش‌بینی‌نشده، رویکردهای کلاسیک نگهداشت نظیر قابلیت اطمینان‌محوری و ریسک‌محوری، به‌تنهایی برای مدیریت شرایط بحرانی و چندعاملی کفایت نمی‌کنند. در این بستر، مفهوم نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری (REBM) به‌عنوان رویکردی مکمل مطرح می‌شود که بر توانایی سامانه برای جذب اختلال، سازگاری با شرایط متغیر، بازیابی عملکرد و یادگیری از تجارب تأکید دارد. با این حال، ادبیات موجود فاقد یک چهارچوب یکپارچه و عملیاتی برای ارزیابی تاب‌آوری در هسته فرایندهای نگهداشت است. این مقاله با اتکا به ادبیات مهندسی تاب‌آوری، استانداردهای بین‌المللی مرتبط و مدل‌های مفهومی معتبر، یک چهارچوب پنج‌مرحله‌ای برای ارزیابی و ارتقای تاب‌آوری نگهداشت ارائه می‌دهد. چهارچوب پیشنهادی شامل گام‌های «آمادگی و پیشگیری»، «پایش، هشدار و پیش‌بینی»، «پاسخ‌دهی و مقابله»، «جذب، سازگاری و بازیابی» و «یادگیری، تحول و بهبود مستمر» است که به‌صورت منطقی از مرحله پیش از اختلال تا پس از بازیابی کامل جریان می‌یابد.

روش پژوهش: این چهارچوب با ۱۹۴ سؤال ارزیابی در قالب ۲۱ زیربخش و مقیاس بلوغ پنج‌سطحی (از فاقد الزام تا تعالی)، امکان ارزیابی وضعیت نگهداشت از لحاظ تاب‌آوری را فراهم می‌سازد. برای اعتبارسنجی، مطالعه موردی در یک مجتمع پتروشیمی انجام شد. داده‌ها از طریق مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته با مدیران، کارشناسان و بررسی مستندات گردآوری شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مجتمع مورد مطالعه در سطح «توسعه» با امتیاز میانگین ۲/۰۴ از ۴ قرار دارد. بالاترین امتیاز به گام «پاسخ‌دهی و مقابله» (۲/۴) و پایین‌ترین امتیازات به گام‌های «یادگیری، تحول و بهبود مستمر» (۱/۸) و «پایش، هشدار و پیش‌بینی» (۱/۹) اختصاص یافت.

نتیجه‌گیری: این یافته‌ها حاکی از آن است که سازمان در واکنش به خرابی‌های روزمره توانایی نسبی خوبی دارد، اما در پیش‌بینی اختلالات و یادگیری سیستماتیک از تجارب، ضعف ساختاری قابل‌توجهی دارد. بزرگ‌ترین شکاف‌های شناسایی‌شده شامل فقدان آستانه‌های عملکردی، عدم تحلیل سناریوهای ترکیبی، نبود سیستم پایش هوشمند و خودپایشی، عدم پیگیری اقدامات اصلاحی، و نبود رویکرد «ساختن بهتر» در بازیابی است. این پژوهش نشان می‌دهد که چهارچوب پیشنهادی قابلیت اجرایی بالایی در دیگر صنایع کشور دارد و می‌تواند مبنایی برای بهبود تاب‌آوری در مواجهه با اختلالات صنعتی فراهم آورد.

استناد: سلطانعلی؛ حمزه، رمضانی؛ سعید. (۱۴۰۵). مدیریت نگهداشت مبتنی بر رویکرد تاب‌آوری در سناریوهای اختلال صنعتی: چهارچوب بلوغ و اعتبارسنجی تجربی. *تاب‌آوری در برابر حوادث و سوانح*، ۲ (۵)، ۳۷-۶۴.

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه پژوهشی سوانح طبیعی.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

مقدمه

مهندسی تاب‌آوری[1] و کاربردهای آن

تحولات چند دهه اخیر در صنایع فرایندی، انرژی، پتروشیمی، فولاد، حمل‌ونقل و زیرساخت‌های حیاتی نشان داده است که عملکرد ایمن و پایدار این سامانه‌ها را نمی‌توان فقط با افزایش قابلیت اطمینان اجزا یا سخت‌گیرانه‌تر کردن رویه‌ها تضمین کرد. سامانه‌های صنعتی امروز با محیطی مواجه‌اند که در آن تغییرات ناگهانی، نوسان در شرایط عملیاتی، اختلال در زنجیره تأمین، حملات سایبری، فشارهای اقتصادی، محدودیت منابع و وقوع هم‌زمان چند رخداد نامطلوب، به بخشی از واقعیت روزمره بدل شده‌اند (Pawar et al., 2021). در چنین شرایطی، تنها کاهش احتمال خرابی برای تضمین پایداری کافی نیست؛ سازمان باید بتواند در برابر اختلال مقاومت کند، خدمات حیاتی خود را حفظ نماید، از آسیب‌ها عبور کند و پس از بحران به سطحی قابل‌قبول از عملکرد بازگردد (Hollnagel, 2017).

مهندسی تاب‌آوری دقیقاً در پاسخ به چنین نیازی شکل گرفته است. این حوزه بر این پیش‌فرض استوار است که در سامانه‌های پیچیده، تغییرپذیری و عدم قطعیت حذف‌شدنی نیستند؛ ازاین‌رو، باید به‌جای تلاش صرف برای حذف انحراف، ظرفیت سامانه برای عملکرد مؤثر در شرایط متغیر تقویت شود (Hollnagel et al., 2006). تاب‌آوری در این معنا فقط توان بازیابی پس از بحران نیست، بلکه مجموعه‌ای از قابلیت‌ها برای پیش‌نگری، پایش، پاسخ‌دهی، یادگیری، جذب، سازگاری و تحول را در برمی‌گیرد (Woods, 2015). در محیط‌های صنعتی، این رویکرد به‌ویژه زمانی اهمیت می‌یابد که سازمان با شرایطی روبه‌رو است که داده تاریخی کافی برای آن‌ها وجود ندارد، وابستگی‌های میان تجهیزات و واحدها پیچیده، و پیامدهای اختلال از مرزهای یک تجهیز یا یک بخش فراتر است (Ghaljahi et al., 2025). کاربرد صنعتی مهندسی تاب‌آوری در دهه اخیر از حوزه‌های ایمنی و مدیریت بحران فراتر رفته و به حوزه‌های بهره‌برداری، برنامه‌ریزی تولید، مدیریت دارایی‌ها و نگهداشت نیز وارد شده است (Pawar et al., 2021). دلیل این گسترش روشن است: نگهداشت در خط مقدم تداوم عملکرد صنعتی قرار دارد. هر میزان که سامانه‌های صنعتی پیچیده‌تر شوند، نقش نگهداشت در حفظ عملکرد، کاهش توقفات و جلوگیری از فروپاشی زنجیره عملکردی پررنگ‌تر می‌شود (Karar et al., 2024). ازاین‌رو، ادغام منطق تاب‌آوری با فرایندهای نگهداشت، نه یک گرایش نظری، بلکه یک ضرورت عملی است (Bukowski & Werbińska-Wojciechowska, 2025).

معرفی انواع اختلالات صنعتی

اختلال صنعتی را می‌توان هر رویداد، وضعیت یا تغییر ناگهانی دانست که موجب کاهش توان عملیاتی سامانه، انحراف از شرایط پایدار، افت کیفیت عملکرد، تهدید ایمنی، یا توقف بخشی از تولید شود (Yang et al., 2023). برخلاف نگاه سنتی که اختلال را صرفاً در قالب خرابی تجهیز می‌بیند، در رویکرد تاب‌آوری، اختلال دامنه‌ای بسیار وسیع‌تر دارد و می‌تواند فنی، انسانی، سازمانی، اطلاعاتی، محیطی یا ترکیبی باشد (Chen et al., 2021). اختلالات صنعتی را می‌توان در چند دسته کلی طبقه‌بندی کرد:

دسته نخست: «اختلالات فنی و تجهیزاتی» هستند؛ مانند خرابی ناگهانی تجهیزات دوار، کاهش راندمان سامانه، از دست رفتن عملکرد ابزار دقیق، انسداد در مسیرهای فرایندی، شکست در روانکاری، خرابی الکتریکی یا افت کیفیت (Dhillon, 2006).

دسته دوم: «اختلالات عملیاتی‌اند»؛ ازجمله نوسان بار، تغییر ناگهانی در خوراک، افزایش یا کاهش فشارهای فرایندی، عدم ثبات پارامترهای کنترل و خطاهای راهبری (Modarres et al., 1999).

دسته سوم: «اختلالات انسانی و سازمانی» را در برمی‌گیرد، مانند ضعف هماهنگی میان واحدها، انتقال ناقص اطلاعات، تصمیم‌گیری دیرهنگام، کمبود آموزش، فرسودگی نیروی انسانی، یا ساختارهای اداری غیرمنعطف (Azadeh et al., 2017).

دسته چهارم: «اختلالات بیرونی و محیطی‌اند»؛ نظیر تحریم، جنگ، بحران تأمین قطعات، قطعی انرژی، حوادث طبیعی، و حملات سایبری (Roach & Al-Saidi, 2021).

1. Resilience Engineering

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

دسته پنجم: «اختلالات ترکیبی یا آبشاری» هستند که در آن یک رویداد اولیه زنجیره‌ای از پیامدها را در چند لایه سامانه فعال می‌کند (Kammouh et al., 2020).

اهمیت این طبقه‌بندی در آن است که نشان می‌دهد همه اختلالات صنعتی ماهیت یکسان ندارند و همه آن‌ها با یک نوع ابزار تحلیلی یا یک الگوی برنامه‌ریزی قابل مدیریت نیستند (Wei et al., 2025). برخی اختلالات تکرارشونده و قابل مدل‌سازی‌اند، اما برخی دیگر نادر، پیچیده، چندعاملی و دارای پیامدهای نامتناسب هستند. نگهداشت در صورتی می‌تواند در برابر چنین طیفی از اختلالات کارآمد باشد که فقط بر خرابی‌های قابل پیش‌بینی متمرکز نباشد، بلکه ظرفیت مدیریت تغییر، ابهام و فشار را نیز در خود نهادینه کند (Antonelli et al., 2025).

تفاوت بنیادین مهندسی تاب‌آوری در برابر مدیریت ریسک و قابلیت اطمینان

مدیریت ریسک، قابلیت اطمینان و مهندسی تاب‌آوری، هر سه به ارتقای پایداری سامانه کمک می‌کنند، اما منطق آن‌ها یکسان نیست (Hosseini et al., 2016). قابلیت اطمینان[۲] بر احتمال عملکرد درست یک جزء یا سامانه در بازه‌ای مشخص و تحت شرایط معلوم متمرکز است (Dhillon, 2006). این نگاه برای تحلیل خرابی‌های تکرارشونده، طراحی برنامه‌های تعمیرات پیشگیرانه، محاسبه شاخص‌هایی نظیر میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF[۳]) و میانگین زمان تعمیرات (MTTR[۴])، و بهینه‌سازی برنامه‌های نگهداشت بسیار سودمند است (Moubray, 1997). مدیریت ریسک[۵] نیز بر شناسایی مخاطرات، برآورد احتمال و پیامد، و اولویت‌بندی اقدامات کنترلی تمرکز دارد (Modarres et al., 1999). این دو رویکرد شالوده بسیاری از نظام‌های فنی مدرن را ساخته‌اند و همچنان ضروری‌اند. بااین‌حال، مهندسی تاب‌آوری از منظر دیگری به مسئله می‌نگرد (Hollnagel, 2017). این رویکرد نه‌فقط می‌پرسد «چه چیزی ممکن است خراب شود؟» یا «ریسک کدام رخداد بیشتر است؟»، بلکه می‌پرسد «چگونه سامانه در شرایط متغیر همچنان کار می‌کند؟»، «چه چیزی باعث می‌شود عملکرد قابل‌قبول حفظ شود؟»، و «چه ظرفیت‌هایی باید ایجاد شود تا سازمان در شرایط فراتر از الگوهای شناخته‌شده از هم نپاشد؟ (Woods, 2015). در واقع، مدیریت ریسک و قابلیت اطمینان غالباً بر شکست‌ها، تهدیدها و نقاط آسیب تمرکز دارند، درحالی‌که مهندسی تاب‌آوری علاوه بر شکست، به منطق موفقیت نیز توجه می‌کند؛ یعنی به اینکه کار روزمره چگونه در عمل پیش می‌رود و سازمان چگونه با تطبیق‌های کوچک و تصمیم‌های خط مقدم، عملکرد پایدار را حفظ می‌کند (Hollnagel, 2014). در اینجا تفاوتی مهم با منطق سنتی آشکار می‌شود. در رویکردهای کلاسیک، انحراف از رویه معمولاً به‌مثابه خطا دیده می‌شود، اما در مهندسی تاب‌آوری، بخشی از این انحراف‌ها می‌توانند نشانه ظرفیت سازگاری باشند (Dekker, 2011). به‌بیان‌دیگر، سامانه‌های پیچیده فقط با اتکای کامل به دستورالعمل‌های ثابت عمل نمی‌کنند؛ آن‌ها ازطریق قضاوت حرفه‌ای، هماهنگی بین‌واحدی و اصلاح مستمر رویه‌ها زنده می‌مانند (Weick & Sutcliffe, 2007).

استانداردسازی در مسیر تاب‌آوری و آشنایی با استانداردهای تاب‌آوری

در سطح جهانی، گسترش مفهوم تاب‌آوری سازمانی موجب تدوین استانداردهای متعددی برای هدایت سازمان‌ها در طراحی، سنجش و تقویت تاب‌آوری شده است. از مهم‌ترین این استانداردها می‌توان به ISO 22316:2017 اشاره کرد که به‌عنوان استاندارد مادر در حوزه تاب‌آوری سازمانی شناخته می‌شود. این استاندارد، تاب‌آوری را «توانایی یک سازمان برای جذب و سازگاری در یک محیط دائماً در حال تغییر» تعریف می‌کند و اصول و ویژگی‌های لازم برای تقویت تاب‌آوری را در اختیار سازمان‌ها قرار می‌دهد. بر اساس این استاندارد، تاب‌آوری صرفاً خروجی یک برنامه اضطراری نیست، بلکه محصول هم‌راستایی راهبرد، حاکمیت، فرهنگ، منابع، آموزش، زیرساخت و فرایندهای تصمیم‌گیری است(ISO 22316, 2017). در ادامه، ISO 22336:2024 به‌عنوان مکمل این استاندارد، راهنمای عملیاتی تدوین خط‌مشی و راهبرد تاب‌آوری سازمانی را ارائه می‌دهد. این

2. Reliability
3. Mean Time Between Failures
4. Mean Time to Repair
5. Risk Management

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

استاندارد شامل فرایندهای تدوین خط‌مشی، برنامه‌ریزی راهبردی، تعیین اولویت‌های اجرایی و ایجاد سازوکارهای هماهنگی برای ارتقای تاب‌آوری در سراسر سازمان است و برای تمامی سازمان‌ها، فارغ از اندازه و نوع صنعت، قابل استفاده می‌باشد (ISO 22336, 2024).

استانداردهای تاب‌آوری معمولاً چند پیام محوری دارند. نخست آنکه تاب‌آوری صرفاً خروجی یک برنامه اضطراری نیست، بلکه محصول هم‌راستایی راهبرد، حاکمیت، فرهنگ، منابع، آموزش، زیرساخت و فرایندهای تصمیم‌گیری است (ISO 22336, 2024). دوم آنکه تاب‌آوری نیازمند پایش مستمر، یادگیری از تجربه و آمادگی برای واکنش در سطوح مختلف اختلال است (Hollnagel, 2017). سوم آنکه سازمان تاب‌آور، سازمانی است که در آن اطلاعات به‌موقع جریان دارد، مسئولیت‌ها روشن‌اند، ساختار فرماندهی در بحران تعریف شده و ظرفیت هماهنگی بین بخش‌ها وجود دارد (Weick & Sutcliffe, 2007). برای حوزه نگهداشت، این استانداردها مبنای بسیار مهمی فراهم می‌کنند (Deighton, 2016). آن‌ها کمک می‌کنند تا تاب‌آوری از سطح یک ایده عمومی به سطح معیارهای قابل‌سنجش تنزل یابد؛ یعنی بتوان درباره تعهد مدیریت، کفایت منابع، آمادگی نیروی انسانی، امنیت اطلاعات صنعتی، سازوکارهای ارتباطی، و توان واکنش و بازیابی به‌صورت ساختاریافته سخن گفت (Wireman, 2015). ازاین‌رو، هر چهارچوب ارزیابی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری که بخواهد قابلیت اجرایی داشته باشد، ناگزیر است با منطق این استانداردها هم‌سخن باشد (Karar, Labib, & Jones, 2024).

تعاریف و مفاهیم نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری (REBM)

نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری (REBM[۶]) را می‌توان راهبردی دانست که هدف آن فقط پیشگیری از خرابی یا کاهش هزینه تعمیرات نیست، بلکه حفظ و بازگردانی قابلیت عملیاتی سامانه در مواجهه با اختلالات، تغییرات ناگهانی و شرایط پیش‌بینی‌نشده است (Bukowski & Werbińska-Wojciechowska, 2025). در این نگاه، موفقیت نگهداری زمانی محقق می‌شود که سازمان نه‌فقط در شرایط نرمال، بلکه در شرایط فشار، کمبود، ابهام و بحران نیز بتواند کارکردهای حیاتی خود را حفظ کند (Sun, Yang, & Wang, 2022). نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری (REBM)، جایگزین رویکردهایی مانند نگهداشت قابلیت اطمینان محور (RCM[۷]) و بازرسی‌های ریسک محور (RBI[۸]) نیست، بلکه آن‌ها را در سطحی بالاتر تکمیل می‌کند (Karar, Labib, & Jones, 2024). روش RCM با تمرکز بر کارکردها، حالت‌های خرابی، علل و پیامدها، پایه‌ای مهم برای تصمیم‌گیری نگهداری فراهم می‌سازد (Moubray, 1997). روش RBI نیز با اولویت‌بندی بازرسی و تخصیص منابع بر مبنای ریسک، کارایی مدیریت دارایی‌ها را افزایش می‌دهد (Elwerfalli, Alsadaie, & Mujtaba, 2025). بااین‌حال، هر دو رویکرد غالباً بر محیط‌هایی تکیه دارند که در آن داده تاریخی، الگوهای قابل‌شناسایی، و سطحی از ثبات عملیاتی وجود دارد (Azadeh et al., 2017). روش REBM به این بنیان، ظرفیت مواجهه با ناشناخته‌ها، اختلالات آبشاری، و شرایط فراتر از سناریوهای رایج را اضافه می‌کند (Yang et al., 2023).

در ادبیات تاب‌آوری، معمولاً دو دسته ظرفیت برای تحلیل سامانه‌ها برجسته می‌شود دسته نخست، ظرفیت‌های کارکردی‌اند که شامل پایش[۹]، پاسخ‌دهی[۱۰] ، یادگیری [۱۱]و پیش‌بینی[۱۲] می‌شوند. این منطق، به‌ویژه در شبکه ارزیابی تاب‌آوری (RAG[۱۳]) هولناگل، جایگاه مهمی دارد (Hollnagel, 2017). دسته دوم، ظرفیت‌های عملیاتی‌اند که شامل جذب[۱۴]، سازگاری[۱۵]، بازیابی[۱۶] و

6. Resilience-Based Maintenance (REBM)
7. Reliability-Centered Maintenance(RCM)
8. Risk-Based Inspection (RBI)
9. Monitor
10. Respond
11. Learn
12. Anticipate
13. Resilience Assessment Grid (RAG)
14. Absorptive
15. Adaptive
16. Restorative

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

تحول‌آفرینی[17] هستند (Chivunga et al., 2025). این دسته نشان می‌دهد که سامانه پس از وقوع اختلال چه می‌کند: آیا فقط ضربه را تحمل می‌کند، آیا آرایش خود را تغییر می‌دهد، آیا به سطحی قابل‌قبول از عملکرد بازمی‌گردد، و آیا برای جلوگیری از تکرار شکست، ساختار یا منطق عملکرد خود را متحول می‌کند (Dui et al., 2023). بر این مبنا، نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری باید فراتر از یک مجموعه فعالیت تعمیراتی تعریف شود. این رویکرد باید به‌عنوان یک سامانه اجتماعی–فنی دیده شود که در آن تجهیزات، انسان، داده، تجربه، ساختار، فرهنگ و محیط در تعامل هستند (Azadeh et al., 2017). درست در همین نقطه است که نگهداشت از یک کارکرد پشتیبان به یک قابلیت راهبردی برای بقا و پایداری سازمان تبدیل می‌شود (Deighton, 2016).

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به موضوع نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها را از منظر سیر تاریخی و تکامل موضوعی می‌توان به چهار دوره تقسیم کرد: دوره شکل‌گیری مفاهیم پایه، دوره توسعه روش‌های ارزیابی، دوره یکپارچه‌سازی با فناوری‌های نوین، و دوره بلوغ و ارائه چهارچوب‌های جامع.

دوره اول: شکل‌گیری مفاهیم پایه و رویکردهای اولیه: در این دوره، پژوهش‌ها عمدتاً بر تعریف مفاهیم پایه و توسعه روش‌های اولیه ارزیابی متمرکز بوده‌اند.

مطالعه لی[18] و همکاران (۲۰۱۵) در ارائه تجارب عملیاتی‌سازی مهندسی تاب‌آوری در نگهداشت نیروگاهی، نشان داد که تغییر نگرش از «سرزنش» به «یادگیری» و رویکرد میان به بالا کلید موفقیت در پیاده‌سازی تاب‌آوری است. آن‌ها تأکید کردند که عملیاتی‌سازی مهندسی تاب‌آوری در نگهداشت، با تغییر زبان و تغییر نگرش آغاز می‌شود و نیازی به سرمایه‌گذاری‌های کلان یا سیستم‌های نرم‌افزاری پیچیده ندارد؛ آنچه لازم است، اراده مدیریت برای پذیرش تنوع، اعتماد به اپراتورهای خبره و تعهد به یادگیری مستمر است. این پژوهش، یکی از نخستین تلاش‌ها برای عملیاتی‌سازی مهندسی تاب‌آوری در محیط‌های صنعتی واقعی محسوب می‌شود و پایه‌ای برای پژوهش‌های بعدی در حوزه نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری فراهم آورد. در تحقیقی آزاده و همکاران به بررسی تأثیر افزونگی بر مهندسی تاب‌آوری در یک کارخانه پتروشیمی با استفاده از تحلیل پوششی داده‌ها (DEA[19]) پرداخت و نشان داد که هر دو نوع افزونگی انسانی و تجهیزاتی کارایی تاب‌آوری را افزایش می‌دهند، اما افزونگی انسانی اثر بیشتری از افزونگی تجهیزاتی دارد (Azadeh et al., 2016). این یافته، اهمیت سرمایه‌گذاری بر روی نیروی انسانی خبره را در کنار تجهیزات پشتیبان برجسته می‌سازد. همچنین، آزاده و همکاران با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی مبتنی بر اجماع خبرگان، ابزاری استاندارد ۵۰ سؤالی برای ارزیابی مهندسی تاب‌آوری در سازمان‌های نگهداشت توسعه داد. این ابزار در ۱۱ اداره نگهداشت منطقه‌ای یک شرکت بزرگ گازی پیاده‌سازی و اعتبارسنجی شد و رابطه نزدیک میان مهندسی تاب‌آوری و عوامل شکل‌دهنده عملکرد را تأیید کرد (Azadeh et al., 2017). این پژوهش نشان داد که برای ارزیابی مؤثر تاب‌آوری در سازمان‌های نگهداشت، باید هم به مؤلفه‌های فنی توجه کرد و هم به عوامل انسانی و سازمانی. الهال واجی[20] و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی بنیادین، ۱۲ راهبرد کلیدی برای طراحی تاب‌آور صنایع فرایندی در برابر سوانح شناسایی کردند که شامل طراحی ایمن در حالت شکست، افزونگی، بازپیکربندی‌پذیری، ماژولار بودن، تغییرکاربری‌پذیری، انعطاف‌پذیری، کنترل‌پذیری، قابلیت اطمینان، بازیابی‌پذیری، سرعت، استحکام و منابع‌مندی می‌شود. این راهبردها پایه‌ای محکم برای طراحی سیستم‌های نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری فراهم می‌کنند و به‌عنوان یکی از منابع کلیدی در تدوین چهارچوب‌های ارزیابی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری مورداستفاده قرار گرفته‌اند. بوکوفسکی و وربینسکا–وویچیخوفسکا[21] (۲۰۲۱) با معرفی مفهوم «نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری» به‌عنوان یک رویکرد مفهومی، چهارچوبی اولیه برای ادغام مفاهیم تاب‌آوری در تصمیم‌گیری‌های نگهداشت ارائه کردند. آن‌ها با

17 Transformative
18 Lay
19 Data Envelopment Analysis (DEA)
20 El-Halwagi
21 Bukowski & Werbińska-Wojciechowska

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

استفاده از منطق فازی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های نگهداشت بر اساس مفهوم REBM، نشان دادند که رویکردهای مبتنی بر تاب‌آوری می‌توانند در شرایط عدم قطعیت، انتخاب راهبردهای نگهداشت را بهبود بخشند.

دوره دوم: توسعه روش‌های ارزیابی و مدل‌های کمی: در این دوره، پژوهش‌ها به سمت توسعه روش‌های کمی و مدل‌های ریاضی برای ارزیابی تاب‌آوری حرکت کردند:

پاوار[۲۲] و همکاران (۲۰۲۱) در مرور جامعی بر کاربردهای اصول مهندسی تاب‌آوری در سیستم‌های صنعتی، چهار خلأ پژوهشی اصلی را شناسایی کردند: عوامل اجتماعی–فنی، سوانح چندگانه، بهینه‌سازی طراحی برای تاب‌آوری، و راهبردهای کارآمد بازیابی. این مرور نشان داد که بخش مهمی از مطالعات صنایع فرایندی بر پیشگیری، مقاومت و جذب اختلال متمرکز بوده‌اند و راهبردهای بازیابی و بهینه‌سازی طراحی کمتر توسعه یافته‌اند. این شکاف‌های پژوهشی، مسیر تحقیقات بعدی را مشخص کردند. راچ و ال سعیدی[۲۳] (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای تطبیقی بر بازسازی زیرساخت‌های آب و انرژی در مناطق درگیر خاورمیانه، تأکید کردند که بازسازی باید بین یکپارچگی شبکه و گزینه‌های محلی/غیرمتمرکز تعادل برقرار کند و ظرفیت محلی، اعتماد، نهادها و منابع قابل‌استفاده مجدد را لحاظ نماید. این یافته‌ها برای طراحی معماری کریدورهای تاب‌آور و تعیین سطح تمرکز، ماژولاریتی و قابلیت جداسازی بسیار مفید است. یانگ[۲۴] و همکاران (۲۰۲۳) در مرور جامعی بر تاب‌آوری سامانه‌های خطوط لوله گاز طبیعی، روش‌های ارزیابی را در سه گروه ساخت شاخص، تحلیل فرایند و شبکه پیچیده طبقه‌بندی کردند و بر اهمیت تحلیل کل فرایند مقاومت، پاسخ، سازگاری و بازیابی تأکید نمودند.

کرار[۲۵] و همکاران (۲۰۲۴)، چهارچوب بهینه‌سازی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری (REBMO[۲۶]) را ارائه کردند که با استفاده از روش‌های AHP و Knapsack، نوسانات محیط عملیاتی را جذب کرده و عملکرد دارایی را در هزینه بهینه و ریسک قابل‌قبول حفظ می‌کند. این چهارچوب همچنین شبکه بحرانی بودن را معرفی می‌کند که پروفایل ریسک را از سطح حالت خرابی تا سطح واحد نمایش می‌دهد. این پژوهش یکی از جامع‌ترین چهارچوب‌های عملیاتی برای پیاده‌سازی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری است و در صنایع مختلف قابلیت کاربرد دارد. آنتونلی[۲۷] و همکاران (۲۰۲۵) مدلی احتمالاتی برای تاب‌آوری خطوط لوله تحت تأثیر هم‌زمان خوردگی و انحراف متغیرهای فرایندی ارائه کردند که امکان مقایسه اثر اقدامات ضدخوردگی، کنترل فرایند، کاهش پیامد و تعمیر را در چهارچوب مدیریت یکپارچگی دارایی فراهم می‌کند. این مدل با رویکرد قابلیت اطمینان‌محور، پیوند مستقیمی بین خوردگی، پایش وضعیت و منحنی تاب‌آوری ایجاد می‌کند.

این پژوهش، یکی از جامع‌ترین مرورهای انجام‌شده در حوزه تاب‌آوری خطوط لوله گاز طبیعی محسوب می‌شود و روش‌های مختلف ارزیابی تاب‌آوری را به‌خوبی دسته‌بندی کرده است. دوی[۲۸] و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی نقش معیارهای اهمیت در مدیریت تاب‌آوری و نگهداشت پرداخته و کاربردهای آن را در فاز اختلال بررسی کردند. این مطالعه که در نشریه منتشر شده، نشان داد که معیارهای اهمیت می‌توانند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای اولویت‌بندی اقدامات نگهداشت در شرایط محدودیت منابع و شناسایی اجزای حیاتی سیستم به کار روند این پژوهش با مرور ۱۲۸ منبع معتبر، روابط متقابل میان معیارهای اهمیت، نگهداشت و تاب‌آوری را تحلیل کرده و جهت‌گیری‌های آینده را برای مدیریت تاب‌آوری مبتنی بر معیارهای اهمیت ترسیم نموده است. بی‌نتی[۲۹] (۲۰۲۳) در پژوهشی درباره بازسازی زیرساخت‌های انرژی نشان داد که فعالیت‌های توسعه‌ای در زمینه بازسازی و نوسازی، در کوتاه‌مدت و میان‌مدت می‌تواند به احیای تولید کمک کند. هو[۳۰] و همکاران (۲۰۲۳) در مروری بر ایمنی فرایند

22. Pawar
23. Roach & Al-Saidi
24. Yang
25. Karar
26. Resilience-based Maintenance Optimisation
27. Antonelli
28. Dui
29. Binetti
30. Hu

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

پتروشیمی، سه قابلیت ضروری را معرفی کردند: ادراک همه‌جانبه وضعیت (آگاهی موقعیتی)، استنتاج و شبیه‌سازی کل فرایند حادثه، و پشتیبانی تصمیم‌گیری چندسطحی. این پژوهش نشان داد که پیش‌بینی خطا از تشخیص پس از وقوع مهم‌تر است و این یافته برای طراحی سیستم‌های پایش و پیش‌بینی در نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری بسیار حیاتی است. کامو[۳۱] و همکاران (۲۰۲۰) چهارچوب احتمالاتی مبتنی بر شبکه بیزی و شبکه بیزی پویا را برای ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی توسعه دادند. این چهارچوب امکان مدل‌سازی تحول زمانی عملکرد، وابستگی شاخص‌ها و پیش‌بینی وضعیت تاب‌آوری از شرایط اولیه را فراهم می‌کند. این روش، یکی از قدرتمندترین ابزارهای کمی برای ارزیابی تاب‌آوری در شرایط عدم قطعیت محسوب می‌شود.

دوره سوم: یکپارچه‌سازی با فناوری‌های نوین و رویکردهای سیستمی: جدیدترین پژوهش‌ها به سمت یکپارچه‌سازی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری با فناوری‌های نوین و رویکردهای سیستمی حرکت کرده‌اند.

بوکوفسکی و وربینسکا–وویچیخوفسکا (۲۰۲۵) با مرور نظام‌مند ادبیات REBM در چهارچوب نگهداشت نسل پنجم[۳۲]، با استفاده از متدولوژی PRISMA و تحلیل کتاب‌سنجی، نشان دادند که REBM با سه رکن صنعت پنجم[۳۳]، یعنی تاب‌آوری، پایداری و انسان‌محوری هم‌راستا است. یافته‌های کلیدی این مرور نشان می‌دهد که روش‌های هوش مصنوعی(AI[۳۴]) مانند یادگیری ماشین (ML[۳۵]) و دوقلوی دیجیتال(DT[۳۶]) نقش محوری در افزایش تاب‌آوری سیستم‌ها ازطریق REBM ایفا می‌کنند. آن‌ها همچنین شکاف‌های تحقیقاتی را در حوزه قابلیت توضیح‌پذیری هوش مصنوعی، پیاده‌سازی بخش‌محور و یکپارچگی ارگونومیک شناسایی کردند. این مطالعه چشم‌انداز رویکرد REBM را در بستر وسیع‌تر در صنعت پنجم ارائه می‌دهد. وی[۳۷] و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از مدل‌سازی پویایی سیستم، چهارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری ایمنی خطوط انتقال گاز در پارک‌های صنایع شیمیایی ارائه کردند و عوامل کلیدی نظیر کیفیت طراحی و ساخت، مدیریت بهره‌برداری و نگهداشت، آمادگی اضطراری و پایش هوشمند را شناسایی نمودند. این پژوهش نشان داد که کیفیت طراحی و ساخت، مدیریت بهره‌برداری و نگهداشت، آمادگی اضطراری، پایش هوشمند، کیفیت داده و فناوری‌های نو از عوامل اثرگذار کلیدی در تاب‌آوری خطوط انتقال گاز هستند. قالجاهی[۳۸] و همکاران (۲۰۲۵) در مروری بر ارزیابی تاب‌آوری صنایع فرایندی، نشان دادند که شبکه بیزی پویا رایج‌ترین روش کمی برای ارزیابی تاب‌آوری است و قابلیت مدل‌سازی عدم قطعیت، جذب، انطباق، بازیابی و تعامل اجزای سیستم پیچیده را دارد. اسماعیلوف و نوری[۳۹] (۲۰۲۵) با مرور نظام‌مند بر استراتژی‌های مهندسی آشوب برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های سایبر–فیزیکی و کنترل صنعتی، نشان دادند که تزریق کنترل‌شده خطا، اختلال حسگر و حملات شبیه‌سازی‌شده، ضعف‌های پنهان را آشکار می‌کند و اجرای ماژولار، دوقلوی دیجیتال و محیط‌های ابری می‌توانند آزمون تاب‌آوری را ایمن‌تر و هدفمندتر کنند. دل پرتی[۴۰] و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی بر الگوریتم‌های پیش‌بینی برای نگهداشت صنعتی، عملکرد شبکه‌های عصبی عمیق LSTM و Transformer را در پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده تجهیزات مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مدل LSTM در داده‌های کم‌حجم حدود ۴۰ درصد در R^2 و ۴۳ درصد در MSE بهتر از Transformer عمل می‌کند. این یافته، ضرورت توجه به محدودیت‌های داده‌ای در طراحی سیستم‌های پیش‌بینی را برجسته می‌سازد. الورفالی[۴۱] و همکاران (۲۰۲۵) رویکرد نگهداشت مبتنی بر ریسک و تاب‌آوری را در واحد تولید برق کارخانه گاز شرکت نفت سیرت (لیبی) پیاده‌سازی کردند و با استفاده از تحلیل درخت خطا و شبیه‌سازی مونت‌کارلو، کاهش حدود ۴/۶۵ درصدی زمان توقف را گزارش نمودند. این مطالعه موردی عینی،

31. Kammouh
32. Maintenance 5.0
33. Industry 5.0
34. Artificial Intelligence (AI)
35. Machine Learning
36. Digital Twin
37. Wei
38. Ghaljahi
39. Ismailov & Noori
40. Del Prete
41. Elwerfalli

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

اثربخشی REBM را در یک محیط صنعتی واقعی نشان می‌دهد. مرور نظام‌مند دیگری توسط هوست[۴۲] و همکاران (۲۰۲۵)، با هدف بررسی رویکردهای تاب‌آوری در سیستم‌های تولیدی انجام شده است. باتوجه‌به دیجیتالی شدن روزافزون سیستم‌های تولیدی صنعتی در چهارچوب صنعت چهارم و آسیب‌پذیری‌های ناشی از آن (مانند ریسک‌های سایبری و وابستگی به اتصال شبکه)، این مطالعه به‌طور سیستماتیک به‌مرور رویکردهای تاب‌آوری در سیستم‌های تولیدی پرداخته است. چی ونگا[۴۳] و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از چهارچوب AFLEPT (پیشگیرانه، جذب، سازگاری، بازیابی و تحول‌آفرینی) تاب‌آوری شبکه برق مالاوی را در برابر طوفان سیکلون آنا ارزیابی کردند و نشان دادند که این چهارچوب می‌تواند شکاف‌های موجود در ظرفیت‌های تاب‌آوری را به‌خوبی شناسایی کند. محقر و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از روش فراترکیب و بررسی نظام‌مند، به تبیین مؤلفه‌های نگهداشت هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیاء با رویکرد «ناب، چابک، تاب‌آور، سبز» در صنعت هواپیمایی پرداختند. یافته‌های پژوهش به شناسایی ۴۴ کد باز و ۲۰ کد محوری منجر شد که در چهار مقوله اصلی شامل انگیزه‌های درون‌سازمانی، انگیزه‌های برون‌سازمانی و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده دسته‌بندی گردید. این پژوهش نشان می‌دهد که فناوری اینترنت اشیاء می‌تواند به‌طور هم‌زمان نمایانگر ویژگی‌های رویکرد ناب، چابک، تاب‌آور و سبز باشد و مدلی تبیینی جامع از نگهداری تعمیرات هوشمند ارائه می‌کند. همچنین رمضانی و همکاران (۲۰۲۶) در پژوهشی یک مدل نوین نگهداشت پیشگیرانه برای دستگاه پرس سرعت بالا توسعه دادند. مدل پیشنهادی به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با هدف کمینه‌سازی زمان و هزینه و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان فرموله شده است. برای حل این مسئله، از الگوریتم‌های فراابتکاری NSGA-II و گرگ خاکستری استفاده شده و کارایی مدل ازطریق حل نمونه‌های کوچک‌مقیاس مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی قادر است با تعیین زمان‌های بهینه برای انجام نگهداشت پیشگیرانه، هزینه‌ها را کاهش داده و زمان ازکارافتادگی دستگاه را به حداقل برساند. مظفری (۲۰۲۵) در مقاله‌ای با رویکرد تحلیلی–تطبیقی، به بررسی نقش اقدامات پیشگیرانه و فناوری‌های هوشمند در ارتقای تاب‌آوری تأسیسات شهری پرداخته است. این پژوهش با تحلیل تطبیقی میان شهرهای منتخب ایران و نمونه‌های موفق جهانی، نقاط قوت و ضعف سیاست‌گذاری و اجرای برنامه‌های تاب‌آوری را شناسایی کرده و با تمرکز بر ابزارهای فناورانه نظیر سامانه‌های هشدار سریع، حسگرهای هوشمند، داده‌کاوی شهری و مدیریت بحران مبتنی بر هوش مصنوعی، ظرفیت‌های بالقوه برای ارتقای پایداری عملکرد شهری را ارزیابی نموده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که هم‌افزایی میان مدیریت پیشگیرانه، برنامه‌ریزی یکپارچه و بهره‌برداری هدفمند از فناوری‌های هوشمند، می‌تواند به‌طور مؤثری منجر به کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری و افزایش تاب‌آوری در برابر بحران‌ها شود.

دوره چهارم: مدل‌های بلوغ و ارائه چهارچوب‌های جامع

تاپزالی[۴۴] و همکاران (۲۰۲۶) در پژوهشی بر حکمرانی دیجیتال و بازسازی زیرساخت پس از جنگ، نشان دادند که بلوغ دیجیتال ازطریق تقویت اعتماد نهادی و اثربخشی حکمرانی، تأثیر مثبتی بر نتایج بازسازی زیرساخت‌ها دارد. این یافته، ضرورت هم‌راستایی سرمایه‌گذاری‌های فناورانه با ساختارهای حاکمیتی را در مسیر تاب‌آوری نگهداشت برجسته می‌سازد. زارعی و کشاورزی (۲۰۲۶) با هدف شناسایی و تحلیل موانع استقرار نگهداشت پیش‌بینانه پایدار در تجهیزات صنعتی یک مجتمع پتروشیمی، با مشارکت شش خبره صنعتی و استفاده از روش‌های دلفی فازی و دیمتل، ۲۱ مانع را در پنج بعد سازمانی، اجتماعی، زیست‌محیطی، فناورانه و مالی شناسایی کردند. یافته‌ها نشان داد موانع فناورانه و اجتماعی به‌عنوان اصلی‌ترین عوامل علّی (با مقادیر تأثیر خالص ۱/۱۷۸ و ۱/۶۵۳) سایر موانع را تحت تأثیر قرار می‌دهند و موانع زیست‌محیطی، سازمانی و مالی در گروه عوامل تأثیرپذیر قرار گرفتند. این پژوهش بر ضرورت تدوین راهبرد نگهداشت سبز، ارتقای آگاهی و مهارت کارکنان و توسعه قابلیت‌های فناورانه تأکید دارد. گل‌نهالی و همکاران (۲۰۲۵) با هدف طراحی الگوی مدیریت نگهداشت بهرور فراگیر و انتخاب

42. Hostos
43. Chivunga
44. Topazly

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

بهترین راهبرد نگهداری، به بررسی مؤلفه‌های کلیدی این رویکرد پرداختند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که پیاده‌سازی موفق نگهداشت جامع بهره‌ور نیازمند توجه هم‌زمان به ابعاد فنی، انسانی و مدیریتی است و انتخاب راهبرد نگهداری مناسب باید بر اساس شرایط عملیاتی و نوع تجهیزات انجام شود. فروزان و همکاران (۲۰۲۳) با هدف بررسی کاربرد نگهداشت مبتنی بر ریسک به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری و تداوم کارکرد در سازمان‌ها، به ارزیابی و اولویت‌بندی راهبردهای مختلف نگهداری با استفاده از تحلیل ریسک و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد مبتنی بر ریسک در نگهداشت می‌تواند آسیب‌پذیری سیستم را کاهش داده و تداوم کارکرد را در شرایط مختلف تضمین کند. این پژوهش به‌صراحت نشان می‌دهد که نگهداری مبتنی بر ریسک فراتر از یک رویکرد هزینه‌محور است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای مدیریت آسیب‌پذیری و افزایش پایداری عملیاتی مورداستفاده قرار گیرد. رویکرد مذکور با ظرفیت‌های جذب، سازگاری و بازیابی در چهارچوب نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری هم‌پوشانی دارد (جدول ۱).

جدول ۱. خلاصه پیشینه پژوهش و مؤلفه‌های کلیدی تاب‌آوری نگهداشت

ردیف	نویسندگان	عنوان مقاله/منبع	سال	مؤلفه‌های کلیدی تاب‌آوری	تمرکز بر نگهداشت	حوزه مطالعه
۱	Lay et al.	A Practitioner's Experiences Operationalizing Resilience Engineering	۲۰۱۵	پاسخ‌دهی، پایش، یادگیری، پیش‌بینی	★★★★	عملیاتی‌سازی مهندسی تاب‌آوری در نگهداشت نیروگاهی
۲	Azadeh et al.	The Impact of Redundancy on Resilience Engineering in a Petrochemical Plant by Data Envelopment Analysis	۲۰۱۶	جذب، مقابله	★★★★★	تأثیر افزونگی بر تاب‌آوری در پتروشیمی
۳	Azadeh, et al.	A Consensus-Based AHP for Improved Assessment of Resilience Engineering in Maintenance Organizations	۲۰۱۷	پاسخ‌دهی، پایش، یادگیری، پیش‌بینی	★★★★★	ارزیابی مهندسی تاب‌آوری در سازمان‌های نگهداشت
۴	El-Halwagi et al.	Disaster-Resilient Design of Manufacturing Facilities Through Process Integration	۲۰۲۰	جذب، سازگاری، بازیابی	★★★★	طراحی تاب‌آور صنایع فرایندی
۵	Kammouh et al.	Probabilistic Framework to Evaluate the Resilience of Engineering Systems Using Bayesian and Dynamic Bayesian Networks	۲۰۲۰	پاسخ‌دهی، جذب، سازگاری، بازیابی	★★★	ارزیابی احتمالاتی تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی
۶	Bukowski, & Werbińska-Wojciechowska,	Resilience Based Maintenance: A Conceptual Approach	۲۰۲۱	پاسخ‌دهی، جذب، سازگاری، بازیابی	★★★★★	مفهوم‌سازی REBM با رویکرد فازی
۷	Roach,& Al-Saidi	Rethinking Infrastructure Rehabilitation: Conflict Resilience of Urban Water and Energy Supply	۲۰۲۱	جذب، سازگاری، بازیابی، تحول‌آفرینی	★★★	بازسازی زیرساخت در مناطق درگیری
۸	Pawar et al.	Applications of Resilience Engineering Principles in Different Fields with a Focus on Industrial Systems	۲۰۲۱	پاسخ‌دهی، پایش، یادگیری، پیش‌بینی، جذب، سازگاری، بازیابی	★★★★	مرور کاربردهای مهندسی تاب‌آوری در صنایع
۹	Binetti	Rebuilding Energy Infrastructures and the Manufacturing Sector in Post-Conflict Countries	۲۰۲۳	بازیابی، تحول‌آفرینی	★★	بازسازی زیرساخت انرژی پس از جنگ

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

ردیف	نویسندگان	عنوان مقاله/منبع	سال	مؤلفه‌های کلیدی تاب‌آوری	تمرکز بر نگهداشت	حوزه مطالعه
۱۰	Dui et al.	Importance Measure-based Resilience Management: Review, Methodology and Perspectives on Maintenance	۲۰۲۳	پاسخ‌دهی، جذب، سازگاری، بازیابی، تحول‌آفرینی	★★★★	مدیریت تاب‌آوری مبتنی بر معیارهای اهمیت
۱۱	Hu et al.	Research Status and Prospect of Petrochemical Process Safety	۲۰۲۳	پایش، پیش‌بینی	★★★	ایمنی فرایند پتروشیمی و قابلیت‌های آینده
۱۲	Yang et al.	Resilience of Natural Gas Pipeline System: A Review and Outlook	۲۰۲۳	پاسخ‌دهی، پایش، یادگیری، پیش‌بینی	★★★	مرور تاب‌آوری خطوط لوله گاز طبیعی
۱۳	Karar et al.	A Resilience-Based Maintenance Optimisation Framework Using Multiple Criteria and Knapsack Methods	۲۰۲۴	جذب، سازگاری، پاسخ‌دهی	★★★★★	بهینه‌سازی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری
۱۴	Antonelli et al.	Enhancing Pipeline System Resilience: A Reliability-Centric Approach	۲۰۲۵	جذب، سازگاری، بازیابی	★★★★	مدل احتمالاتی تاب‌آوری خطوط لوله
۱۵	Bukowski, & Werbińska-Wojciechowska	Towards Maintenance 5.0: Resilience-Based Maintenance in AI-Driven Sustainable and Human-Centric Industrial Systems	۲۰۲۵	پاسخ‌دهی، پایش، یادگیری، پیش‌بینی	★★★★★	مرور نظام‌مند REBM در چهارچوب Industry 5.0
۱۶	Elwerfalli et al.	Development of Maintenance Plan for Power-Generating Unit Using Risk-Based Maintenance (REBM) Approach	۲۰۲۵	پاسخ‌دهی، جذب	★★★★★	پیاده‌سازی REBM در واحد تولید برق
۱۷	Ghaljahi et al.	Resilience Assessment in Process Industries: A Review of Literature	۲۰۲۵	پاسخ‌دهی، پایش، یادگیری، پیش‌بینی	★★★★	مرور روش‌های ارزیابی تاب‌آوری صنایع فرایندی
۱۸	Ismailov, & Noori,	Chaos Engineering Strategies for Enhancing Resilience in Complex Cyber-Physical and Industrial Control Systems	۲۰۲۵	پایش، پاسخ‌دهی، جذب	★★★	آزمون تاب‌آوری سیستم‌های کنترل صنعتی
۱۹	Wei et al.	Research on Safety Resilience Evaluation of Gas Transmission Pipelines in Chemical Industry Parks	۲۰۲۵	جذب، سازگاری، بازیابی	★★★★	ارزیابی تاب‌آوری خطوط انتقال گاز
۲۰	et Hostos al.	A Systematic Literature Review of Resilience Approaches in Production Systems	۲۰۲۵	پاسخ‌دهی، جذب، سازگاری، بازیابی	★★★	مرور رویکردهای تاب‌آوری در سیستم‌های تولیدی
۲۱	Del Prete et al.	Predictive Algorithms for Maintenance Planning and Optimization in Industrial Applications	۲۰۲۵	پیش‌بینی	★★★★	الگوریتم‌های پیش‌بینی برای نگهداشت صنعتی
۲۲	Chivunga et al.	Assessing the Resilience of Malawi's Power Grid Using AFLEPT Metric Framework	۲۰۲۵	جذب، سازگاری، بازیابی، تحول‌آفرینی	★★	ارزیابی تاب‌آوری شبکه برق
۲۳	Topazly et al.	Institutional Trust and Governance Effectiveness as Mediators in Transforming Digital Maturity into Post-War Infrastructure Recovery	۲۰۲۶	تحول‌آفرینی	★★	حکمرانی و بازسازی دیجیتال پس از جنگ

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

ردیف	نویسندگان	عنوان مقاله/منبع	سال	مؤلفه‌های کلیدی تاب‌آوری	تمرکز بر نگهداشت	حوزه مطالعه
۲۴	رمضانی و همکاران	طراحی مدل ریاضی نگهداشت پیشگیرانه برای دستگاه‌های پرس سرعت‌بالا	۲۰۲۶	جذب، بازیابی	★★★★★	صنعت تولید (دستگاه‌های پرس سرعت‌بالا)
۲۵	مظفری	نقش اقدامات پیشگیرانه و فناوری‌های هوشمند در ارتقاء تاب‌آوری تأسیسات شهری: مطالعه تطبیقی ایران و جهان	۲۰۲۵	پیش‌بینی، پاسخ‌دهی، جذب	★★★	زیرساخت‌های شهری (حمل‌ونقل، انرژی، آب، ارتباطات)
۲۶	گل‌نهالی و همکاران	طراحی الگوی مدیریت نگهداشت بهرور فراگیر (TPM) با استفاده از ترکیب روش‌های تحلیل عاملی و مدل‌سازی ساختاری و تفسیری ISM در شرکت‌های توزیع برق شمال غرب کشور	۲۰۲۵	یادگیری، سازگاری	★★★★★	شرکت‌های توزیع برق
۲۷	فروزان	کاهش آسیب‌پذیری و تداوم کارکرد تحت نگهداری و تعمیر مبتنی بر ریسک	۲۰۲۳	جذب، سازگاری، بازیابی	★★★★★	عمومی (سازمان‌های دفاعی و صنعتی)
۲۸	مطالعه حاضر	ارائه چهارچوبی به‌منظور ارزیابی تاب‌آوری نگهداشت در مواجهه با اختلالات صنعتی	۲۰۲۶	پاسخ‌دهی، پایش، یادگیری، پیش‌بینی، جذب، سازگاری، بازیابی، تحول‌آفرینی، خودپایشی، آگاهی موقعیتی، مقابله، پیشگیرانه	★★★★★	ارائه چهارچوب جامع ارزیابی و پیاده‌سازی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری: مطالعه موردی در صنعت پتروشیمی

راهنما = ★★★★★ تمرکز مستقیم و اصلی بر نگهداشت؛ ★★★★ = تمرکز قوی بر نگهداشت؛ ★★★ = تمرکز متوسط بر نگهداشت؛ ★★ = تمرکز غیرمستقیم بر نگهداشت.

نوآوری پژوهش حاضر

با مرور ادبیات موجود، مشخص می‌شود که اگرچه پژوهش‌های متعددی به جنبه‌های مختلف مهندسی تاب‌آوری و نگهداشت پرداخته‌اند، اما ارائه یک چهارچوب جامع و یکپارچه برای ارزیابی سیستم نگهداشت از منظر تاب‌آوری، با رویکرد عملیاتی و با قابلیت پیاده‌سازی در صنایع، همچنان به‌عنوان یک شکاف پژوهشی باقی مانده است. مهم‌ترین نوآوری‌های پژوهش حاضر را می‌توان در سه محور اصلی خلاصه کرد:

۱. تبیین مفهوم نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری: تعریف و تشریح مفهوم نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری و به یک تعریف جامع بر اساس دیدگاه‌ها و مبانی نظری مهندسی تاب‌آوری، ریسک و قابلیت اطمینان.

۲. ارائه یک چهارچوب یکپارچه و چک‌لیست ارزیابی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری: درحالی‌که بیشتر پژوهش‌های گذشته بر مهندسی تاب‌آوری در ابعاد کلی سازمانی یا ایمنی متمرکز بوده‌اند، این پژوهش یک متدولوژی اختصاصی برای ارزیابی تاب‌آوری در هسته فرایندهای نگهداشت ارائه می‌دهد. این مدل، برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین که صرفاً بر یکی از ابعاد تاب‌آوری متمرکز بوده‌اند، هفت بعد کلیدی شامل مبانی مدیریتی، پاسخ‌دهی، پایش، یادگیری، پیش‌بینی، ظرفیت‌های عملیاتی و پیشگیرانه را در یک چهارچوب یکپارچه پوشش می‌دهد. همچنین، بر اساس مؤلفه‌ها و زیر مؤلفه‌های چهارچوب پیشنهادی، یک چک‌لیست ارزیابی نیز ارائه شد.

۳. اعتبارسنجی چهارچوب پیشنهادی و ارائه نقشه راه پیاده‌سازی: برخلاف بسیاری از پژوهش‌های صرفاً نظری، این تحقیق با مطالعه موردی در یک مجتمع پتروشیمی، قابلیت اجرایی چهارچوب پیشنهادی را در یک محیط صنعتی واقعی نشان داده و نتایج ارزیابی هفت بخش اصلی را به‌صورت کمی ارائه کرده است. این مطالعه موردی نشان می‌دهد که چهارچوب پیشنهادی می‌تواند نقاط قوت و ضعف سیستم نگهداشت را به‌صورت عینی و قابل‌اندازه‌گیری شناسایی کند و مسیر بهبود را مشخص نماید. همچنین با هدف پیاده‌سازی چهارچوب پیشنهادی، یک نقشه راه عملیاتی پنج مرحله‌ای پیشنهاد گردید.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

پرسش‌های تحقیق

بر اساس نوآوری‌های مطرح‌شده، مهم‌ترین پرسش‌های تحقیق شامل:

۱- نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری بر اساس منابع و استانداردهای معتبر شامل چه مفاهیمی است؟

۲-مهم‌ترین مؤلفه‌ها و زیر مؤلفه‌های مؤثر در ایجاد یک چهارچوب نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری کدام‌اند؟

۳-آیا با پیاده‌سازی چهارچوب پیشنهادی امکان کشف نقاط قوت و ضعف صنایع در نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری وجود دارد؟

چهارچوب پیشنهادی ارزیابی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری

چهارچوب پیشنهادی این پژوهش برای ارزیابی و بهبود تاب‌آوری سیستم‌های نگهداشت در پنج گام فرایندی ساختاریافته با رویکرد پیش از اختلال، حین اختلال و پس از اختلال طراحی شده است. این چهارچوب بر اساس پیشینه مطالعات گذشته و نیز استانداردهای مهندسی و مدیریت تاب‌آوری، ریسک و قابلیت اطمینان ارائه شده است که در شکل ۱ قابل‌مشاهده است. تشریح ابعاد و مؤلفه‌های چهارچوب پیشنهادی به شرح زیر است:

گام اول: آمادگی و پیشگیری-پیش از اختلال

هدف: ایجاد بسترها، زیرساخت‌ها و فرهنگ لازم برای تاب‌آوری، پیش از وقوع هرگونه اختلال.

نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری به‌عنوان یک راهبرد آینده‌نگر در حوزه مدیریت دارایی‌های فیزیکی تعریف می‌شود که بر سازگاری‌پذیری سیستم، تحمل‌پذیری خطا و ظرفیت بازیابی در شرایط عدم قطعیت تأکید دارد. این رویکرد فراتر از پیش‌بینی خرابی و پایش وضعیت عمل کرده و اصول سازگاری، افزونگی و خودسازمان‌دهی را در خود ادغام می‌سازد. بر این اساس، نخستین گام در مسیر استقرار نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری، ایجاد بسترهای مدیریتی، فرهنگی و زیرساختی است که بدون آن‌ها، هیچ‌یک از اقدامات بعدی پایدار نخواهد بود. پژوهش‌های معتبر نشان داده‌اند که تاب‌آوری از لایه فنی آغاز نمی‌شود، بلکه بر بستر مدیریتی، فرهنگی و زیرساختی استوار می‌گردد؛ سازمانی تاب‌آور است که تعهد مدیریت ارشد به‌صورت واقعی در اولویت‌گذاری‌ها، تخصیص منابع و پشتیبانی از یادگیری مشاهده شود.

مؤلفه‌های کلیدی این گام عبارت‌اند از:

- **تعهد و حمایت مدیریت ارشد:** بدون حمایت واقعی و مستمر مدیران ارشد، هیچ تحولی در سیستم نگهداشت پایدار نخواهد بود. این حمایت فراتر از تخصیص بودجه صرف است و شامل بازنگری در اولویت‌های سازمانی، به رسمیت شناختن نگهداشت و تعمیرات به‌عنوان یک قابلیت راهبردی، فراهم‌سازی سازوکار تصمیم‌گیری سریع در شرایط بحران، و جلوگیری از قربانی شدن سلامت دارایی‌ها در برابر فشارهای کوتاه‌مدت تولید می‌شود. تجربه نشان داده است که در غیاب این حمایت، هرگونه تلاش برای ارتقای تاب‌آوری در سطح عملیات با شکست مواجه خواهد شد.
- **فرهنگ سازمانی تاب‌آور:** ایجاد فرهنگی که در آن گزارش‌دهی خطاها و نزدیک بودن‌ها[۴۵] بدون ترس از تنبیه انجام شود و رویکرد «یادگیری» جایگزین رویکرد «سرزنش» گردد. فرهنگ سازمانی نقشی تعیین‌کننده در تاب‌آوری دارد؛ اگر سازمان نزدیک حادثه را پنهان کند، گزارش خطا را تنبیه کند، یا موفقیت‌های روزمره را بی‌اهمیت بداند، ظرفیت یادگیری و تطبیق تضعیف می‌شود. همچنین، ایجاد سیستم‌های تشویقی برای گزارش‌دهی علائم هشدار و نزدیک بودن‌ها از مؤلفه‌های کلیدی این بعد به شمار می‌رود. فرهنگ سازمانی تاب‌آور به معنای جایگزینی رویکرد سرزنش با رویکرد یادگیری در مواجهه با خطاها و خرابی‌ها است (شکل ۱).

45. Near Misses

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]



شکل ۱. چهارچوب پیشنهادی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری (REBM)

- **ساختار حاکمیتی و کمیته راهبری:** تشکیل تیم‌های چندوظیفه‌ای از بخش‌های بهره‌برداری، نگهداشت، ایمنی، مهندسی و مدیریت ارشد برای شناسایی سیستماتیک آسیب‌پذیری‌ها و هماهنگی مؤثر فعالیت‌ها. وجود یک ساختار حاکمیتی روشن کمک می‌کند که تصمیم‌های مرتبط با نگهداری، ایمنی، تداوم عملیات و بحران به‌صورت جزیره‌ای اتخاذ نشوند. این ساختار باید اختیارات تصمیم‌گیری در شرایط بحران را به‌طور شفاف تعیین کند تا در زمان بروز اختلال، فرایند تصمیم‌گیری با سرعت و دقت کافی انجام شود.

- **تدوین خط‌مشی و راهبرد تاب‌آوری:** تدوین یک سند راهبردی که اهداف، چهارچوب‌ها و شاخص‌های سنجش تاب‌آوری را مشخص می‌کند و با چشم‌انداز کلان سازمان هم‌راستا باشد. نگهداری تاب‌آور در سازمانی که واحدها اهداف متعارض دارند، به‌سختی پایدار می‌ماند؛ بنابراین اهداف تاب‌آوری نگهداشت باید در برنامه‌های راهبردی و بودجه‌ریزی سالانه لحاظ شود.

- **شناسایی و ارزیابی سیستماتیک ریسک‌ها:** شناسایی تهدیدات بالقوه در طیف گسترده‌ای شامل مخاطرات طبیعی، تهدیدات سایبری، اختلالات عملیاتی، عوامل انسانی و سازمانی، و شوک‌های ژئوپلیتیک، همراه با تحلیل آثار آبشاری آن‌ها بر زیرساخت‌های حیاتی. همچنین، عملکردها و خدمات حیاتی که در صورت اختلال باید در حداقل سطح قابل‌قبول ادامه یابند، باید شناسایی شده و حداقل و حداکثر سطح عملکرد قابل‌قبول در صورت اختلال تعیین گردد.

- **طراحی مبتنی بر تعمیرپذیری و قابلیت اطمینان (DfR/DFM[46]):** لحاظ کردن اصول تعمیرپذیری (دسترسی آسان به قطعات، استانداردسازی اتصالات، مستندسازی مسیرهای عیب‌یابی و قابلیت اطمینان در طراحی تجهیزات از همان ابتدا. طراحی مبتنی بر تعمیرپذیری به کاهش زمان تعمیرات و افزایش دسترس‌پذیری سیستم کمک می‌کند و یکی از ارکان اساسی تاب‌آوری عملیاتی محسوب می‌شود.

- **استقرار زیرساخت‌های فیزیکی و سایبری:** ایجاد افزونگی‌های مؤثر با استقلال کامل ازنظر مسیر، منبع تغذیه و مکان فیزیکی، سیستم‌های پشتیبان حیاتی، و تأمین امنیت سایبری سیستم‌های کنترل صنعتی. استاندارد IEC 62443 به‌عنوان مرجع اصلی امنیت سایبری سیستم‌های کنترل صنعتی، برای محیط‌های صنعتی دیجیتال و متصل جایگاهی حیاتی در ظرفیت تاب‌آوری پیدا می‌کند، زیرا امروزه بسیاری از اختلالات از بسترهای اطلاعاتی و سایبری آغاز می‌شوند.

46. Design for Maintainability and Reliability (DfM/DfR)

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

- **توانمندسازی نیروی انسانی و آموزش‌های تخصصی:** اجرای برنامه‌های آموزش متقاطع[۴۷] برای افزایش انعطاف‌پذیری نیروی انسانی در شرایط بحران، و برنامه‌های جانشین‌پروری برای نقش‌های کلیدی نگهداشت با تأکید بر اپراتورها و تکنسین‌های خبره. شایستگی نیروی انسانی و آموزش مداوم از زیرساخت‌های کلیدی تاب‌آوری محسوب می‌شوند و برنامه‌های آموزش مداوم برای ارتقای مهارت‌های فنی و غیرفنی (تحلیل ریشه‌ای، عیب‌یابی پیشرفته، تصمیم‌گیری در بحران) از الزامات اساسی این بعد است.
- **تعیین آستانه‌های عملکردی:** تعیین حداقل سطح قابل‌قبول تاب‌آوری[۴۸] و حداکثر زمان قابل‌قبول بازیابی[۴۹] برای تجهیزات بحرانی. این آستانه‌ها به سازمان کمک می‌کند تا بداند «چقدر تاب‌آوری کافی است؟» و بودجه خود را بر چه مبنایی تخصیص دهد. پژوهش‌های اخیر در حوزه بهینه‌سازی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری، بر اهمیت تعیین این آستانه‌ها برای تعیین هزینه بهینه نگهداشت تأکید دارند.
- **ایجاد نظام پایش و ارزیابی تاب‌آوری:** استقرار شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs[۵۰]) برای سنجش مستمر وضعیت تاب‌آوری و ارزیابی دوره‌ای سیستم نگهداشت با استفاده از ابزارهای معتبر. سازمان باید به‌طور منظم ارزیابی تاب‌آوری سیستم نگهداشت را انجام دهد و نتایج ارزیابی‌ها و درس‌آموخته‌ها را به‌طور سیستماتیک در برنامه‌های بهبود لحاظ کند.

گام دوم: پایش، هشدار و پیش‌بینی- آستانه اختلال

هدف: شناسایی زودهنگام علائم هشدار و پیش‌بینی اختلالات بالقوه، لحظه وقوع.

پایش در ادبیات تاب‌آوری معنایی گسترده‌تر از Condition Monitoring صرف دارد؛ پایش نه‌فقط تشخیص وضعیت تجهیز، بلکه فهم وضعیت سامانه در سه بعد گذشته، حال و آینده بالقوه است. در شبکه ارزیابی تاب‌آوری (RAG[۵۱]) که توسط اریک هولناگل[۵۲] توسعه یافته، چهار ظرفیت بنیادین برای عملکرد تاب‌آور شناسایی شده است که پایش و پیش‌بینی دو رکن اساسی آن را تشکیل می‌دهند RAG. یک ابزار تشخیصی و تکوینی است که به سازمان کمک می‌کند تا توانایی‌های خود را در چهار بعد کلیدی ارزیابی و بهبود بخشد. این ابزار در پژوهش‌های مختلف برای ارزیابی مهندسی تاب‌آوری در سازمان‌های نگهداشت به کار گرفته شده است.

مؤلفه‌های کلیدی این گام عبارت‌اند از:

- **پایش عملکرد گذشته (تحلیل داده‌های خرابی):** تحلیل سیستماتیک داده‌های تاریخی خرابی و تعمیرات برای شناسایی الگوهای تکرارشونده، روندهای فصلی، و علل ریشه‌ای خرابی‌ها. این تحلیل، پایه‌ای برای پیش‌بینی خرابی‌های آینده فراهم می‌آورد و به سازمان کمک می‌کند تا از تکرار الگوهای شکست جلوگیری کند. پایش گذشته شامل تحلیل خرابی‌های تاریخی، الگوهای توقف، سوابق تعمیراتی و درس‌آموخته‌ها است.
- **پایش عملکرد فعلی (تشخیص لحظه‌ای انحرافات):** تشخیص بهنگام انحرافات پارامترهای عملیاتی کلیدی نظیر دما، فشار، ارتعاش، جریان، و سایر متغیرهای فرایندی. پایش حال بر تشخیص بهنگام انحرافات، مشاهده علائم ضعیف، و درک عملیاتی از وضعیت جاری تمرکز دارد. در محیط‌های صنعتی، ضعف در پایش یکی از ریشه‌های اصلی شکنندگی است؛ بسیاری از بحران‌ها نه به این دلیل رخ می‌دهند که سازمان مطلقاً داده ندارد، بلکه به این دلیل که داده مناسب را در زمان مناسب به فهم عملیاتی تبدیل نمی‌کند.
- **پایش تهدیدات و فرصت‌های پیش‌رو:** شناسایی سیستماتیک تهدیدات خارجی ازجمله تحریم‌ها، تغییرات اقلیمی، تغییرات جمعیت‌شناسی نیروی کار، تغییرات فناوری، و همچنین فرصت‌های بهبود که می‌توانند بر استراتژی‌های نگهداری تأثیر بگذارند.

47. Cross-Training
48. Minimum Acceptable Resilience Level
49. Maximum Acceptable Recovery Time
50. key performance indicator (KPI)
51. Resilience Assessment Grid (RAG)
52. Erik Hollnagel

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

پایش آینده بالقوه به شناسایی تهدیدها، فرصت‌ها و شرایطی مربوط می‌شود که هنوز رخ نداده‌اند اما می‌توانند بر عملکرد اثر بگذارند.

- **خودپایشی (سیستم‌های تشخیص خودکار):** استفاده از سنسورها، الگوریتم‌های تشخیص ناهنجاری و سیستم‌های هشداردهنده برای پایش خودکار عملکرد سیستم و تشخیص انحرافات بدون مداخله خارجی. این ظرفیت به سیستم اجازه می‌دهد تا به‌طور مستمر سلامت خود را پایش کرده و پیش از آنکه اختلالات به بحران تبدیل شوند، آن‌ها را شناسایی نماید.

- **آگاهی موقعیتی (درک کار واقعی):** درک کار واقعی[۵۳] در مقابل کار تصوری[۵۴] ازطریق مشاهده مستقیم و مصاحبه با اپراتورها. آگاهی موقعیتی به معنای درک این است که کار در عمل چگونه انجام می‌شود، نه آن‌گونه که در مستندات تصور می‌شود. اپراتورهای خبره با درک عمیق از سیستم، می‌توانند تغییرات را پیش از وقوع بحران تشخیص دهند و این ظرفیت، پایش را از یک کار صرفاً ابزاری به یک قابلیت شناختی–سازمانی تبدیل می‌کند.

- **تحلیل سناریوهای چندعاملی و ترکیبی:** تدوین و ارزیابی دوره‌ای سناریوهایی که چند منبع اختلال را هم‌زمان درگیر می‌کنند، مانند ترکیب قطع برق، کمبود نیروی متخصص و اختلال زنجیره تأمین. به‌کارگیری روش‌های کیفی نظیر تحلیل سناریو و شبیه‌سازی بحران در کنار سیستم‌های پایش وضعیت هوشمند، به سازمان‌های صنعتی کمک می‌کند تا پیش از مواجهه با اختلال، طرح‌های واکنشی جایگزین را آماده داشته باشند.

- **پیش‌بینی خرابی‌های آینده:** استفاده از مدل‌های آماری، یادگیری ماشین و تکنیک‌های پیش‌بینی برای برآورد زمان باقی‌مانده عمر مفید تجهیزات (RUL[۵۵]) ظرفیت پیش‌بینی در تاب‌آوری، از مدل‌های آماری پیش‌بینی خرابی تجهیزات فراتر رفته و به توانایی کلی سازمان برای درک و آمادگی در برابر تغییرات، تهدیدها و فرصت‌های پیش‌رو در افق‌های زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت اشاره دارد.

گام سوم: پاسخ‌دهی و مقابله–لحظه وقوع اختلال

هدف: واکنش سریع، هدفمند و مؤثر به اختلال در حال وقوع.

پاسخ‌دهی در نگهداشت فقط به معنای «سرعت تعمیر» نیست، بلکه توان سامانه برای طراحی و اجرای پاسخ متناسب با نوع اختلال است. در شبکه ارزیابی تاب‌آوری هولناگل، پاسخ‌دهی یکی از چهار ظرفیت بنیادین محسوب می‌شود .پاسخ‌دهی مؤثر، تلفیقی از انضباط اجرایی، سرعت تشخیص، کیفیت برنامه‌ریزی، داوری حرفه‌ای، و هماهنگی بین واحدی است. پاسخ‌دهی را می‌توان در چهار سطح متفاوت بررسی کرد که هر یک الزامات، منابع و رویه‌های متفاوتی را طلب می‌کنند.

مؤلفه‌های کلیدی این گام عبارت‌اند از:

- **واکنش به شرایط عادی و برنامه‌ریزی‌شده:** اجرای برنامه‌های نگهداشت پیشگیرانه و تعمیرات برنامه‌ریزی‌شده در شرایط عملیاتی پایدار. در شرایط عادی، پاسخ‌دهی با انضباط اجرایی، دسترس‌پذیری منابع و هماهنگی روزمره نمایان می‌شود.

- **واکنش به خرابی‌های متداول و قابل‌پیش‌بینی:** اجرای رویه‌های استاندارد برای رایج‌ترین حالت‌های خرابی با استفاده از دستورالعمل‌های ازپیش‌تدوین‌شده. در خرابی‌های متداول، موضوع اصلی سرعت تشخیص، کیفیت برنامه‌ریزی و توان هماهنگی بین بهره‌برداری و تعمیرات است.

- **واکنش به شرایط غیرعادی و پیچیده:** عیب‌یابی خرابی‌های نادر و پیچیده با استفاده از خبرگان داخلی یا خارجی و داوری حرفه‌ای. در شرایط غیرعادی پیچیده، پاسخ‌دهی نیازمند داوری حرفه‌ای، اولویت‌بندی پویا و انعطاف ساختاری است و رویه‌های استاندارد ممکن است کافی نباشند.

- **واکنش به بحران‌های بزرگ و پیش‌بینی‌نشده:** فعال‌سازی ساختار فرماندهی حادثه تیم‌های واکنش اضطراری با نقش‌ها و مسئولیت‌های مشخص. در بحران‌های بزرگ، پاسخ‌دهی دیگر محدود به تیم نگهداشت نیست و به سطح فرماندهی بحران،

53. Work-as-Done
54. Work-as-Imagined
55. Remaining Useful Life

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

تصمیم‌های بین واحدی و حفظ کارکردهای حیاتی ارتقا می‌یابد. سناریوهای محتمل بحران ازجمله آتش‌سوزی، انفجار، قطعی برق و حملات سایبری باید از پیش شناسایی و برای آن‌ها برنامه واکنش تدوین شده باشد.

گام چهارم: جذب، سازگاری و بازیابی-حین و پس از اختلال

هدف: مدیریت فیزیکی و عملیاتی اختلال، از لحظه برخورد ضربه تا بازگشت به عملکرد قابل‌قبول.

چهارچوب AFLEPT (پنج فاز تاب‌آوری شامل پیشگیرانه، جذب، سازگاری، بازیابی و تحول‌آفرینی) که در ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی کاربرد گسترده‌ای یافته است، پاسخ فیزیکی و عملیاتی یک سامانه صنعتی را از لحظه برخورد ضربه تا مرحله تکامل پس از بحران تشریح می‌کند .این چهارچوب شامل معیارهایی برای اندازه‌گیری شاخص‌های پیشگیرانه، فرکانس تخریب عملکرد، میزان افت عملکرد، مدت زمان ماندگاری در وضعیت تخریب‌یافته، سرعت بازیابی و تحول سیستم است. هر یک از این ظرفیت‌ها، نقش مشخصی در مدیریت فیزیکی اختلال ایفا می‌کنند.

مؤلفه‌های کلیدی این گام عبارت‌اند از:

- **جذب ضربه (افزونگی مؤثر، استحکام):** توانایی اولیه سیستم برای مقاومت در برابر اختلال و به حداقل رساندن میزان افت عملکرد در لحظه وقوع ضربه. این ظرفیت ازطریق افزونگی تجهیزات حیاتی با استقلال کامل ازنظر مسیر، منبع تغذیه و مکان فیزیکی، بافرهای ذخیره مواد در فرایند، استحکام فیزیکی سازه‌ها و پایداری شبکه‌های انرژی تأمین می‌شود. یک سیستم با ظرفیت جذب بالا، ضربه را در خود حل کرده و اجازه نمی‌دهد اختلال اولیه به بخش‌های دیگر سرایت کند.
- **سازگاری (تغییر آرایش و مسیرهای جایگزین):** توانایی سازمان برای تغییر آرایش کاری، ساختار تصمیم‌گیری و نحوه تخصیص منابع خود در شرایط اختلال، به‌گونه‌ای که کارکردهای حیاتی در سطح حداقل اما قابل‌قبول حفظ شوند. به‌کارگیری روش‌های تعمیراتی موقت ایمن، تغییر اولویت‌بندی وظایف نگهداشت بر اساس نیاز لحظه‌ای تولید و جابه‌جایی پویای تیم‌های تعمیراتی نمونه‌هایی از این ظرفیت هستند.
- **کاهش کنترل‌شده ظرفیت (به‌جای توقف کامل):** امکان ادامه فعالیت با بار کمتر به‌جای توقف کامل در زمان اختلال. برای تجهیزات و فرایندهای حیاتی، شرایط مجاز بهره‌برداری در وضعیت تخریب‌یافته و حدود زمانی آن باید از پیش تعیین شود. سیستم باید امکان کاهش کنترل‌شده ظرفیت را به‌جای توقف کامل فراهم کند تا حداقل تولید حفظ شود.
- **بازیابی ترمیمی (تعمیر، تعویض):** بازگشت سریع به عملکرد قابل‌قبول ازطریق تعمیر، تعویض و راه‌اندازی مجدد. شاخص‌هایی نظیر MTTR (میانگین زمان تعمیر)، سرعت تأمین قطعات یدکی حیاتی، آمادگی دستورالعمل‌های بازسازی اضطراری و هماهنگی میان تیم‌های عملیاتی و پشتیبانی، تعیین‌کننده اصلی کیفیت این ظرفیت هستند.

گام پنجم: یادگیری، تحول و بهبود مستمر-پس از بازیابی کامل

هدف: استخراج درس از تجارب، ایجاد تحول بنیادین و بهبود مستمر سیستم.

یادگیری در مهندسی تاب‌آوری فقط واکنشی به حادثه نیست. اگر سازمان فقط از شکست‌های بزرگ درس بگیرد، بخش زیادی از ظرفیت بهبود مستمر خود را از دست خواهد داد. در رویکرد کلاسیک مدیریت ایمنی و قابلیت اطمینان (Safety-I)، تمرکز اصلی بر نقاط شکست، عیوب، حوادث بزرگ و انحرافات شدید از شرایط مطلوب است؛ اما در مهندسی تاب‌آوری و به‌ویژه بر اساس دیدگاه Safety-II، یادگیری یک فرایند جاری و روزمره است که کانون توجه خود را از «تعداد محدودی رخداد ناگوار» به «هزاران کارکرد موفق و بدون حادثه روزانه» معطوف می‌کند. ظرفیت یادگیری، همراه با ظرفیت‌های پاسخ‌دهی، پایش و پیش‌بینی، یکی از چهار رکن بنیادین تاب‌آوری در شبکه ارزیابی تاب‌آوری هولناگل را تشکیل می‌دهد.

مؤلفه‌های کلیدی این گام عبارت‌اند از:

- **یادگیری از موقعیت‌های نامطلوب (تحلیل ریشه‌ای):** تحلیل عمیق و سیستماتیک علل ریشه‌ای خرابی‌ها و حوادث با

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

استفاده از روش‌های تحلیل ریشه‌ای (RCA[۵۶]) و جلسات بررسی پس از اقدام (AAR[۵۷]) این ابزارها برای پاسخ به سه پرسش کلیدی به کار گرفته می‌شوند: در عمل چه اتفاقی افتاد و با رویه مکتوب چه تفاوتی داشت؟ چه عوامل سیستمی، محیطی، انسانی و تجهیزاتی دست به دست هم دادند تا این نتیجه رقم بخورد؟ چگونه می‌توانیم ساختار، رویه‌ها یا ابزارهای ارتباطی خود را تغییر دهیم تا احتمال تکرار این الگوی شکست در آینده کاهش یابد؟

- **برگزاری جلسات AAR:** برگزاری جلسات بازبینی ساختاریافته پس از هر رویداد مهم برای پاسخ به چهار پرسش اساسی: چه انتظاری داشتیم؟ چه اتفاقی افتاد؟ چه چیزی خوب پیش رفت و چرا؟ چه چیزی را می‌توانیم بهبود دهیم و چگونه؟ این جلسات باید بلافاصله پس از هر رویداد مهم برگزار شوند و نتایج آن‌ها مستند و در رویه‌های آینده لحاظ گردد.

- **یادگیری از موقعیت‌های روزمره و موفقیت‌ها:** شناسایی و مستندسازی رفتارهای انطباقی موفق و راهکارهای نوآورانه تکنسین‌ها برای حل مسائل تحت فشار کاری و تصمیم‌گیری‌های موفق در شرایط ابهام. این لایه، متمایزکننده نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری از سیستم‌های سنتی است. سازمان باید تلاش کند رفتارهای انطباقی، راهکارهای نوآورانه تکنسین‌ها و تصمیم‌گیری‌های موفق در شرایط ابهام را تحلیل کند.

- **تحول‌آفرینی (بازطراحی بنیادین سیستم):** استفاده از بحران به‌عنوان فرصتی برای تغییرات بنیادین در طراحی فنی، ساختار سازمانی و رویه‌ها. ظرفیت تحول‌آفرینی، بالاترین سطح بلوغ تاب‌آوری است و نشان می‌دهد که سازمان نه‌تنها از اختلالات بهبود می‌یابد، بلکه از آن‌ها به‌عنوان سکوی پرتابی برای تحول استفاده می‌کند. سیستم‌های سنتی پس از بحران صرفاً تلاش می‌کنند به نقطه تعادل قبلی بازگردند، اما در رویکرد تاب‌آور، وقوع یک بحران بزرگ یا اختلال تکرارشونده نشانه‌ای از وجود ضعف‌های ساختاری در سیستم تلقی می‌شود که باید ریشه‌کن شود.

- **ارزیابی و پایش مستمر عملکرد تاب‌آوری:** اندازه‌گیری دوره‌ای شاخص‌های کلیدی تاب‌آوری و مقایسه با وضعیت مطلوب. سازمان باید به‌طور منظم ارزیابی تاب‌آوری سیستم نگهداشت را با استفاده از ابزارهای معتبر انجام دهد و نتایج ارزیابی‌ها و درس‌آموخته‌ها را به‌طور سیستماتیک در برنامه‌های بهبود لحاظ کند.

- **بازخورد نتایج به گام اول (چرخه بهبود مستمر):** استفاده از درس‌آموخته‌ها برای بازنگری در بسترها، زیرساخت‌ها و فرهنگ سازمانی. این بازخورد، حلقه نهایی چرخه PDCA را تشکیل می‌دهد و تضمین می‌کند که سازمان همواره در مسیر بهبود مستمر قرار دارد.

جدول ۲. خلاصه جمع‌بندی گام‌ها در چهارچوب پیشنهادی

گام	عنوان	تمرکز زمانی	خروجی کلیدی
۱	آمادگی و پیشگیری	پیش از اختلال	بسترها، زیرساخت‌ها و فرهنگ تاب‌آوری
۲	پایش، هشدار و پیش‌بینی	آستانه اختلال	سیستم هشدار زودهنگام فعال
۳	پاسخ‌دهی و مقابله	لحظه وقوع	مدیریت و مهار بحران
۴	جذب، سازگاری و بازیابی	حین و پس از اختلال	بازگشت به عملکرد قابل‌قبول
۵	یادگیری، تحول و بهبود	پس از بازیابی کامل	سیستم یادگیرنده و بهبودیابنده

پیاده‌سازی چهارچوب پیشنهادی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری: مطالعه موردی در صنعت پتروشیمی

مقدمه

به‌منظور اعتبارسنجی عملیاتی چهارچوب ارزیابی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری تدوین‌شده در این پژوهش، یک مطالعه موردی در یک مجتمع پتروشیمی انجام شده است. این مجتمع به دلیل ماهیت فرایندی، پیچیدگی تجهیزات، وابستگی به تأمین‌کنندگان خارجی و قرارگیری در منطقه با مخاطرات طبیعی و ژئوپلیتیکی، نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی تاب‌آوری نگهداشت محسوب می‌شود.

56. Root Cause Analysis
57. After Action Review

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

مطالعه موردی ازطریق مصاحبه‌های حضوری نیمه‌ساختاریافته با مدیران و کارشناسان کلیدی مجتمع انجام شده است که شامل:

- مدیر نگهداشت و تعمیرات
- مدیر بهره‌برداری
- مدیر برنامه‌ریزی نت
- کارشناسان ارشد مکانیک و برق
- مدیر ایمنی و HSE
- کارشناس برنامه‌ریزی و کنترل پروژه

روش امتیازدهی

ارزیابی بر اساس چک‌لیست ۱۹۴ سؤالی در ۵ گام انجام شده است. امتیازدهی هر سؤال بر اساس مقیاس ۵ سطحی زیر انجام شد (جدول ۳).

جدول ۳. نحوه امتیازدهی در ارزیابی

سطح	عنوان	شرح	شواهد عینی
۰	فاقد الزام	الزام به‌کلی وجود ندارد یا اجرا نشده است.	شواهدی مبنی بر اجرای الزام وجود ندارد.
۱	آگاهی	دستورالعمل‌ها و رویه‌ها در حال تدوین است.	وجود جلسات آغازین، مستندات اولیه یا ابلاغیه‌های مدیریتی
۲	توسعه	اجرای الزامات آغاز شده است، اما هنوز اشکالاتی وجود دارد.	اجرای ناقص و ناپایدار در برخی واحدها
۳	شایستگی	شواهدی بر اجرای سیستماتیک الزامات وجود دارد.	اجرای منظم و پایدار؛ شاخص‌ها پایش می‌شوند.
۴	تعالی	بهبود مستمر با الگوبرداری از تجربیات برتر جریان دارد.	استفاده از بهترین تجارب و بهبود مستمر.

یافته‌های پژوهش

نتایج ارزیابی

گام اول: آمادگی و پیشگیری (پیش از اختلال) ارزیابی گام اول نشان می‌دهد که مجتمع پتروشیمی در حوزه ایجاد بسترهای مدیریتی، فرهنگی، ساختاری و زیرساختی لازم برای تاب‌آوری، در سطح «توسعه» (امتیاز ۲٫۱ از ۴) قرار دارد. سازمان گام‌های نخستین را برداشته است، اما بسیاری از اقدامات هنوز نیازمند تثبیت و نظام‌مندسازی هستند.

بسترهای مدیریتی و فرهنگی: تعهد مدیریت ارشد (امتیاز ۲٫۴) نقطه قوت نسبی این گام است؛ اما این تعهد به تخصیص بودجه پایدار و تعیین «حامی تاب‌آوری» با اختیارات کافی منجر نشده است. ساختار حاکمیتی (امتیاز ۱٫۸) ضعیف است و جلسات کمیته راهبری به‌صورت منظم برگزار نمی‌شود که نتیجه آن تصمیم‌گیری‌های جزیره‌ای است. فرهنگ سازمانی (امتیاز ۲٫۲) در حال شکل‌گیری است، اما ترس از تنبیه همچنان مانع گزارش‌دهی خطاها می‌شود. همچنین، چشم‌انداز مشترک (امتیاز ۲٫۰) در برنامه‌های راهبردی لحاظ شده اما به شاخص‌های عملیاتی (KPI) و بودجه سالانه تبدیل نشده است.

منابع انسانی و زیرساخت‌ها: نیروی انسانی و آموزش (امتیاز ۲٫۳) نسبتاً قوی است، اما آموزش‌های غیرفنی (مانند تصمیم‌گیری در بحران) و مستندسازی دانش ضمنی پرسنل باتجربه ناقص است. زیرساخت‌های فیزیکی و سیستم‌ها (امتیاز ۲٫۱) نیازمند ارتقا هستند؛ یکپارچگی OT/IT وجود ندارد، امنیت سایبری ضعیف است و ذخایر راهبردی قطعات بحرانی کافی نیست. چارت سازمانی و ساختار ارتباطات (امتیاز ۲٫۵) نسبتاً مطلوب است، اما کانال‌های ارتباطی در شرایط بحرانی کارایی لازم را ندارند.

طراحی و مدیریت ریسک: طراحی مبتنی بر تعمیرپذیری و قابلیت اطمینان (DfM/DfR) (امتیاز ۱٫۷) از ضعیف‌ترین نقاط است؛ تجهیزات عمدتاً بر اساس هزینه و زمان تحویل انتخاب می‌شوند و نه سهولت تعمیر. ارزیابی سیستماتیک ریسک‌ها (امتیاز ۱٫۸) نیز به‌روز نیست و تهدیدات نوظهوری مانند حملات سایبری و شوک‌های ژئوپلیتیک در آن لحاظ نمی‌شود. نهایتاً، تعیین آستانه‌های عملکردی (امتیاز ۱٫۵) ضعیف‌ترین بخش این گام است؛ مجتمع فاقد حداقل سطح قابل‌قبول تاب‌آوری (MART) و حداکثر زمان قابل‌قبول بازیابی (MART) برای تجهیزات بحرانی است و معیار روشنی برای تخصیص سرمایه‌گذاری در حوزه

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

تاب‌آوری ندارد (جدول ۴).

جدول ٤. نتایج گام اول: آمادگی و پیشگیری (پیش از اختلال)

زیربخش	میانگین امتیاز	سطح بلوغ	تفسیر
۱-الف. تعهد و حمایت مدیریت ارشد	۲/۴	توسعه	مدیرعامل از رویکرد حمایت کرده اما بودجه کافی تخصیص داده نشده است
۱-ب. ساختار حاکمیتی و کمیته راهبری	۱/۸	آگاهی–توسعه	کمیته تشکیل شده اما جلسات منظم برگزار نمی‌شود
۱-ج. فرهنگ سازمانی تاب‌آور	۲/۲	توسعه	فرهنگ گزارش‌دهی در حال شکل‌گیری است؛ ترس از تنبیه
۱-د. چشم‌انداز مشترک و هم‌راستایی راهبردی	۲/۰	توسعه	اهداف تاب‌آوری در برنامه‌ها لحاظ شده، اما KPIs به‌روز نیستند
۱-ه. نیروی انسانی، شایستگی‌ها و آموزش	۲/۳	توسعه	برنامه جانشین‌پروری وجود دارد اما کامل نیست
۱-و. زیرساخت‌های فیزیکی، سیستم‌ها و منابع	۲/۱	توسعه	زیرساخت‌های OT/IT نیازمند ارتقا هستند
۱-ز. چارت سازمانی و ساختار ارتباطات	۲/۵	توسعه	کانال‌های ارتباطی تعریف شده، اما در بحران کارایی ندارند
۱-ح. طراحی مبتنی بر تعمیرپذیری و قابلیت اطمینان	۱/۷	آگاهی–توسعه	اصول DfM/DfR در طراحی تجهیزات جدید رعایت نمی‌شود
۱-ط. شناسایی و ارزیابی سیستماتیک ریسک‌ها	۱/۸	آگاهی–توسعه	تحلیل‌های HAZOP و FMEA انجام می‌شود اما به‌روز نیست
۱-ی. تعیین آستانه‌های عملکردی و شاخص‌ها	۱/۵	آگاهی–توسعه	MARL و MART برای تجهیزات بحرانی تعیین نشده است

گام دوم: پایش، هشدار و پیش‌بینی (آستانه اختلال): ارزیابی گام دوم نشان می‌دهد که مجتمع پتروشیمی در حوزه پایش، هشدار و پیش‌بینی اختلالات، در سطح «آگاهی–توسعه» (امتیاز ۱,۹ از ۴) قرار دارد. این سطح، پایین‌ترین امتیاز پس از گام پنجم است و نشان‌دهنده یک شکاف راهبردی در توانایی سازمان برای شناسایی علائم اولیه اختلالات است. به بیان دیگر، سازمان نسبت به انحرافات تدریجی و سیگنال‌های ضعیف تا حد زیادی «نابینا» عمل می‌کند و عمدتاً پس از وقوع خرابی کامل، متوجه مشکل می‌شود.

پایش گذشته و حال (امتیاز ۲,۲ و ۲,۰) در سطح «توسعه» قرار دارند. داده‌های خرابی در CMMS ثبت می‌شوند اما کیفیت آن‌ها ارزیابی نمی‌شود و تحلیل‌های آماری روندها به‌ندرت انجام می‌گیرد که منجر به شکاف «داده تا فهم» شده است. سیستم‌های پایش وضعیت تنها برای حدود ۳۰٪ از تجهیزات بحرانی نصب شده‌اند و هشدارها به اقدامات تعمیراتی مؤثر منجر نمی‌شوند. آستانه‌های هشدار علمی تعیین نشده‌اند (منجر به هشدارهای کاذب یا دیرهنگام می‌شوند) و مشاهدات ارزشمند اپراتورهای باتجربه نیز به سیستم گزارش‌دهی ساختاریافته متصل نیست.

پایش آینده و خودپایشی (امتیاز ۱,۷ و ۱,۵) از ضعیف‌ترین بخش‌های این گام هستند. هیچ سیستم منظمی برای پایش تغییرات محیط عملیاتی، تهدیدات خارجی (مانند تحریم‌ها و تغییرات اقلیمی) یا روند فرسایش تجهیزات وجود ندارد که این امر سازمان را در شرایط تحریم و نوسانات ارزی بسیار آسیب‌پذیر می‌کند. همچنین، سیستم‌های خودپایشی هوشمند تقریباً وجود ندارند و پایش‌ها کاملاً دستی و متکی به بازرسی‌های دوره‌ای انسانی است.

آگاهی موقعیتی (امتیاز ۲,۱) یکی از معدود نقاط نسبتاً قوی این گام است. اپراتورهای باتجربه درک خوبی از وضعیت تجهیزات دارند، اما این آگاهی به داشبوردهای مدیریتی متصل نیست و سیستم رسمی برای ثبت و پیگیری گزارش‌های علائم ضعیف وجود ندارد .

تحلیل سناریوهای ترکیبی (امتیاز ۱,۳) ضعیف‌ترین بخش است؛ هیچ فرایندی برای ارزیابی سناریوهای چندعاملی (مانند ترکیب قطع برق، کمبود نیرو و اختلال زنجیره تأمین) تدوین نشده است.

پیش‌بینی خرابی‌های آینده (امتیاز ۱,۶) نیز در سطح آگاهی–توسعه است؛ از مدل‌های آماری یا یادگیری ماشین استفاده نمی‌شود، شاخص‌های پیش‌ران تعریف نشده‌اند و تصمیم‌گیری‌های نگهداشت بیشتر بر قضاوت فردی استوار است تا تحلیل داده‌های بلادرنگ (جدول ۵).

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

جدول ۵. نتایج گام دوم: پایش، هشدار و پیش‌بینی (آستانه اختلال)

زیربخش	میانگین امتیاز	سطح بلوغ	تفسیر
۲-الف. پایش عملکرد گذشته و تحلیل داده‌های تاریخی	۲/۲	توسعه	داده‌ها در CMMS ثبت می‌شوند اما کیفیت آن‌ها ارزیابی نمی‌شود و تحلیل‌های آماری به‌ندرت انجام می‌شود.
۲-ب. پایش عملکرد فعلی و تشخیص لحظه‌ای انحرافات	۲/۰	توسعه	پایش وضعیت برای حدود ۳۰٪ تجهیزات بحرانی نصب شده، اما هشدارها به اقدامات مؤثر منجر نمی‌شوند.
۲-ج. پایش عملکرد بالقوه آینده و شناسایی تهدیدات	۱/۷	آگاهی–توسعه	هیچ سیستم منظمی برای پایش تغییرات محیطی، تهدیدات خارجی و روندهای فرسایش وجود ندارد.
۲-د. خودپایشی	۱/۵	آگاهی–توسعه	سیستم‌های خودپایشی هوشمند تقریباً وجود ندارند و پایش‌ها عمدتاً دستی و متکی به بازرسی‌های دوره‌ای است.
۲-ه. آگاهی موقعیتی	۲/۱	توسعه	اپراتورهای باتجربه درک خوبی از وضعیت دارند، اما به ابزارها و سیستم‌های گزارش‌دهی ساختاریافته متصل نیستند.
۲-و. تحلیل سناریوهای چندعاملی و ترکیبی	۱/۳	آگاهی–توسعه	سناریوهای ترکیبی اختلالات به‌صورت دوره‌ای تدوین و ارزیابی نمی‌شوند.
۲-ز. پیش‌بینی خرابی‌های آینده و تحلیل روندها	۱/۶	آگاهی–توسعه	از مدل‌های آماری یا یادگیری ماشین استفاده نمی‌شود و شاخص‌های پیش‌ران تعریف نشده‌اند.
۲-ح. داده‌محوری و یکپارچگی اطلاعات	۲/۰	توسعه	داده‌ها در سیستم‌های جداگانه و غیریکپارچه ذخیره می‌شوند و دسترسی به اطلاعات دشوار است.

گام سوم: پاسخ‌دهی و مقابله (لحظه وقوع اختلال):

ارزیابی گام سوم نشان می‌دهد که مجتمع پتروشیمی در حوزه واکنش سریع و هدفمند به اختلالات در حال وقوع، در سطح «توسعه–شایستگی» (امتیاز ۲,۴ از ۴) قرار دارد. این گام بالاترین امتیاز را در میان پنج گام کسب کرده است؛ یعنی سازمان در حوزه «عمل و واکنش» قوی‌تر از حوزه «پیش‌بینی و یادگیری» عمل می‌کند. با این حال، این توانایی عمدتاً ریشه در تجربه و مهارت فردی تیم‌ها دارد و کمتر به سیستم‌های ساختاریافته متکی است که این امر سازمان را در برابر بحران‌های بزرگ آسیب‌پذیر می‌سازد.

سطح اول (واکنش به شرایط عادی، امتیاز ۳,۰) **و** سطح دوم (واکنش به خرابی‌های متداول، امتیاز ۲,۸) در وضعیت «شایستگی» قرار دارند. برنامه‌های نگهداشت پیشگیرانه (PM) و رویه‌های تعمیرات اساسی مستند هستند، تیم‌ها آموزش دیده‌اند و قطعات یدکی پرمصرف بر اساس داده‌های تاریخی در انبار موجود است. با این‌حال، ضعف‌هایی وجود دارد: برخی برنامه‌های PMبیش از پنج سال بدون بازنگری اجرا می‌شوند، معیار عینی برای پایان موفقیت‌آمیز پاسخ تعریف نشده، مستندسازی پس از تعمیر ناقص است و همکاری بین بهره‌برداری و نگهداشت بیشتر بر روابط شخصی استوار است تا یک سازوکار ساختاریافته.

سطح سوم (واکنش به شرایط غیرعادی، امتیاز ۲,۲) در سطح «توسعه» است و نشان‌دهنده افت توانایی سازمان در مواجهه با خرابی‌های نادر و پیچیده (مانند توربین‌ها و کمپرسورهای سانتریفیوژ) است. رویه‌های مدونی برای این شرایط وجود ندارد، وابستگی به چند خبره خاص بسیار شدید است، سازوکار مشخصی برای فراخوانی خبرگان خارجی تعریف نشده و مستندات فنی و پایگاه دانش مرتبط نیز ناقص است.

سطح چهارم (واکنش به بحران‌های بزرگ، امتیاز ۲,۰) ضعیف‌ترین بخش این گام است. تیم‌های واکنش اضطراری عمدتاً روی کاغذ تعریف شده‌اند و شبیه‌سازی منظمی برای تمرین آن‌ها انجام نمی‌شود. ساختار فرماندهی حادثه (ICS) به‌طور کامل آموزش داده نشده و برنامه‌های واکنش به سناریوهای بحرانی (مانند آتش‌سوزی یا حملات سایبری) آزمایش نشده‌اند. همچنین کانال‌های ارتباطی جایگزین (بی‌سیم/آفلاین) پیش‌بینی نشده، فرایند جایگزین برای ثبت فعالیت‌ها در صورت قطعی CMMS وجود ندارد و سیستم‌های Fail-Safe به‌طور منظم تست نمی‌شوند (جدول ۶).

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

جدول ٦. نتایج گام سوم: پاسخ‌دهی و مقابله (لحظه وقوع اختلال)

زیربخش	میانگین امتیاز	سطح بلوغ	تفسیر
۳-الف. واکنش به شرایط عادی و برنامه‌ریزی‌شده (سطح اول)	۳/۰	شایستگی	برنامه‌های نگهداشت موجود و نسبتاً کامل است، اما به‌ندرت بازبینی و به‌روزرسانی می‌شود.
۳-ب. واکنش به خرابی‌های متداول و قابل‌پیش‌بینی (سطح دوم)	۲/۸	شایستگی	رویه‌های تعمیر پمپ‌ها و کمپرسورها موجود است و تیم‌ها توانایی عیب‌یابی دارند، اما همکاری بین واحدی ساختاریافته نیست.
۳-ج. واکنش به شرایط غیرعادی و پیچیده (سطح سوم)	۲/۲	توسعه	مستندات فنی برای تجهیزات پیچیده ناقص است و وابستگی شدیدی به چند خبره خاص وجود دارد.
۳-د. واکنش به بحران‌های بزرگ و فعال‌سازی مقابله (سطح چهارم)	۲/۰	توسعه	تیم واکنش اضطراری تعریف شده اما آموزش ندیده و شبیه‌سازی نشده است.

گام چهارم: جذب، سازگاری و بازیابی (حین و پس از اختلال):

ارزیابی گام چهارم نشان می‌دهد که مجتمع پتروشیمی در حوزه مدیریت فیزیکی و عملیاتی اختلال، از لحظه برخورد ضربه تا بازگشت به عملکرد قابل‌قبول، در سطح «توسعه» (امتیاز ۲,۰ از ۴) قرار دارد. این امتیاز نشان می‌دهد که سازمان در لحظه وقوع اختلال تا حدی می‌تواند ضربه را تحمل کند، اما توانایی آن برای تغییر آرایش، ادامه خدمت و بازگشت سریع به عملکرد عادی محدود است.

ظرفیت جذب (امتیاز ۲,۱) در سطح «توسعه» قرار دارد. اگرچه برخی تجهیزات بحرانی دارای افزونگی هستند، اما این افزونگی‌ها به‌ندرت به‌صورت مؤثر و مستقل (از نظر مسیر، منبع تغذیه و مکان) طراحی شده‌اند که خطر بروز خرابی‌های با علت مشترک (CCF) را افزایش می‌دهد. ارزیابی نقاط تک‌خرابی به‌صورت سیستماتیک انجام نشده و حاشیه ایمنی تجهیزات عمدتاً بر اساس استانداردهای اولیه است. سیستم‌های Fail-Safe برای برخی تجهیزات وجود دارند، اما تست و نگهداری منظم آن‌ها تضمین نمی‌شود و آزمون‌های فشار به‌ندرت اجرا می‌گردند.

ظرفیت سازگاری (امتیاز ۲,۲) نیز در سطح «توسعه» است. مسیرهای جایگزین (بای‌پس) برای برخی خطوط وجود دارد، اما عمدتاً برای شرایط عادی طراحی شده‌اند و در اختلالات شدید کارایی لازم را ندارند. شرایط بهره‌برداری در وضعیت تخریب‌یافته برای تمام تجهیزات تعیین نشده و اختیارات لازم برای بازپیکربندی سریع به سطوح عملیاتی تفویض نشده است. تعمیرات موقت انجام می‌شود اما معیار مشخصی برای تبدیل آن‌ها به تعمیرات دائمی وجود ندارد و جابه‌جایی تیم‌های تعمیراتی بیشتر بر اساس تصمیم‌های لحظه‌ای است.

ظرفیت بازیابی (امتیاز ۱,۸) ضعیف‌ترین بخش این گام (سطح آگاهی–توسعه) است. شاخص MTTR به‌صورت منظم پایش نمی‌شود و برنامه‌های بازیابی برای سناریوهای مختلف تدوین نشده‌اند؛ درنتیجه عملیات بازیابی در بحران‌ها به‌صورت بداهه انجام می‌شود. پس از اختلالات شدید، ارزیابی آسیب‌های پنهان به‌ندرت صورت می‌گیرد و تأییدیه بازگشت به سرویس به‌صورت سیستماتیک صادر نمی‌شود. همچنین فرایند بازگشت امن پس از حملات سایبری تعریف نشده و زمان پاسخ‌دهی قراردادهای پشتیبانی با حداکثر زمان قابل‌قبول بازیابی (MART) هم‌راستا نیست (جدول ۷).

جدول۷. نتایج گام چهارم: جذب، سازگاری و بازیابی (حین و پس از اختلال)

زیربخش	میانگین امتیاز	سطح بلوغ	تفسیر
۴-الف. ظرفیت جذب تحمل ضربه در لحظه وقوع	۲/۱	توسعه	افزونگی برای برخی تجهیزات وجود دارد، اما استقلال کامل مسیرها و منابع تغذیه تضمین نشده و نقاط تک‌خرابی شناسایی نشده‌اند.
۴-ب. ظرفیت سازگاری تغییر آرایش و ادامه خدمت	۲/۲	توسعه	مسیرهای جایگزین برای برخی خطوط وجود دارد، اما اختیارات بازپیکربندی به‌صورت کامل تعیین نشده است.
۴-ج. ظرفیت بازیابی بازگشت سریع به عملکرد قابل‌قبول	۱/۸	آگاهی–توسعه	شاخص‌ها برای برخی تجهیزات قابل‌قبول است، اما برنامه‌های بازیابی منسجم وجود ندارد و ارزیابی آسیب‌های پنهان انجام نمی‌شود.

گام پنجم: یادگیری، تحول و بهبود مستمر (پس از بازیابی کامل)

ارزیابی گام پنجم نشان می‌دهد که مجتمع پتروشیمی در حوزه یادگیری، تحول و بهبود مستمر در سطح «آگاهی–توسعه» (امتیاز

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

۱٫۸ از ۴) قرار دارد. این گام همراه با گام دوم، پایین‌ترین امتیاز را کسب کرده و نشان‌دهنده یک ضعف ساختاری در چرخه یادگیری سازمانی است. به بیان ساده، سازمان توانایی واکنش (گام سوم با امتیاز ۲٫۴) را دارد، اما از تجارب خود درس نمی‌گیرد و در چرخه معیوب «واکنش بدون یادگیری» گرفتار شده است. یادگیری از موقعیت‌های نامطلوب (امتیاز ۲٫۱) نسبتاً قوی‌ترین بخش این گام است. اگرچه تحلیل‌های ریشه‌ای (RCA) انجام می‌شوند، اما با تأخیر مواجه‌اند و اقدامات اصلاحی به‌ندرت تا مرحله اجرا پیگیری می‌شوند. جلسات بررسی پس از اقدام (AAR) ساختار منظمی ندارند و تحلیل‌ها صرفاً بر علل فوری متمرکزند و به علل سیستمی نمی‌پردازند. در بخش یادگیری از موقعیت‌های روزمره و موفقیت‌ها (امتیاز ۲٫۰) نیز ضعف‌های جدی وجود دارد؛ پیشنهادات خط مقدم به‌ندرت بررسی می‌شوند، دانش ضمنی پرسنل باتجربه مستند نمی‌گردد، «نزدیک‌بودن‌علائم اولیه به‌عنوان فرصت یادگیری دیده نمی‌شوند و رفتارهای انطباقی موفق به رویه‌های پایدار تبدیل نمی‌گردند. تحول‌آفرینی (امتیاز ۱٫۴) ضعیف‌ترین بخش این گام است. سازمان از اختلالات بزرگ به‌عنوان فرصتی برای بازطراحی بنیادین استفاده نمی‌کند و پس از هر بحران، صرفاً تلاش می‌کند به وضعیت قبلی بازگردد. مفهوم «ساختن بهتر» در تصمیم‌گیری‌ها وجود ندارد و سرمایه‌گذاری‌ها بر اساس ریسک اولویت‌بندی نمی‌شوند. نهایتاً، ارزیابی و بهبود مستمر (امتیاز ۱٫۶) نیز فاقد پایش دوره‌ای با ابزارهای معتبر است و سیستم بازخوردی که درس‌آموخته‌ها را به گام اول (آمادگی) بازگرداند، وجود ندارد. این امر موجب می‌شود چرخه PDCA ناقص بماند و فرهنگ یادگیری در سازمان نهادینه نشود (جدول ۸).

جدول۸. نتایج گام پنجم: جذب، سازگاری و بازیابی (حین و پس از اختلال)

زیربخش	میانگین امتیاز	سطح بلوغ	تفسیر
۵-الف. یادگیری از موقعیت‌های نامطلوب تحلیل ریشه‌ای	۲/۱	توسعه	RCA انجام می‌شود، اما اقدامات اصلاحی به‌ندرت پیگیری و تکمیل می‌شوند.
۵-ب. یادگیری از موقعیت‌های روزمره و موفقیت‌ها	۲/۰	توسعه	پیشنهادهای اپراتورها ثبت می‌شود، اما به‌ندرت بررسی و پیگیری می‌گردد. دانش ضمنی مستند نمی‌شود.
۵-ج. تحول‌آفرینی	۱/۴	آگاهی–توسعه	از اختلالات برای بازطراحی بنیادین سیستم استفاده نمی‌شود و رویکرد «ساختن بهتر» وجود ندارد.
۵-د. ارزیابی و بهبود مستمر	۱/۶	آگاهی–توسعه	ارزیابی‌های دوره‌ای تاب‌آوری انجام نمی‌شود و سیستم بازخورد برای تکمیل چرخه PDCA وجود ندارد.

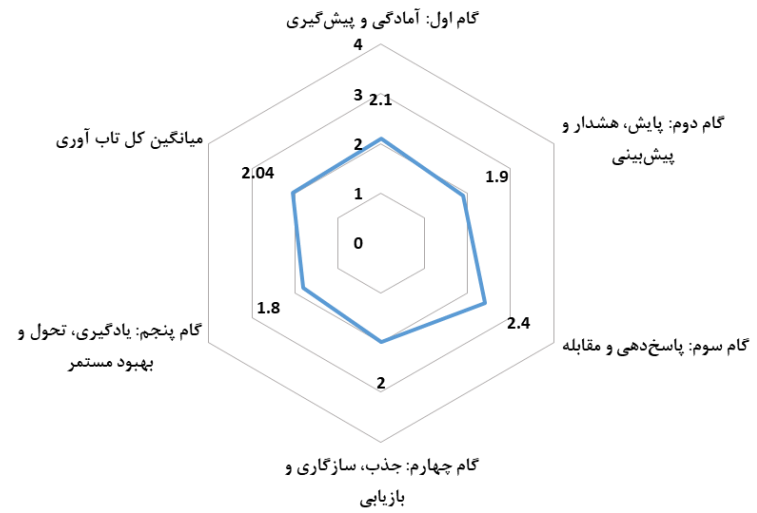
جمع‌بندی نتایج ارزیابی پنج گام چهارچوب نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری

نتایج کلی ارزیابی در جدول ۹ و شکل ۲ ارائه شده است. قوی‌ترین گام ، گام سوم «پاسخ‌دهی و مقابله» با امتیاز ۲/۴، نشان‌دهنده توانایی نسبی مجتمع در واکنش به خرابی‌های روزمره و برنامه‌ریزی‌شده است. ضعیف‌ترین گام‌ها شامل گام پنجم «یادگیری، تحول و بهبود مستمر» با امتیاز ۱/۸ و گام دوم «پایش، هشدار و پیش‌بینی» با امتیاز ۱/۹، بیانگر شکاف جدی در توانایی پیش‌بینی اختلالات و یادگیری سیستماتیک از تجارب هستند. سطح بلوغ کلی شامل مجتمع در سطح «توسعه» با میانگین ۲/۰۴ از ۴ قرار دارد؛ به این معنا که زیرساخت‌ها و اقدامات اولیه تا حدی ایجاد شده‌اند، اما هنوز تا سطح «شایستگی» (امتیاز ۳) فاصله قابل‌توجهی وجود دارد. درصد بلوغ تاب‌آوری بر اساس مقیاس ۰ تا ۴، سطح بلوغ کلی مجتمع معادل ۵۱ درصد از وضعیت مطلوب (تعالی) برآورد می‌شود.

جدول ۹. جمع‌بندی نتایج ارزیابی پنج گام چهارچوب نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری در صنعت پتروشیمی

ردیف	گام	عنوان	تمرکز زمانی	تعداد سؤالات	میانگین امتیاز	سطح بلوغ
۱	گام اول	آمادگی و پیشگیری	پیش از اختلال	۵۸	۲/۱	توسعه
۲	گام دوم	پایش، هشدار و پیش‌بینی	آستانه اختلال	۴۴	۱/۹	آگاهی–توسعه
۳	گام سوم	پاسخ‌دهی و مقابله	لحظه وقوع اختلال	۳۵	۲/۴	توسعه–شایستگی
۴	گام چهارم	جذب، سازگاری و بازیابی	حین و پس از اختلال	۲۹	۲/۰	توسعه
۵	گام پنجم	یادگیری، تحول و بهبود مستمر	پس از بازیابی کامل	۲۸	۱/۸	آگاهی–توسعه
۶	–	میانگین کل تاب‌آوری	چرخه کامل اختلال	۱۹۴	۲/۰۴	توسعه

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]



شکل ۲. نتایج ارزیابی پنج گام چهارچوب نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری در صنعت پتروشیمی

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تبیین نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری (REBM) و ارائه یک چارچوب ارزیابی جامع، یک مدل پنج‌مرحله‌ای (شامل ۱۹۴ سؤال در مقیاس بلوغ) را از مرحله «آمادگی» تا «یادگیری و تحول» تدوین و در یک مجتمع پتروشیمی اعتبارسنجی کرد. نتایج مطالعه موردی نشان داد که سازمان در سطح بلوغ «توسعه» (با میانگین ۲٫۰۴ از ۴) قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که در گام «پاسخ‌دهی و مقابله» (۲٫۴) توانایی نسبی خوبی دارد، اما در گام‌های «پایش و پیش‌بینی» (۱٫۹) و «یادگیری» (۱٫۸) با ضعف ساختاری مواجه است. بزرگ‌ترین شکاف‌های شناسایی‌شده شامل فقدان آستانه‌های عملکردی (MARL/MART)، عدم تحلیل سناریوهای ترکیبی، نبود سیستم پایش هوشمند و مدل‌های پیش‌بینی، و عدم پیگیری اقدامات اصلاحی بود. در مجموع، چارچوب پیشنهادی قابلیت اجرایی بالایی برای ارزیابی عینی صنایع فرایندی دارد؛ با این حال، تحقق واقعی تاب‌آوری مستلزم تعهد بلندمدت مدیریت ارشد برای عبور از «ارزیابی» به «اقدام»، «یادگیری» و در نهایت «تحول سازمانی» است.

پیشنهادها

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای ارتقای نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری در صنایع فرایندی ارائه می‌شود:

پیشنهادهای کاربردی برای صنایع

۱. استقرار نظام ارزیابی دوره‌ای تاب‌آوری: سازمان‌ها باید ارزیابی تاب‌آوری سیستم نگهداشت را با استفاده از چک‌لیست پیشنهادی این پژوهش، به‌صورت منظم انجام دهند. مقایسه نتایج دوره‌های متوالی، امکان اندازه‌گیری پیشرفت و شناسایی روندهای مثبت و منفی را فراهم می‌آورد. این ارزیابی‌ها باید توسط تیمی متشکل از ارزیابان آموزش‌دیده و با مشارکت تمام ذی‌نفعان کلیدی انجام شود.

۲. تعیین آستانه‌های عملکردی: تدوین حداقل سطح قابل‌قبول تاب‌آوری و حداکثر زمان قابل‌قبول بازیابی برای تجهیزات و سیستم‌های بحرانی، یکی از فوری‌ترین اقداماتی است که باید در دستور کار قرار گیرد. این آستانه‌ها مبنای تصمیم‌گیری در مورد سرمایه‌گذاری‌های تاب‌آوری، طراحی افزونگی‌ها و تدوین برنامه‌های بازیابی خواهند بود.

۳. تقویت ظرفیت پایش و پیش‌بینی: باتوجه‌به امتیاز پایین گام دوم (۱/۹ از ۴)، سرمایه‌گذاری در استقرار سیستم‌های پایش وضعیت هوشمند، سنسورهای پیشرفته و الگوریتم‌های تشخیص ناهنجاری باید در اولویت قرار گیرد. علاوه بر ابزارهای فنی، ایجاد سیستم گزارش‌دهی علائم ضعیف برای اپراتورها و تکنسین‌های خط مقدم، و تحلیل ساختاریافته این گزارش‌ها، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی ظرفیت تشخیص زودهنگام اختلالات را افزایش دهد.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

۴. نهادینه‌سازی فرهنگ یادگیری: جلسات «بررسی پس از اقدام» باید پس از هر رویداد مهم (خرابی، حادثه، تعمیرات اساسی، مانور) به‌عنوان یک رویه استاندارد برگزار شود. همچنین، ایجاد سیستم پیگیری اقدامات اصلاحی با مسئولیت مشخص و زمان‌بندی دقیق، برای عبور از «تحلیل کردن» به «اجرا کردن» ضروری است.

۵. ایجاد ساختار حاکمیتی مؤثر و کمیته راهبری: تشکیل کمیته راهبری تاب‌آوری با حضور نمایندگانی از بهره‌برداری، نگهداشت، ایمنی، مهندسی و مدیریت ارشد، و برگزاری جلسات منظم (ماهانه یا فصلی) آن، برای هماهنگی اقدامات و پیگیری پیشرفت ضروری است. این کمیته باید دارای اختیارات کافی برای تخصیص منابع و تصمیم‌گیری در مورد پروژه‌های ارتقای تاب‌آوری باشد.

۶. توانمندسازی نیروی انسانی ازطریق آموزش متقاطع و جانشین‌پروری: اجرای برنامه‌های آموزش متقاطع برای پرسنل عملیاتی و برنامه‌های جانشین‌پروری برای نقش‌های کلیدی، برای کاهش وابستگی به افراد خاص و تأمین انعطاف‌پذیری نیروی انسانی در شرایط بحران حیاتی است. همچنین، مستندسازی سیستماتیک دانش ضمنی پرسنل باتجربه قبل از بازنشستگی، برای جلوگیری از از دست رفتن سرمایه دانش سازمانی ضروری است.

۷. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و هوشمندسازی: استقرار فناوری‌هایی مانند دوقلوی دیجیتال، سیستم‌های پایش مبتنی بر اینترنت اشیاء صنعتی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خرابی‌ها، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی دقت پیش‌بینی، سرعت پاسخ‌دهی و اثربخشی اقدامات نگهداشت را افزایش دهد.

۸. تدوین و اجرای مانورهای سناریوهای ترکیبی: سازمان‌ها باید مانورهای تاب‌آوری با سناریوهای چندعاملی و ترکیبی (مانند قطع برق هم‌زمان با کمبود نیروی متخصص، یا حمله سایبری هم‌زمان با اختلال زنجیره تأمین) را به‌صورت منظم (حداقل سالانه) اجرا کنند و نتایج آن‌ها را با زمان‌های هدف پاسخ، تداوم و بازیابی مقایسه نمایند.

۹. تقویت زیرساخت‌های OT/IT و امنیت سایبری: باتوجه‌به آسیب‌پذیری سیستم‌های کنترل صنعتی در برابر حملات سایبری، پیاده‌سازی الزامات استاندارد IEC 62443، آموزش پرسنل برای واکنش به حوادث سایبری، و ایجاد فرایندهای جایگزین برای مدیریت نگهداشت در صورت از دسترس خارج شدن سیستم‌های دیجیتال، ضروری است.

۱۰. تقویت زنجیره تأمین تاب‌آور: در شرایط تحریم و محدودیت‌های ارزی، شناسایی تأمین‌کنندگان جایگزین، تدوین برنامه‌های مهندسی معکوس برای قطعات استراتژیک، و نگهداری ذخایر راهبردی قطعات یدکی، برای کاهش آسیب‌پذیری زنجیره تأمین حیاتی است.

پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده

اگرچه پژوهش حاضر یک چهارچوب جامع برای ارزیابی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری ارائه داد، اما همچنان زمینه‌های متعددی برای توسعه و تعمیق دانش در این حوزه وجود دارد. پیشنهادهای زیر برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌شود:

۱. توسعه نسخه‌های بخش‌محور چهارچوب: چهارچوب پیشنهادی این پژوهش به‌صورت عمومی برای صنایع فرایندی طراحی شده است. توسعه نسخه‌های تخصصی برای صنایع مختلف مانند نفت و گاز، پتروشیمی، فولاد، سیمان، نیروگاهی و صنایع غذایی می‌تواند دقت و قابلیت اجرایی چهارچوب را افزایش دهد.

۲. یکپارچه‌سازی چهارچوب با سیستم‌های CMMS و نرم‌افزارهای مدیریت دارایی: توسعه ماژول‌های نرم‌افزاری برای خودکارسازی فرایند ارزیابی تاب‌آوری و اتصال آن به سیستم‌های مدیریت نگهداشت کامپیوتری (CMMS) و سیستم‌های مدیریت دارایی‌های سازمانی می‌تواند ارزیابی‌ها را سریع‌تر، دقیق‌تر و قابل‌پیگیری‌تر سازد.

۳. توسعه مدل‌های کمی برای محاسبه شاخص کل تاب‌آوری: استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای وزن‌دهی به زیربخش‌ها و محاسبه شاخص عددی کل تاب‌آوری نگهداشت، می‌تواند مقایسه بین سازمان‌ها و رصد روند پیشرفت را تسهیل کند.

۴. بررسی تأثیر تحول دیجیتال بر نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری: با ظهور انقلاب صنعتی پنجم و تأکید آن بر انسان‌محوری، پایداری و تاب‌آوری، بررسی چگونگی بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی، رباتیک و دوقلوی دیجیتال برای

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری، یک حوزه پژوهشی نوظهور و امیدبخش است.

۵. بررسی ارتباط بین تاب‌آوری نگهداشت و تاب‌آوری کلی سازمان: چهارچوب پیشنهادی این پژوهش بر تاب‌آوری سیستم نگهداشت متمرکز است. بررسی چگونگی ارتباط این تاب‌آوری با تاب‌آوری کلی سازمان (شامل تاب‌آوری مالی، زنجیره تأمین، منابع انسانی و فناوری اطلاعات) می‌تواند به درک جامع‌تری از مدیریت تاب‌آوری در سطح سازمان کمک کند.

۶. تلفیق چهارچوب با رویکردهای مدیریت ریسک و مدیریت تداوم کسب‌وکار: بررسی چگونگی هم‌افزایی چهارچوب ارزیابی نگهداشت مبتنی بر تاب‌آوری با سیستم‌ها مدیریت ریسک و مدیریت تداوم کسب‌وکار مانند می‌تواند به ایجاد یک نظام یکپارچه برای مدیریت تاب‌آوری سازمانی منجر شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به‌طور مساوی در مفهوم‌پردازی مقاله و نگارش نسخه اولیه و نسخه‌های بعدی مقاله مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

References

Antonelli, F., Yang, M., & Cozzani, V. (2025). Enhancing pipeline system resilience: A reliability-centric approach. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 5, 100252.

Azadeh, A., Asadzadeh, S. M., & Tanhaeean, A. (2017). A consensus-based AHP for improved assessment of resilience engineering in maintenance organizations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 47, 151–160.

Azadeh, A., Salehi, V., Ashjari, B., & Saberi, M. (2016). The impact of redundancy on resilience engineering in a petrochemical plant by data envelopment analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 230(3), 230–248.

Binetti, M. N. (2023). Rebuilding energy infrastructures and the manufacturing sector in post-conflict countries. *Energy Policy*, 172, 113298.

Bukowski, L., & Werbińska-Wojciechowska, S. (2021). Using fuzzy logic to support maintenance decisions according to resilience-based maintenance concept. E*ksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 23(2), 294–307.

Bukowski, L., & Werbińska-Wojciechowska, S. (2025). Towards Maintenance 5.0: Resilience-Based Maintenance in AI-driven sustainable and human-centric industrial systems. *Sensors*, 25(16), 5100.

Chen, J., Wang, H., & Zhong, R. Y. (2021). A supply chain disruption recovery strategy considering product change under COVID-19. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 920–927.

Chivunga, J. N., Gonzalez-Longatt, F., Lin, Z., & Blanchard, R. (2025). Assessing the resilience of Malawi's power grid to the 2022 Tropical Cyclone Ana using a combination of the AFLEPT metric framework and resilience capacities. *Energies*, 18(12), Article 3165, 1–41. https://doi.org/10.3390/en18123165

Deighton, M. G. (2016). *Facility integrity management: Effective principles and practices for the oil, gas and petrochemical industries*. Gulf Professional Publishing.

Dekker, S. (2011). *Drift into failure: From hunting broken components to understanding complex systems*. 1st Edition. Ashgate. Farnham, Surrey, England; Burlington, VT. ISBN 978-1-4094-2222-8 (hbk); 978-1-4094-2221-1 (pbk).

Del Prete, A., Cirillo, E., Mashaallah, Z., & Moccardi, A. (2025). Predictive algorithms for maintenance planning and optimization in industrial applications. *In Advanced information networking and applications* (LNDECT, Vol. 251, pp. 41–50). Springer.

Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, maintenance, and reliability for engineers*. 1st Edition. CRC Press (Taylor & Francis Group). Boca Raton, FL. https://doi.org/10.1201/9781420006780

Dui, H., Liu, M., Song, J., & Wu, S. (2023). Importance measure-based resilience management: Review, methodology and perspectives on maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 237, 109383.

El-Halwagi, M. M., Sengupta, D., Pistikopoulos, E. N., Sammons, J., Eljack, F., & Kazi, M.-K. (2020). Disaster-resilient design of manufacturing facilities through process integration: Principal strategies, perspectives, and research challenges. *Frontiers in Sustainability*, 1, 595961.

Elwerfalli, A., Alsadaie, S., & Mujtaba, I. M. (2025). Development of maintenance plan for power-generating unit at gas plant of Sirte Oil Company using risk-based maintenance (REBM) approach. *Processes*, 13(8), 2533.

Forouzan, H. (2023). Reducing vulnerability and ensuring continuity of operation under risk-based maintenance. *Journal of Logistics and Defense Technology*, *6*(3), 101–126. (In Persian)

Ghaljahi, M., Omidi, L., & Karimi, A. (2025). Resilience assessment in process industries: A review of literature. *Heliyon*, 11, e42498.

Golnahali, H., Alavimatin, Y., Nejad Irani, F., & Fakhimiazar, S. (2025). Designing a Total Productive Maintenance (TPM) Management Model Using a Combined Approach of Factor Analysis and Interpretive Structural Modeling (ISM) in the Power Distribution Companies of Northwest Iran. *Management, Education and Development in Digital Age*, 2(1), 88-108. https://doi.org/10.61838/medda.2.1.7 (In Persian).

Golnehali, H., Alavi Matin, Y., Nejad Irani, F., & Fakhimi Azar, S. (2025). Designing a Total

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

Productive Maintenance (TPM) management model using a combination of factor analysis and interpretive structural modeling (ISM) in electricity distribution companies of northwest Iran. *Management, Education and Development in the Digital Age*, *2*(1), 88–108. (In Persian)

Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and Safety-II: The past and future of safety management.* 1st Edition. Ashgate (CRC Press). Farnham, Surrey, England; Burlington, VT. https://doi.org/10.1201/9781315607511.

Hollnagel, E. (2017). *Safety-II in practice: Developing the resilience potentials*. 1st Edition. Routledge (Taylor & Francis Group). London; New York. https://doi.org/10.4324/9781315201023

Hollnagel, E., Woods, D. D., & Leveson, N. (Eds.). (2006). *Resilience engineering: Concepts and precepts*. 1st Edition. Ashgate. Aldershot, England; Burlington, VT. https://doi.org/10.1201/9781315605685

Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47–61. https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.006

Hostos, H., Goepp, V., & Sondi, P. (2025). A Systematic Literature Review of Resilience Approaches in Production Systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 72, 4094–4112. https://doi.org/10.1109/TEM.2025.3606576.

Hu, S., Ke, Y., Sun, G., Cheng, L., & Zuo, L. (2023). Research status and prospect of petrochemical process safety. *In 2023 35th Chinese Control and Decision Conference* (CCDC) (pp. 3577–3583). IEEE.

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 22316:2017: Security and resilience — Organizational resilience — Principles and attributes*. ISO. https://www.iso.org/standard/50053.html

International Organization for Standardization. (2024*). ISO 22336:2024: Security and resilience — Organizational resilience — Guidelines for resilience policy and strategy.* ISO. https://www.iso.org/standard/50073.html

Ismailov, A. S., & Noori, N. S. (2025). Chaos engineering strategies for enhancing resilience in complex cyber-physical (CPS) and industrial control systems (ICS): A literature review. *In 2025 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (SMC) (pp. 1360–1364). IEEE.

Kammouh, O., Gardoni, P., & Cimellaro, G. P. (2020). Probabilistic framework to evaluate the resilience of engineering systems using Bayesian and dynamic Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 198, 106813.

Karar, A. N., Labib, A., & Jones, D. (2024). A resilience-based maintenance optimisation framework using multiple criteria and Knapsack methods. *Reliability Engineering & System Safety*, 241, 109674.

Lay, E., Branlat, M., & Woods, Z. (2015). A practitioner's experiences operationalizing Resilience Engineering. *Reliability Engineering & System Safety*, 141, 63–73.

Modarres, M., Kaminskiy, M., & Krivtsov, V. (1999). *Reliability engineering and risk analysis: A practical guide*. 1st Edition. Marcel Dekker. New York. ISBN 978-0-8247-2000-1.

Mohaghar, A., Ghasemi, R. & shirazi, S. (2025). IoT Based Smart Maintenance in LARG Context: a Metasynthesis in the Aviation Industry. *Journal of Industrial Management Perspective*, *15*(2), 225–250. https://doi.org/10.48308/jimp.15.2.225 (In Persian).

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press. New York. ISBN 978-0-8311-3078-4.

Mozaffari, R. (2025). The role of preventive measures and smart technologies in enhancing the resilience of urban facilities: A comparative study of Iran and the world. In *Proceedings of the First National Congress on Maintenance of Urban Buildings and Facilities*. (In Persian)

Pawar, P., Park, S., Hu, P., & Wang, Q. (2021). Applications of resilience engineering principles in different fields with a focus on industrial systems: A literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 69, 104366.

Ramezani, K., Darvish Motevalli, M. H., Motamedi, M. & Movahedi, M. M. (2026). Design of a

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]

Preventive Maintenance Mathematical Model for High-speed Press Machines. *System Engineering and Productivity*, *6*(1), 251-271. https://doi.org/10.22034/sep.2025.2067829.1372 (In Persian)

Ramezani, K., Darvish Motevalli, M. H., Motamedi, M., & Movahedi, M. M. (2026). Designing a mathematical model of preventive maintenance for high-speed press machines. *Journal of System Engineering and Productivity*, *6*(1), 251–271. (In Persian)

Roach, E. L., & Al-Saidi, M. (2021). Rethinking infrastructure rehabilitation: Conflict resilience of urban water and energy supply in the Middle East and South Sudan. *Energy Research & Social Science*, 76, 102052.

Sun, H., Yang, M., & Wang, H. (2022). Resilience-based approach to maintenance asset and operational cost planning. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 987–997. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.002

Topazly, R., Stadniichuk, R., Liubokhynets, L., Shuprudko, N., Zhosan, H., & Plietnov, M. (2026). Institutional trust and governance effectiveness as mediators in transforming digital maturity into post-war infrastructure recovery. *Business Ethics and Leadership*, 10(1), 188–206.

Wei, J., Zhang, J., Xia, Y., You, Q., Qiao, J., Zhang, S., Wang, L., & Li, Z. (2025). Research on safety resilience evaluation of gas transmission pipelines in chemical industry parks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 98, 105739.

Weick, K. E., & Sutcliffe, K. M. (2007). *Managing the unexpected: Resilient performance in an age of uncertainty* (2nd ed.). Jossey-Bass (Wiley). San Francisco, CA. ISBN 978-0-7879-9649-9 (cloth).

Wireman, T. (2015). *Benchmarking best practices in maintenance, reliability and asset management*: Updated for ISO 55000 (3rd Ed.). Industrial Press.

Woods, D. D. (2015). Four concepts for resilience and the implications for the future of resilience engineering. *Reliability Engineering & System Safety*, 141, 5–9. https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.018

Yang, Z., Xiang, Q., He, Y., Peng, S., Faber, M. H., Zio, E., Zuo, L., Su, H., & Zhang, J. (2023). Resilience of natural gas pipeline system: A review and outlook. *Energies*, 16(17), 6237.

Zarei, M., & Keshavarzi, M. (2026). Analyzing barriers to the development of sustainable predictive maintenance in industrial equipment of petrochemical complexes using FDM-DEMATEL (A case study). *Journal of System Engineering and Productivity*, 6(4), 251–279. https://doi.org/10.22034/sep.2026.2090483.1504 (In Persian)

[Downloaded from disaster.ndri.ac.ir on 2026-11-18]