

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری

تحلیل تاب آوری سیستم تهویه در معادن جبهه کار طولانی مکانیزه

نگارنده: عادل متحدی

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد عطائی

اساتید مشاور

دکتر عباس برآبادی

دکتر علی نوری قراحسنلو

تیر ۱۴۰۰

شماره: ۳۹۵۰/۴۲۰۱۱۸
تاریخ: ۱۳۰۵/۰۶/۱۳
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

پیوست شماره ۲

دانشکده: مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه: مهندسی استخراج معدن

رساله دکتری آقای عادل متحدی

تحت عنوان: تحلیل تاب‌آوری سیستم تهویه در معادن جبهه کار طولانی مکانیزه

در تاریخ ۱۴۰۰/۴/۲۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک رساله دکتری ارزیابی گردید و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر عباس برآبادی		دکتر فرهنگ سرشکی
	دکتر علی نوری فراحشلو		دکتر محمد عطانی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر اصغر عزیزی		دکتر رضا کاکانی
			دکتر امین رفیعی
			دکتر سید هادی حسینی
			مهندس حسن مدنی



تقدیم اثر

تقدیم بہ:

پدر و مادر نازنینم؛

کہ الگوی پاک زینتی، سادہ زینتی و نوع دوستی ہستند۔ آن ہا بودند کہ بہ من آموختند علم، آدمیت و جوانمردی و ادب۔

و ہمسر عزیزم؛

کہ در روزگار سختی ہا و مشکلات، با صبری و شکیبائی، سروش مہر بود و پیام آور محبت...

شکر و قدردانی

سپاس و ستایش مرخصای راجل جلالت که آثار قدرت او بر چهره روز روشن تلمان است و انوار حکمت او در دل شب تار درخشان. آفریدگاری که خوشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. از جناب آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطایی به خاطر راهنمایی های شایسته ایشان در تهیه و تدوین این رساله و نیز از اساتید محترم جناب آقایان دکتر عباس برآبادی و دکتر علی نوری قراحتلو که بدون مشاوره و نوازشات بی ثباته ایشان مسیر پیموده شده به موازی نمی شد، کمال تقدیر و شکر را دارم. بدون شک جایگاه و منزلت اساتید محترم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات آنان، بازمانی قاصر و دستی ناتوان، چیزی بنگارم.

از کلیه کادران و مسئولین محترم شرکت زغال سنگ پروده طبس که با محبت و بزرگواری خویش بنده را یاری کردند و نیز شرایط مناسبی برای نهایت بنده فراهم نمودند، بسیار متکرم. همچنین از تمام معلمان و اساتید بزرگواری که در طی سال های گذشته اینجانب را یاری کرده و علم و معرفت را به من آموختند سپاسگزارم، امید که در پناه خداوند متعال ادامه دهنده راه آنان باشم.

از پدر و مادر مهربانم که محله محله زندگی خود را بی هیچ چشمداشتی وقف فرزندانشان کرده اند متکرم می گنم. پدر و مادری که دعا خیرشان، بهواره محافظ و پشتیبان اینجانب در مسیر سخت زندگی است. امید که در آینده ای نزدیک پانحوی این همه محبت آنان باشم. در پایان از همسر عزیزم که در این مسیر ناهموار صبورانه و دلوزانه اینجانب را همراهی و تشویق کرد، سپاسگزارم.

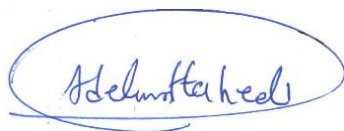
تهیه نامه

اینجانب عادل متحدی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رسالهٔ تحلیل تاب آوری سیستم تهویه در معادن جبهه کار طولانی مکانیزه تحت راهنمایی دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطائی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

امضای دانشجو



مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

زیرساخت حیاتی به دارایی، سیستم یا بخشی از آن که برای حفظ عملکردهای حیاتی جامعه مانند بهداشت، ایمنی، امنیت و رفاه اقتصادی یا اجتماعی ضروریست، اشاره دارد. در نتیجه، اختلال آن به دلیل عدم نگهداری و تعمیرات، عملکرد نامناسب یا خطا در مرحله طراحی، تأثیر قابل توجهی بر جامعه خواهد گذاشت. برای سال‌ها، مدیریت ریسک به‌عنوان تنها روش اساسی برای بهبود ایمنی سیستم‌های زیرساختی در برابر حوادث مخرب شناخته می‌شد. این رویکرد بر روی طراحی سیستم‌های تنومندی متمرکز است که قادرند با به حداقل رساندن احتمال وقایع و عواقب احتمالی آن‌ها با استفاده از برنامه‌های پیشگیرانه و حفاظتی، در برابر حوادث ناگوار مقاومت کند. با این حال، حوادث اخیر همچون همه‌گیری کووید-۱۹ نشان داده است که بیشتر سیستم‌های زیرساختی نمی‌توانند در برابر همه اختلالات احتمالی مقاومت کنند. بر همین اساس، توجهات از طراحی تنومند به طراحی تاب‌آور که تمرکز آن بر آمادگی، پاسخ و بازیابی می‌باشد، تغییر یافته است. تاب‌آوری مفهومی نوظهور است که کاربرد آن در مدیریت سیستم‌های مهندسی به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. به‌منظور اجرای مؤثر مدیریت تاب‌آوری، ابتدا باید برآوردی از تاب‌آوری سیستم به‌دست آید. با این حال، کمبود داده‌های تاریخی و اطلاعات محدود از جمله چالش‌های اصلی برای برآورد تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی به‌شمار می‌آیند. زیرا اکثر سیستم‌های جمع‌آوری داده بر مبنای ارزیابی تاب‌آوری طراحی نشده‌اند. علاوه بر این، در مطالعات موجود، از شاخص‌های مختلفی برای کمی‌سازی تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی استفاده شده است. این‌گونه شاخص‌ها به‌شکلی پیچیده تحت تأثیر عوامل متعددی همچون شرایط عملیاتی، اقدامات محافظتی، روند بازیابی، روند تدارکات و ... قرار دارند. در حال حاضر، مطالعات موجود در زمینه تاب‌آوری در مورد شناسایی و کمی‌سازی این نوع عوامل تأثیرگذار بسیار دقیق نیستند. بنابراین، در این رساله تلاش شده است تا اندیس تاب‌آوری کل که مبتنی بر ترکیب قضاوت متخصصین و تئوری مجموعه‌های فازی است، برای برآورد تاب‌آوری سیستم‌ها توسعه و ارائه داده شود. با اتخاذ این روش، عوامل مؤثر بر تاب‌آوری سیستم به‌طور مؤثری مدل شده و ضرایب اهمیت هر کدام از آن‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود. در این روش برای تحلیل تاب‌آوری از اندیس‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، تاب‌آوری سازمانی و کارایی سیستم PHM استفاده شده است. اندیس تاب‌آوری کل روشی کاربردی بوده و به سادگی منجر به شناسایی نقاط قوت و ضعف تاب‌آوری سیستم در زمینه‌های فنی (تاب‌آوری سخت) یا سازمانی (تاب‌آوری نرم) می‌شود که نقشه راهی برای تحلیل‌ها و اقدامات عمیق‌تر خواهند بود. در نهایت، کاربرد روش پیشنهادی برای سیستم بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس مورد استفاده قرار گرفت. در معدن زغالسنگ طبس، جایگاه بادبزنی این معدن شامل سه فن اصلی موازی است که بانک‌های تهویه نامیده می‌شوند و هر بانک حاوی دو فن محوری سری است. در این مطالعه، نوع اختلال در نظر

گرفته شده برای مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن به صورت خرابى برینگ تعریف شد. طبق نتایج حاصل شده، وضعیت ظرفیت مرمت مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن در وضعیت ضعیف‌ترى نسبت به ظرفیت‌هاى جذب و انطباق قرار دارد. بودجه و پشتیبانى نامناسب از سیستم از جمله دلایل این ضعف به‌شمار مى‌آیند. همچنین، در میان شاخص‌هاى عمومى مؤثر بر اندیس‌هاى قابلیت اطمینان و تعمیرپذیرى بادبزنهاى اصلی معدن، وضعیت شاخص شرایط عملیاتی حساس‌تر از سایرین است. همچنین، مشخص شد که در حیطه پرسنل مرتبط با مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن توجه زیادى به حفظ و انتقال تجربه و نیز درس‌گیرى از تجربیات گذشته نمى‌شود. در حوزه اندیس تاب‌آورى سازمانى، هر کدام از چهار شاخص عمومى تأثیرگذار بر روى اندیس تاب‌آورى سازمانى در وضعیت ضعیفى قرار داشته و وضعیت شاخص حس مالکیت بحرانی‌تر از سایر شاخص‌ها است. در این رساله تا حدى سعى شد راهکارهاى مناسب برای ارتقای وضعیت نقاط ضعف شناسایی شده ارائه شود. با این حال، ارائه راه‌حل‌هاى دقیق‌تر و مفیدتر نیازمند بررسی‌هاى میدانی گسترده‌ترى مى‌باشد. بنابراین، به‌منظور ارتقای وضعیت تاب‌آورى بادبزنهاى اصلی معدن مى‌بایست علل ریشه‌ای نقاط ضعف شناسایی شده به‌وسیله بررسی‌هاى میدانی مشخص شوند و سپس راهکارهاى متناسب برای بهبود وضعیت آن‌ها اتخاذ شوند.

کلیدواژه: تاب‌آورى، سیستم تهویه، بادبزنهاى اصلی، معدن زغالسنگ پروده طبس، زیرساخت حیاتی

لیست مقالات مستخرج از رساله

مقالات چاپ یا پذیرفته شده در مجلات ISI				
شماره	عنوان مقاله	عنوان مجله	وضعیت	سال
۱	Resilience Estimation of Critical Infrastructure Systems: Application of Expert Judgment	Reliability Engineering & System Safety	چاپ	۲۰۲۱
۲	Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review	Energies	چاپ	۲۰۲۱
مقالات ارائه شده در کنفرانس های داخلی و خارجی				
شماره	عنوان مقاله	عنوان کنفرانس	وضعیت	سال
۱	شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی تاب آوری سیستم تهویه	مدیریت ریسک و تاب آوری در صنایع معدنی	چاپ	۱۳۹۸
۲	تاب آوری زیرساخت های حیاتی و فرصت به کارگیری آن در حوزه معدن	نهمین کنفرانس مهندسی معدن ایران	چاپ	۱۳۹۹
۳	Organization Resilience Estimation: Application of Expert Judgment	IAI2021	پذیرش	۲۰۲۱

فهرست مطالب

۱- مقدمه	۱
۱-۱- بیان مسأله	۲
۲-۱- مفهوم تاب‌آوری	۵
۳-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق	۹
۴-۱- اهداف تحقیق	۱۰
۵-۱- سوالات تحقیق	۱۰
۶-۱- فرضیات تحقیق	۱۱
۷-۱- ساختار رساله	۱۲
۲- سابقه علمی موضوع	۱۳
۱-۲- آشنایی	۱۴
۲-۲- مرور سابقه علمی نظام‌مند	۱۵
۱-۲-۲- برنامه‌ریزی مرور	۱۶
۲-۲-۲- اجرای مرور	۱۸
۳-۲-۲- گزارش مرور	۱۸
۳-۲- مروری بر سابقه علمی موضوع تاب‌آوری به روش نظام‌مند	۱۸
۱-۳-۲- توسعه تشریفات مرور	۲۰
۲-۳-۲- شناسایی و انتخاب تحقیقات اولیه	۲۳
۳-۳-۲- استخراج و تلفیق اطلاعات	۲۵
۴-۲- جمع‌بندی	۵۳
۳- روش‌شناسی تحقیق	۵۷
۱-۳- آشنایی	۵۸
۲-۳- روش پیشنهادی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی	۵۹
۱-۳-۱- اندیس تاب‌آوری کل: شاخص‌های عمومی (سطح دوم)	۶۲
۲-۳-۲- عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص‌های عمومی	۶۸
۳-۳-۲- عوامل مؤثر بر شاخص‌های عمومی اندیس تاب‌آوری سازمانی	۷۳
۴-۳-۲- رویکرد جمع‌آوری اطلاعات مبتنی بر قضاوت کارشناسان	۷۷
۳-۳- جمع‌بندی	۸۴
۴- مطالعه موردی و جمع‌آوری اطلاعات	۸۷
۱-۴- آشنایی	۸۸
۲-۴- مطالعه موردی- مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن زغالسنگ پروده طیس	۸۹
۱-۴-۱- معرفی مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن	۹۱
۲-۴-۲- بررسی تاریخچه فعالیت مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن	۹۶
۳-۴- جمع‌آوری اطلاعات لازم برای تحلیل تاب‌آوری مجموعه بادبزنهاى اصلی	۱۰۲

۱-۳-۴	شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری	۱۰۲
۲-۳-۴	شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی اندیس تاب‌آوری سازمانی	۱۱۲
۳-۳-۴	طراحی پرسشنامه برای جمع‌آوری قضاوت کارشناسان	۱۱۴
۴-۳-۴	نتایج حاصل از اجرای نظرسنجی در معدن زغالسنگ پروده طبس	۱۱۸
۴-۴	جمع‌بندی	۱۲۲
۵	تحلیل تاب‌آوری بادبزنی اصلی معدن	۱۲۵
۱-۵	آشنایی	۱۲۶
۲-۵	تخمین امتیاز اندیس‌های سطح اول	۱۲۶
۱-۲-۵	تخمین امتیاز اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مجموعه بادبزنی‌های اصلی	۱۲۸
۲-۲-۵	تخمین امتیاز اندیس تاب‌آوری سازمانی شرکت زغالسنگ پروده طبس	۱۳۶
۳-۲-۵	تخمین امتیاز اندیس کارایی سیستم PHM	۱۴۱
۴-۲-۵	تخمین اندیس تاب‌آوری کل (TRI) مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن	۱۴۳
۵-۲-۵	جمع‌بندی	۱۴۴
۶	جمع‌بندی و پیشنهادات	۱۴۷
۷	منابع	۱۵۵
۸	پیوست‌ها	۱۷۷
۱-۶	نتیجه‌گیری	۱۴۸
۲-۶	پیشنهادهای	۱۵۳
	پیوست شماره ۱: تحقیقات اولیه شناسایی شده	۱۷۸
	پیوست شماره ۲: نحوه تخمین ضرایب اهمیت	۱۸۲
	الف) معرفی روش FDAHP	۱۸۲
	۱) نظرسنجی از کارشناسان	۱۸۲
	۲) محاسبه اعداد فازی	۱۸۲
	۳) تشکیل ماتریس معکوس فازی	۱۸۳
	۴) محاسبه ضرایب اهمیت فازی نسبی پارامترها	۱۸۳
	۵) غیرفازی کردن ضرایب اهمیت پارامترها	۱۸۴
	ب) تخمین وزن عوامل مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری	۱۸۴
	ج) تخمین وزن عوامل مؤثر بر اندیس تاب‌آوری سازمانی	۱۹۱

فهرست جداول

جدول ۱-۳- عبارات زبانی و مجموعه‌های فازی متناظر با آن‌ها.....	۷۸
جدول ۲-۳- معرفی عبارات زبانی هر کدام از کلاس‌ها.....	۸۳
جدول ۱-۴- مشخصات کلی بانک تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس.....	۹۴
جدول ۲-۴- مشخصات فنی موتور الکتریکی بادبزن‌های محوری بانک تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس.....	۹۴
جدول ۳-۴- تاریخچه فعالیت بانک‌های تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس.....	۹۹
جدول ۴-۴- سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۱.....	۱۱۶
جدول ۵-۴- سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۲.....	۱۱۷
جدول ۶-۴- سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۳.....	۱۱۸
جدول ۷-۴- اطلاعات کارشناسان تکمیل کننده پرسشنامه شماره ۱.....	۱۱۸
جدول ۸-۴- نتایج حاصل از پرسشنامه شماره ۱.....	۱۱۹
جدول ۹-۴- نتایج محاسبه مقادیر آلفای کرونباخ برای گروه‌های متفاوت سؤالات پرسشنامه شماره ۱.....	۱۲۰
جدول ۱۰-۴- نتایج حاصل از پرسشنامه شماره ۲.....	۱۲۰
جدول ۱۱-۴- نتایج محاسبه مقادیر آلفای کرونباخ برای گروه‌های متفاوت سؤالات پرسشنامه شماره ۲.....	۱۲۱
جدول ۱۲-۴- اطلاعات کارشناسان تکمیل کننده پرسشنامه شماره ۳.....	۱۲۲
جدول ۱۳-۴- اعداد فازی معادل با عبارات زبانی مورد استفاده در روش FFTA.....	۱۲۲
جدول ۱۴-۴- نتایج حاصل از پرسشنامه شماره ۳.....	۱۲۲
جدول ۱۵-۴- نتایج محاسبه مقادیر آلفای کرونباخ برای گروه‌های متفاوت سؤالات پرسشنامه شماره ۳.....	۱۲۲
جدول ۱-۵- کمی‌سازی نظرات کارشناسان در پرسشنامه شماره ۱.....	۱۲۷
جدول ۲-۵- قسمتی از نتایج کمی‌سازی نظرات کارشناسان در پرسشنامه شماره ۲.....	۱۲۸
جدول ۳-۵- امتیاز عوامل مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری بادبزن اصلی در سطح k ام.....	۱۲۹
جدول ۴-۵- وضعیت فعلی عوامل مؤثر بر اندیس تاب‌آوری سازمانی معدن زغالسنگ طبس در سطح k ام.....	۱۳۷
جدول ۵-۵- نتایج امکان شکست رویدادهای پایه.....	۱۴۲
جدول ۶-۵- نتایج تخمین مفاهیم تاب‌آوری در سطح اول سلسله مراتب.....	۱۴۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- تصویری شماتیک از مفهوم تاب‌آوری در سیستم‌های فنی..... ۷
- شکل ۱-۲- مراحل روش مرور سابقه علمی نظام‌مند ۱۷
- شکل ۲-۲- رشته جستجو تعیین شده برای اجرای فرآیند جستجو ۲۱
- شکل ۳-۲- نتایج فرآیند جستجو برای شناسایی تحقیقات ۲۴
- شکل ۴-۲- نسبت تحقیقات حذف شده به تعداد کل تحقیقات یافت شده به تفکیک ۲۵
- شکل ۵-۲- درصد تحقیقات اولیه شناسایی شده در هر منبع جستجو ۲۵
- شکل ۶-۲- تفکیک فراوانی تحقیقات شناسایی شده بر اساس سال انتشار تا تاریخ ۲ اکتبر ۲۰۲۰ ۲۶
- شکل ۷-۲- فراوانی انواع مطالعات موردی در حوزه تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی ۲۸
- شکل ۸-۲- فراوانی انواع شبکه‌های به کار رفته در زمینه تاب‌آوری سیستم‌های انرژی ۳۰
- شکل ۹-۲- فراوانی تحقیقات صورت گرفته در زمینه تاب‌آوری اجزای مختلف شبکه برق ۳۱
- شکل ۱۰-۲- فراوانی تحقیقات صورت گرفته در زمینه تاب‌آوری اجزای مختلف شبکه حمل و نقل ۳۲
- شکل ۱۱-۲- درصد کاربرد انواع ویژگی‌های تعریف کننده تاب‌آوری سیستم در تحقیقات اولیه ۳۹
- شکل ۱۲-۲- فراوانی کاربرد روش‌های تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی در تحقیقات شناسایی شده ۴۶
- شکل ۱۳-۲- تصویری شماتیک از مفهوم تاب‌آوری در روش ارائه شده توسط ژیل ۴۸
- شکل ۱۴-۲- تصویری شماتیک از مفهوم تاب‌آوری در روش ارائه شده توسط حیدری و همکاران ۴۸
- شکل ۱-۳- روش پیشنهاد شده برای تحلیل تاب‌آوری سیستم فنی ۶۳
- شکل ۲-۳- تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی ۸۰
- شکل ۳-۳- کلاس‌بندی امتیازات ۸۲
- شکل ۱-۴- موقعیت جغرافیایی ناحیه زغال‌دار پروده طبس ۹۰
- شکل ۲-۴- نمایی از نحوه تهویه کارگاه جبهه کار طولانی پسرود در معدن زغالسنگ پروده طبس ۹۲
- شکل ۳-۴- موقعیت مکانی مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس ۹۳
- شکل ۴-۴- بانک‌های تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس ۹۳
- شکل ۵-۴- نمایی شماتیک از اجزای تشکیل دهنده بانک تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس ۹۵
- شکل ۶-۴- شاخص‌های عمومی مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری ۱۰۲
- شکل ۷-۴- عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص طراحی مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس ۱۰۶
- شکل ۸-۴- عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص استراتژی فعلی نت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن ۱۰۹
- شکل ۹-۴- عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص شرایط عملیاتی مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن ۱۱۳
- شکل ۱۰-۴- عوامل تأثیرگذار بر روی اندیس تاب‌آوری سازمانی ۱۱۴
- شکل ۱-۵- امتیاز نهایی شاخص استراتژی فعلی نت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن ۱۳۰
- شکل ۲-۵- امتیاز نهایی شاخص طراحی سیستم مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس ۱۳۲
- شکل ۳-۵- تخمین امتیاز نهایی شاخص شرایط عملیاتی مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن ۱۳۵
- شکل ۴-۵- تخمین امتیاز نهایی اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن ۱۳۶
- شکل ۵-۵- تخمین امتیاز نهایی اندیس تاب‌آوری سازمانی معدن زغالسنگ پروده طبس ۱۳۹
- شکل ۶-۵- ساختار درخت خطا ۱۴۲
- شکل ۷-۵- مقایسه شرایط فعلی مفاهیم تاب‌آوری نسبت به شرایط ایده‌آل ۱۴۴

فصل ۱: مقدمه

۱-۱- بیان مسأله

جوامع نوین متکی به سیستم‌های به هم پیوسته‌ای همچون شبکه تأمین آب و برق هستند که خدماتی حیاتی را به شهروندان ارائه می‌دهند. به چنین سیستم‌هایی اصطلاحاً زیرساخت‌های حیاتی^۱ (CI) گفته می‌شود. زیرساخت حیاتی به دارایی، سیستم یا بخشی از آن که برای حفظ عملکردهای حیاتی جامعه مانند بهداشت، ایمنی، امنیت و رفاه اقتصادی یا اجتماعی ضروریست، اشاره دارد. در نتیجه، اختلال آن به دلیل نگهداری و تعمیرات^۲ (نت) غیر صحیح، عملکرد نامناسب یا خطا در مرحله طراحی، تأثیر قابل توجهی بر جامعه خواهد گذاشت (The Council of the European Union, 2008). در نتیجه، اقتصاد کشور و رفاه شهروندان آن به عملکرد مداوم زیرساخت‌های حیاتی، مانند شبکه‌های برق، آب، گاز، نفت و سیستم‌های مخابراتی بستگی دارد. این زیرساخت‌ها در معرض انواع مختلفی از مخاطرات مانند مخاطرات طبیعی، تروریسم و ... هستند. به‌عنوان مثال، در اثر وقوع زلزله سال ۱۹۹۴ لس آنجلس، ۲/۵ میلیون شهروند قطعی برق را تجربه کردند (Ouyang and Fang, 2017). از این رو، در مقایسه جامعه، مختل شدن فعالیت زیرساخت‌های حیاتی به‌طور بالقوه عواقب

¹ Critical infrastructures (CI)

² Maintenance

شدیدی برای آن جامعه به همراه خواهند داشت.

در حوزه معدن کاری نیز همانند جامعه، زیرساخت‌های متعددی در حال ارائه خدمات هستند. در این حوزه عبارت "زیرساخت" به دارایی‌های نصب شده در محل معادن سطحی و زیرزمینی گفته می‌شود. زیرساخت‌های معدن به شدت وابسته به موقعیت و اندازه معدن، روش معدن کاری، تجهیزات استفاده شده در آن و نیروی کار هستند. زیرساخت‌های معادن شامل سیستم تهویه، شبکه حمل و نقل، سیستم آبکشی و پمپاژ، سیستم توزیع و تولید نیرو، سیستم مدیریت پساب‌ها، شبکه ارتباطاتی، تجهیزات اتوماسیون و... می‌شوند (Kumar et al., 2011). اما در میان تمام زیرساخت‌های موجود در معادن، سیستم تهویه مهم‌ترین زیرساختی است که ماهیت عملکرد آن با تعریف ارائه شده برای زیرساخت‌های حیاتی انطباق دارد. در نتیجه، سیستم تهویه زیرساختی حیاتی برای معادن به‌شمار می‌آید.

سیستم تهویه معدن سیستمی پویا و یکی از مهمترین اجزاء معادن زیرزمینی بوده که بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است. از جمله وظایف سیستم تهویه تأمین حجم مشخصی از هوا در بخش‌های مختلف معدن به منظور ایجاد شرایطی مناسب برای فعالیت پرسنل معدن است. سیستم تهویه معدن از بخش‌هایی است که در تمام مدت بجز زمان‌های مشخص شده برای فرآیند تعمیرات باید روشن باشد. در صورت توقف ناخواسته سیستم تهویه و ناتوانی آن در ارسال هوای تازه به داخل معدن، علاوه بر خطر کاهش هوا برای فعالیت پرسنل، خطر افزایش غلظت گازهایی که سمی بوده و یا قابلیت انفجار دارند نیز به شدت افزایش پیدا می‌کند (Cheng et al., 2014). سیستم تهویه معدن با ترقیق گازها و ذرات سمی و قابل انفجار (مانند مونوکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، متان (CH₄) و گرد زغال) به‌طور مستقیم بر روی سلامتی و ایمنی پرسنل معدن زیرزمینی تأثیرگذار است و در صورت خاموش شدن آن به علت شرایط اضطراری می‌بایست تمام فعالیت‌ها قطع

شده و معدن تخلیه شود. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۶، سیستم تهویه معدن زغالسنگ آپین^۱ در کشور استرالیا در ساعتی از روز به علت نقص فنی متوقف شد. این مسئله باعث تجاوز درصد گاز متان از مقدار مجاز آن شده و به علت خطر انفجار گاز، کار متوقف شده و تمامی کارگران از معدن بیرون آورده شدند. از این رو، باید به دنبال رویکردی بود که با استفاده از آن ایمنی سیستم تهویه را ارتقاء بخشید.

به طور کلی، در سال‌های گذشته، مدیریت ریسک به عنوان تنها رویکردی که از آن می‌توان برای ارتقای ایمنی سیستم در برابر اختلالات^۲، خرابی‌ها^۳ و یا مخاطرات^۴ استفاده کرد، شناخته می‌شد. هدف این رویکرد کاهش احتمال وقوع مخاطره و عواقب ناشی از آن با استفاده از برنامه‌های پیشگیرانه و حفاظتی است. اما جلوگیری از وقوع اختلالات الزاماً در تمام موارد امکان‌پذیر نیست. زیرا حوادث سال‌های گذشته نشان داده است که محافظت از زیرساخت‌ها در برابر انواع اختلالات با رویکردهای سنتی همچون مدیریت ریسک، تقریباً هدفی غیرقابل تحقق است. حوادثی مانند خاموشی سال ۲۰۰۶ که ۱۵ میلیون نفر را در قاره اروپا تحت تأثیر قرار داد، خاموشی کشور تانزانیا در سال ۲۰۰۹ که به مدت سه ماه ادامه یافت، زلزله و سونامی سال ۲۰۱۱ در کشور ژاپن که باعث وقوع زنجیره‌ای از حوادث ناگوار شد و پیچیده‌تر از همه، شیوع جهانی بیماری کرونا که تاکنون خسارات قابل توجهی به زیرساخت‌های بهداشتی کشورهای مختلف جهان وارد کرده است، حاکی از آن است که پیش‌بینی و جلوگیری از همه خطرات احتمالی یا حوادث مخرب و تأثیرات شدید آن‌ها لزوماً در همه موارد امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر، اختلالات ممکن است احتمال وقوع بسیار کمی داشته و یا حتی ماهیتی نامشخص داشته باشند که این مسأله مدیریت ریسک را نیز دشوارتر می‌کند (Linkov et al., 2014; Hosseini et al., 2016; Goldbeck et al., 2019). در نتیجه، استفاده از مدیریت ریسک به تنهایی

¹ Appin

² Disruptions

³ Failures

⁴ Hazards

برای مدیریت اختلالاتی که احتمال وقوع بسیار کم و عواقب بسیار شدیدی دارند، امری چالش برانگیز است (Sarwar et al., 2018). بر همین اساس، مدیران برای تضمین ایمنی و پیوستگی عملیات خود و نیز داشتن عملکردی کافی احتیاج به توسعه مفاهیمی بدیع دارند.

برای سال‌ها، هدف اصلی برنامه‌ریزان و مدیران زیرساخت‌ها جلوگیری از وقوع مخاطرات و طراحی سیستم‌های تنومندی^۱ بود که در برابر انواع اختلالات از خود مقاومت نشان دهند. با این حال، تجربیات نشان داده است که چنین هدفی غیرقابل دسترس بوده است. بر همین اساس، اخیراً توجه مدیران زیرساخت‌های حیاتی به سمت مفهوم تاب‌آوری^۲ معطوف شده است. تاب‌آوری به مدیران کمک می‌کند تا ایمنی و عملکرد مداوم زیرساخت‌های حیاتی را تضمین کنند. بنابراین، طراحی زیرساخت‌های تاب‌آور^۳ به جای زیرساخت‌های شدیداً مقاوم، تفکر جدیدی است که مدیران و اپراتورهای این‌گونه سیستم‌ها می‌توانند در مواجهه با اختلالات به آن اتکا کنند. بر همین اساس، مدیران می‌بایست بر روی راهبردهایی متمرکز شوند که:

- (۱) زیرساخت‌های حیاتی را برای وقوع اختلالات آماده کنند.
- (۲) منجر به ارائه پاسخ‌های مناسبی در زمان وقوع اختلال شوند.
- (۳) باعث اجرای سریع و کارآمد فرایند بازیابی زیرساخت پس از وقوع اختلال شوند.

۱-۲- مفهوم تاب‌آوری

واژه "Resilience" برگرفته از واژه‌ی لاتین "Resilire" به معنای جستن یا برگشتن^۴ است (Yoon et al., 2017). کاربرد مفهوم تاب‌آوری از حوزه سیستم‌های زیست‌بومی به سایر حوزه‌ها گسترش یافته

^۱ Robust

^۲ Resilience concept

^۳ Resilient infrastructure

^۴ Bounce back

است (Holling, 1973). براساس سابقه علمی موضوع، تعاریف مختلفی برای تاب‌آوری در حوزه‌های مختلف ارائه شده است (Harwell et al., 1981; Bruneau et al., 2003; Rose, 2007; Taşan-Kok et al., 2013; Francis and Bekera, 2014; Pant et al., 2014b; Hosseini and Barker, 2016). تاب‌آوری مفهومی نوظهور است که کاربرد آن در مدیریت زیرساخت‌های حیاتی فنی^۱ (مهندسی) به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. در حوزه سیستم‌های فنی^۲ که بحث اصلی رساله حاضر نیز می‌باشد، یکی از جدیدترین تعاریف مربوط به تاب‌آوری توسط پروژه اروپایی IMPROVER که هدف آن به‌کارگیری مفهوم تاب‌آوری در زمینه زیرساخت‌های حیاتی قاره اروپا است، ارائه شده است. در این پروژه تاب‌آوری به‌صورت "توانایی زیرساخت حیاتی برای مقاومت، جذب، انطباق و بازیابی به‌موقع و کارآمد از اثرات مخاطره به‌منظور حفظ و مرمت خدمات ضروری" تعریف شده است. (Petersen et al., 2020).

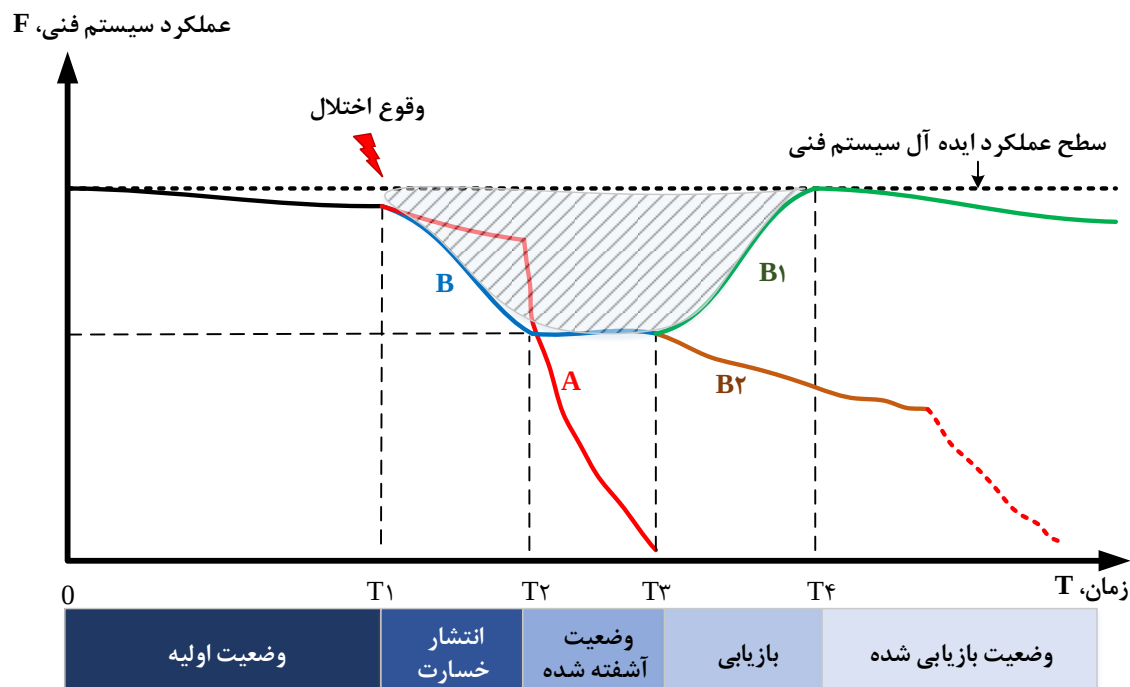
طبق تعریف فوق، مفهوم تاب‌آوری مطابق با شکل ۱-۱ به‌صورت ساده قابل نمایش خواهد بود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، فعالیت یک سیستم فنی فرضی در مبدأ زمان آغاز می‌شود. با گذشت زمان و افزایش عمر آن، به‌طور عادی مقداری از سطح عملکرد ایده‌آل آن کاسته می‌شود. پس از وقوع رویداد مخرب در زمان T_1 ، دو نوع مسیر برای ادامه فعالیت سیستم وجود خواهد داشت؛ مسیر A و مسیر B . معمولاً مسیر A را سیستم‌هایی طی می‌کنند که در آن‌ها تنها به بحث مقاوم‌سازی در برابر حوادث توجه شده و فکری برای انعطاف‌پذیری و انطباق با شرایط جدید نشده است. چنین سیستم‌هایی ماهیتی ترد^۳ و شکننده دارند. در نتیجه، هنگامی که فشار حاصل از اختلال از حد مقاومت و ظرفیت جذب آن‌ها تجاوز کند، به‌طور نگرانی، شکستی شدید را تجربه کرده و به‌صورت کامل فرو می‌پاشند. اما سیستم‌هایی که مسیر B طی می‌کنند، آن‌هایی هستند که علاوه بر مقاوم

^۱ Technical critical infrastructures

^۲ در ادامه رساله، عبارت "سیستم فنی"، جایگزین عبارت "زیرساخت حیاتی فنی" شده است.

^۳ Brittle

بودن، منعطف نیز هستند. چنین سیستم‌هایی با شرایط جدید سازگار شده و شکست‌های ناگهانی را تجربه نمی‌کنند. در واقع سیستم‌های تاب‌آور شالوده و یا ارزش اصلی^۱ خود را حفظ می‌کنند.



شکل ۱-۱- تصویری شماتیک از مفهوم تاب‌آوری در سیستم‌های فنی.

طبق شکل، پس از اتمام اختلال در زمان T_2 ، سیستم مورد نظر مدت زمانی را در وضعیت آشفته شده سپری می‌کند ($T_3 - T_2$). دسترسی به منابع (مانند دانش، قطعات یدکی و بودجه) و تصمیم‌گیری سریع مدیریت سیستم منجر به کاهش این فاصله زمانی خواهند شد. پس از آغاز عملیات بازیابی در زمان T_3 ، کیفیت تصمیمات و راهکارهای اتخاذ شده و نیز نحوه تخصیص منابع منجر به ایجاد مسیرهای بازیابی متفاوتی می‌شوند. اگر عملیات بازیابی مسیر B_1 را طی کند، نشان دهنده اخذ تصمیمات صحیح و تخصیص مناسب منابع است. هرچه کیفیت عملیات بازیابی بالاتر باشد، سطح عملکرد بازیابی شده در زمان T_4 نزدیک‌تر به عملکرد اولیه سیستم خواهد بود. در نتیجه، سیستم‌های

¹ Core value

تاب‌آور علاوه بر مقاوم بودن و منعطف بودن، قابلیت بازیابی^۱ نیز دارند. در مقابل، مجموعه‌ای از ناکارآمدی‌ها مسیر بازیابی سیستم را به مسیر B_2 تبدیل می‌کنند. به‌عنوان مثال، اخذ تصمیمات و راهکارهای نادرست توسط مدیریت، مهارت ناکافی تعمیرکاران، تشخیص غلط بخش‌های معیوب، عدم تعهد کاری تعمیرکاران یا کارگران، عدم تخصیص به‌موقع منابع و یا تدارکات نامناسب قطعات یدکی ممکن است باعث وخیم‌تر شدن وضعیت سیستم شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورتی که چنین وضعیتی ادامه پیدا کند، در نهایت منجر به شکست کامل و فروپاشی سیستم خواهد شد. همچنین، باید توجه داشت که هر چه تاب‌آوری سیستم بیشتر باشد، مساحت فضای هاشور خورده در شکل ۱-۱ کمتر خواهد بود.

تحلیل تاب‌آوری بخشی از چرخه مدیریت تاب‌آوری^۲ به‌شمار می‌آید (Rød, 2020). مدیریت تاب‌آوری با تعیین هدف آغاز شده، با تحلیل و ارزیابی تاب‌آوری ادامه پیدا کرده و در نهایت با ارتقای تاب‌آوری (در صورت لزوم) پایان می‌یابد. از این رو، بعد از تعیین هدف، تحلیل تاب‌آوری به‌عنوان اولین گام در مدیریت مؤثر تاب‌آوری شناخته می‌شود. البته در این مسیر تحلیل‌گر با چالش‌های متعددی همچون کمبود داده‌هایی از جنس تاب‌آوری و نیز انتخاب مناسب‌ترین روش تحلیل مواجه خواهد بود. علاوه بر این، طبق تعریف ارائه شده برای تاب‌آوری، برای داشتن سیستمی تاب‌آور هم باید به فاز برنامه‌ریزی^۳ و آماده‌سازی^۴ سیستم قبل از وقوع اختلال توجه داشت و هم فاز بازیابی سیستم بعد از وقوع اختلال را مدنظر قرار داد. از این رو، ابزارهای انتخاب شده در فرآیند تحلیل تاب‌آوری باید قادر به در نظر گرفتن هر دو فاز باشند. بنابراین، در این رساله روشی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی با بررسی مطالعه موردی از سیستم تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس ارائه خواهد شد.

¹ Recoverability

² Resilience management

³ Planning

⁴ Preparedness

۱-۳- اهمیت و ضرورت تحقیق

در دنیا، سطح توجهات و حساسیت‌های جوامع نسبت به برخی از حوادث غیر مترقبه بسیار بیشتر از سایر حوادث است. به‌عنوان مثال، سقوط هواپیمای مسافربری تا مدت‌ها جامعه را به‌ویژه از لحاظ احساسی با خود همراه کرده و تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مقابل، حساسیت همین جامعه نسبت به سوانح جاده‌ای که سالانه هزاران نفر را به کام مرگ می‌کشاند، بسیار کمتر است. چنین تفاوت عجیبی ریشه در عواقب ناشی از وقوع حادثه دارد. برخی از حوادث گرچه کمتر روی می‌دهند، اما به دلیل عواقب شدیدی که در پی دارند، تأثیری بیشتری بر روی جامعه می‌گذارند. نتایج بررسی تاریخی حوادث رخ داده شده در حوزه معدن‌کاری چه در داخل و چه در خارج از کشور حاکی از آن است که حوادث معدنی نیز جزء گروهی از حوادث هستند که ممکن است تأثیر آن‌ها از محیط معدن فراتر رفته و حتی جامعه‌ای را تا مدت‌ها در سطح ملی یا جهانی درگیر خود کنند. حادثه معدن مس و طلای سن خوزه شیلی در سال ۲۰۱۰، حادثه معدن زغالسنگ سومای ترکیه در سال ۲۰۱۴ و حادثه معدن زغالسنگ زمستان یورت ایران در سال ۲۰۱۷ نمونه‌های آشکاری برای این بحث به‌شمار می‌آیند. سیستم تهویه مهمترین سیستم فنی در معادن زیرزمینی به‌حساب می‌آید. با توجه به نقش حیاتی سیستم تهویه، وقوع اختلال در چنین سیستمی از آن دست حوادث خواهد بود که عواقب شدیدی داشته و علاوه بر خسارات جانی و مالی که برای شرکت‌های معدنی در پی خواهد داشت، متعاقباً تأثیر روحی و روانی بسیار زیادی نیز بر روی جامعه خواهد گذاشت. در نتیجه، به‌کارگیری مفهوم تاب‌آوری در این حوزه از این منظر که باعث کاهش خسارات جانی و مالی شده و از حاکم شدن جوّی منفی نسبت به معدن و معدن‌کاری در جامعه جلوگیری می‌کند، بسیار اهمیت دارد. نکته دیگری که وجود دارد این است که اغلب تجهیزات مربوط به سیستم تهویه معادن وارداتی بوده و ساخت شرکت‌های خارجی هستند. بنابراین، وضع تحریم‌های ظالمانه باعث شده است تا به‌دلیل عدم دسترسی کافی به قطعات یدکی، تعمیرکار و ... عملکرد این سیستم بیش از پیش حساس شود. علاوه

بر این، جلوگیری از وقوع تمامی حوادث تقریباً غیرممکن است و به‌طور کامل نمی‌توان به این اطمینان رسید که با تمهیدات اتخاذ شده توسط مدیریت دیگر حادثه‌ای برای سیستم روی ندهد. از این رو، برای کاهش تأثیر چنین حوادث غیر مترقبه‌ای در سیستم‌های فنی و محدود کردن خسارات ناشی از آنها، توسعه مفهوم تاب‌آوری بسیار ضروری است.

۴-۱- اهداف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق تحلیل تاب‌آوری با استفاده از شاخص‌های عملکردی برای یک سیستم تهویه معدن زیرزمینی است. همچنین اهداف تحقیق به صورت جزئی به شرح زیر هستند:

- انتخاب شاخص‌های عملکردی مناسب برای تحلیل تاب‌آوری سیستم تهویه.
- بررسی کفایت و امکان وارد نمودن شاخص‌های عملکردی گزینش شده برای تخمین تاب‌آوری سیستم تهویه.
- تحلیل شاخص‌های عملکردی سیستم تهویه.
- ارائه مدل یا رابطه‌ای برای تخمین تاب‌آوری سیستم تهویه با استفاده از این شاخص‌ها.

۵-۱- سوالات تحقیق

با توجه به بررسی صورت گرفته، اصلی‌ترین بحث موجود نحوه مدل کردن تاب‌آوری با استفاده از شاخص‌های عملکردی سیستم است. بنابراین پرسش‌های مرتبط با این بحث به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

- شاخص‌های عملکردی مناسب برای تحلیل تاب‌آوری سیستم تهویه چیست؟

- با توجه به شرایط محیطی سیستم‌های معدنی، میزان حساسیت، بحرانی بودن آن‌ها، نحوه ثبت اسناد و اطلاعات موجود در سرزمین، میزان دسترسی به این اطلاعات و ... امکان وارد نمودن تمامی شاخص‌ها در تحلیل تاب‌آوری این نوع از سیستم‌ها وجود دارد؟
- آیا این شاخص‌ها ارزیابی جامعی از تاب‌آوری سیستم تهویه ارائه خواهند داد؟

۱-۶- فرضیات تحقیق

فرضیات در نظر گرفته شده در این تحقیق به شرح زیر هستند:

- تنها سیستم‌های محیط معدنی مورد توجه بوده و سایر محیط‌های عملیاتی در این پژوهش مطالعه نخواهند شد.
- از سیستم‌های اساسی در معدن تنها سیستم تهویه مورد نظر است.
- پس از تعیین شاخص‌های عملکردی مؤثر بر تاب‌آوری سیستم تهویه، تنها آن دسته از شاخص‌هایی برگزیده خواهند شد که تعیین مقادیر کمی آن‌ها با توجه به بانک داده موجود امکان‌پذیر است.
- برای تخمین و تحلیل شاخص‌های عملکردی سیستم تهویه از اطلاعات و اسناد موجود در سرزمین استفاده خواهد شد.
- مرزبندی دقیق سیستم تهویه و تعیین اجزا پس از تحلیل سیستم در سرزمین ارائه خواهد شد.
- اجزاء به‌عنوان سطحی تعریف می‌شود، که داده‌های مورد نیاز برای تخمین یا محاسبه ویژگی‌های آن قابل دستیابی باشد.

۷-۱- ساختار رساله

گزارش رساله در شش فصل تنظیم شده است. فصل اول به کلیات موضوع رساله اختصاص دارد. در فصل دوم سابقه مفهومی موضوع با استفاده از روشی نظام‌مند^۱ مورد بررسی قرار گرفته و طی این بررسی مفاهیم اساسی، زمینه‌های کاربرد و روش‌های تحلیل تاب‌آوری سیستم‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. در فصل سوم روش‌شناسی تحقیق برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی معرفی و در نهایت جزئیات و مراحل به‌کارگیری آن تبیین می‌شوند. در فصل چهارم ابتدا سیستم تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس به‌عنوان مطالعه موردی معرفی می‌شود و سپس نحوه جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز و نتایج آن ارائه می‌شوند. در فصل پنجم نتایج تحلیل تاب‌آوری سیستم تهویه بیان می‌شوند. فصل ششم نیز به جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات اختصاص یافته است.

¹ Systematic

فصل ۲: سابقه علمی موضوع

۲-۱- آشنایی

طی سال‌های گذشته، تحقیقات متعددی در زمینه تاب‌آوری انجام شده است. تحقیقات انجام شده طیف وسیعی از کارهای انجام گرفته در حوزه‌های مختلف مهندسی و غیرمهندسی (اجتماعی، اقتصادی و ...) را شامل می‌شوند. بخشی از تحقیقات به بسط و توسعه مفهوم تاب‌آوری پرداخته‌اند و برخی دیگر به کاربرد این مفهوم توجه کرده و روش‌های متنوعی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های مختلف ارائه کرده‌اند. با این وجود، کماکان در مورد تعریف، ویژگی‌ها و کاربردهای این مفهوم ابهاماتی وجود دارد. بدون تردید، استفاده از مفهوم تاب‌آوری بدون درکی صحیح از آن منجر به تحلیل و برنامه‌ریزی ناکارآمدی خواهد شد. در نتیجه، به‌منظور کسب اطلاعات هر چه بیشتر در مورد مفهوم، زمینه‌های کاربرد و نیز روش‌های تحلیل تاب‌آوری در حوزه سیستم‌های مهندسی می‌بایست تحقیقات موجود در این حوزه مورد مرور و بررسی قرار بگیرند.

به‌طور معمول، پژوهشگران برای دستیابی به پاسخ سوالاتی که در ذهنشان نسبت به موضوعی خاص ایجاد شده است، به مرور سابقه عملی آن موضوع روی می‌آورند. در چنین شرایطی، پژوهشگر تنها طبق ذهنیت قبلی خود از موضوع مورد بحث به جستجوی مقالات و تحقیقات مرتبط می‌پردازد. سپس این جستجو تا رسیدن به مقالات مورد نظر و انتخاب موارد مناسب ادامه یافته و با جمع‌بندی

نتایج به دست آمده و تلفیق آن‌ها با تجربیات و نتیجه‌گیری نهایی اتمام می‌یابد. به این نوع از مرور اصطلاحاً مرور سابقه علمی غیرنظاممند^۱ گفته می‌شود. در مقابل، به انجام تمام مراحل مذکور اما طبق یک سری تشریفات کاملاً دقیق و از قبل تنظیم شده، مرور سابقه علمی نظاممند^۲ گفته می‌شود. روش نظاممند به برآوردی واحد و مشخص در پاسخ به سؤالات پژوهشگر دست می‌یابد. بر همین اساس، چنین روشی از توان و اعتبار بالایی در نتیجه‌گیری و تصمیم‌سازی برخوردار است. با این حال بایستی توجه داشت که اجرای روش نظاممند به وقت و تلاش بسیار نیز زیادی احتیاج دارد. طبق آن‌چه گفته شد، در ادامه فصل با استفاده از روش مرور نظاممند، سابقه علمی مفهوم تاب‌آوری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور، ابتدا روش انجام کار و مراحل آن شرح داده شده و سپس مرحله به مرحله تا حصول نتیجه نهایی اجرا می‌شوند.

۲-۲- مرور سابقه علمی نظاممند

روش مرور سابقه علمی نظاممند که اولین بار در سال ۲۰۰۴ توسط کیتچنهام^۳ معرفی شده ابزاری برای شناسایی، ارزیابی و تفسیر کلیه تحقیقات قابل دسترس در مورد موضوعی خاص است (Kitchenham, 2004). برای این نوع مرور، روش‌شناسی کاملاً مشخصی ارائه شده اما بر خلاف روش سنتی^۴ (مرور سابقه علمی غیرنظاممند)، روش نظاممند به وقت و تلاش بسیار بیشتری نیازمند است. کاربرد روش مرور نظاممند از حوزه پزشکی و مراقبت‌های بهداشتی به سایر زمینه‌ها گسترش یافته و اخیراً کاربرد آن در برخی از زمینه‌های مهندسی مانند مهندسی نرم افزار، سیستم‌های حمل و نقل و تولید، افزایش یافته است (Carroll et al., 2020; Chacón-Luna et al., 2020; Lavissière et al., 2020; Paschou et al., 2020; Preidel et al., 2018; Silva et al., 2020).

¹ Nonsystematic Literature Review

² Systematic Literature Review

³ Kitchenham

⁴ Traditional

در سال ۲۰۰۷، کیتچنهام و چارترز تغییراتی بر روی این روش اعمال کرده و راهنمای جدیدی برای استفاده از آن ارائه کردند (Kitchenham and Charters, 2007). بر اساس این راهنما، مراحل مرور سابقه علمی به روش نظاممند شامل برنامه‌ریزی مرور^۱، اجرای مرور^۲ و گزارش مرور^۳ می‌شوند. جزئیات مراحل مذکور در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. همچنین در ادامه هر کدام از این مراحل شرح داده می‌شوند.

۱-۲-۲- برنامه‌ریزی مرور

همان‌طور که در شکل ۱-۲ نیز نشان داده شده است، در مرحله اول، پس از این که نیاز به انجام مرور نظاممند مشخص شد، سؤالات تحقیق^۴، عبارات جستجو^۵، منابع جستجو^۶، معیارهای انتخاب تحقیقات^۷ و استراتژی استخراج اطلاعات^۸ از تحقیقات شناسایی شده باید مشخص شوند. همان‌طور که گفته شد، در قدم اول، شناسایی نیاز به انجام مرور نظاممند ضروری است. به‌عنوان مثال، شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی در زمینه‌ای خاص نیاز به انجام مرور نظاممند دارد. در قدم دوم، بر اساس اهداف تحقیق، سؤالاتی مطرح می‌شوند که می‌بایست با استفاده از نتایج مرور نظاممند پاسخ داده شوند. در قدم سوم، عبارات جستجو (کلمات کلیدی^۹) مرتبط با موضوع می‌بایست مشخص شوند. عبارات جستجو باید براساس سؤالاتی که در قدم قبلی مطرح شده‌اند تعیین و انتخاب شوند. بنابراین، چنین عباراتی در شناسایی تحقیقاتی که برای پاسخ‌دهی به سؤالات تحقیق مفید خواهند بود، کمک بسیار زیادی می‌کنند. در قدم بعد، منابع جستجو مورد نیاز برای یافتن تحقیقات مشخص می‌شوند.

¹ Planning the review

² Conducting the review

³ Reporting the review

⁴ Research questions

⁵ Search terms

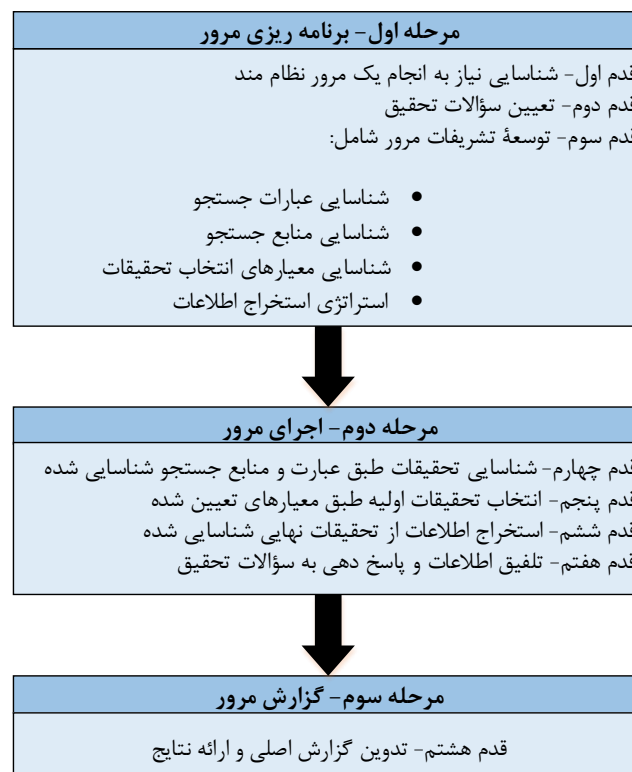
⁶ Search resources

⁷ Selection criteria

⁸ Data extraction strategy

⁹ Key words

پایگاه‌های داده الکترونیکی مانند ScienceDirect و Springer-Link نمونه‌ای از این منابع هستند (Kitchenham and Charters, 2007; Kitchenham et al., 2009).



شکل ۱-۲ - مراحل روش مرور سابقه علمی نظام‌مند (Kitchenham and Charters, 2007)

با استفاده از عبارات و منابع جستجو، حجم زیادی از تحقیقات مرتبط با موضوع شناسایی می‌شوند. با این حال، همه تحقیقات شناسایی شده نباید در فرآیند مرور نظام‌مند وارد شوند. از این رو، برای پالایش تحقیقات شناسایی شده می‌بایست معیارهای شمول و استثناء^۱ (ورود و خروج) تعیین شوند. به‌عنوان مثال، حذف تحقیقاتی که در واقع فصلی از یک کتاب هستند می‌تواند معیاری برای خروج چنین تحقیقاتی باشد. در آخرین قدم نیز استراتژی استخراج اطلاعات به‌نحوی که تمام داده‌های مورد نیاز برای پاسخ به سؤالات تحقیق جمع‌آوری شوند، تبیین می‌شود (Kitchenham and Charters, 2007; Kitchenham et al., 2009). استراتژی استخراج داده‌ها چگونگی جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز

¹ Inclusion and exclusion criteria

از تحقیقات انتخاب شده را تعیین می‌کند. برای جمع‌آوری موارد مورد نیاز، باید فرم استخراج داده‌ها طراحی شود. این فرم برای جمع‌آوری داده‌هایی همچون موضوع تحقیق، تعاریف مورد نیاز، روش‌های استفاده شده، سال انتشار و غیره که برای پاسخ به سؤالات تحقیق لازم هستند، استفاده می‌شود (Kitchenham and Charters, 2007).

۲-۲-۲- اجرای مرور

در این مرحله، با توجه به اقدامات انجام شده در مرحله اول، فرایند مرور باید آغاز شود. در اولین قدم، بر اساس عبارات و منابع جستجو، حجم زیادی از تحقیقات یافت می‌شوند. سپس، تحقیقاتی که از دیدگاه معیارهای شمول و استثناء شرایط لازم را ندارند، باید از جمع تحقیقات شناسایی شده حذف شوند. تحقیقاتی که پس از اعمال معیارهای شمول و استثناء باقی می‌مانند به عنوان تحقیقات اولیه^۱ در نظر گرفته می‌شوند. در قدم بعد، داده‌های مورد نیاز از تحقیقات اولیه استخراج می‌شوند.

۲-۲-۳- گزارش مرور

در پایان روند مرور نظام‌مند، نتایج بدست آمده از مراحل برنامه‌ریزی و اجرای مرور به صورت منظم و در قالب گزارش ارائه می‌شوند.

۲-۳- مروری بر سابقه علمی موضوع تاب‌آوری به روش نظام‌مند

در این بخش، از روش توسعه یافته در شکل ۲-۱ برای مرور نظام‌مند سابقه علمی در زمینه تاب‌آوری سیستم‌های فنی استفاده شده است. همانطور که در بخش گذشته توضیح داده شد، در آغاز می‌بایست نیازمند بودن به اجرای روش مرور نظام‌مند توجیه شود.

¹ Primary studies

برای استفاده کارآمد از مفهوم تاب‌آوری، ابتدا باید این مفهوم به درستی درک شود. بدون این آگاهی، مدیران سیستم‌های فنی قادر به کاهش تلفات کلی خدمات سیستم‌ها و بازیابی سریع و کارآمد آن‌ها نخواهند بود. بنابراین، لازم است که مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در ارتباط با تاب‌آوری سیستم‌های فنی که باعث ارتقای آگاهی و دانش ما در مورد مفهوم تاب‌آوری می‌شوند را مورد بررسی قرار گرفته شوند. علاوه بر این، برای سال‌ها، همان‌طور که در فصل اول نیز ذکر شد، هدف اصلی برنامه‌ریزان و مدیران طراحی سیستم‌هایی بود که بتوانند در برابر انواع اختلالات مقاومت کنند. با این حال، بر اساس تجربیات ذکر شده، این هدف کماکان غیرقابل تحقق بوده و توجهات باید به سمت مفهوم تاب‌آوری تغییر کنند. شرط لازم برای داشتن تغییری مؤثر، افزایش آگاهی و دانش پژوهشگران، برنامه‌ریزان و مدیران سیستم‌های فنی درباره مفهوم تاب‌آوری است. پس از توجیه نیازمندی به اجرای مرور نظام‌مند، سؤالات تحقیق می‌بایست تعریف شوند. با توجه به اهداف مدنظر، سؤالات مطرح شده در مورد موضوع تاب‌آوری سیستم‌های فنی به شرح زیر هستند:

• **سؤال اول:** آیا تاب‌آوری موضوعی نوظهور و برجسته در زمینه سیستم‌های فنی است؟

دلیل طرح چنین سؤالی این است که برخی از موضوعات علمی با گذشت زمان جذابیت خود را از دست داده و یا دیگر ظرفیت لازم برای انجام تحقیقات بیشتر را ندارند. برای یافتن پاسخ چنین سؤالی در مورد موضوع تاب‌آوری، بررسی میزان انتشار سالانه تحقیقات مرتبط با تاب‌آوری سیستم‌های فنی سودمند خواهد بود. از این‌رو، تحقیقات یافت شده بر مبنای سال انتشار دسته‌بندی می‌شوند.

• **سؤال دوم:** مفهوم تاب‌آوری در چه زمینه‌هایی به کار گرفته شده است؟

به کمک این سؤال حوزه‌های پر کاربرد این مفهوم در سطح جهان شناسایی می‌شوند. برای پاسخ به این سؤال از مرور نظام‌مند و دسته‌بندی تحقیقات یافت شده بر اساس نوع مطالعه موردی استفاده می‌شود.

• **سؤال سوم:** تاب‌آوری در زمینه سیستم‌های فنی به چه صورت تعریف می‌شود؟

به‌طور حتم، بدون داشتن تعریفی جامع از مفهوم تاب‌آوری، کاربرد آن چالش برانگیز خواهد بود. بنابراین، این سؤال برای درک تعریف مفهوم تاب‌آوری در زمینه سیستم‌های فنی تعریف شده است.

• **سؤال چهارم:** چه ویژگی‌هایی تاب‌آوری سیستم‌های فنی را تعریف یا تعیین می‌کنند؟

تاب‌آوری مفهومی کلان بوده و لازمه به‌کارگیری صحیح آن دستیابی به درکی درست از ویژگی‌هایی است که بر روی آن تأثیر می‌گذارند. بدون نایل شدن به چنین درک و شناختی، کاربرد این مفهوم بسیار دشوار خواهد بود.

• **سؤال پنجم:** چه نوع روش‌هایی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی ارائه شده است؟

روش‌های متنوعی برای تحلیل تاب‌آوری در زمینه‌های مختلف ارائه شده است. مرور سابقه علمی موضوع به صورت نظام‌مند به شناسایی و دسته‌بندی روش‌های موجود کمک بسیار زیادی می‌کند.

۲-۳-۱- توسعه تشریفات مرور^۱

در این گام، عبارات جستجو، منابع جستجو و معیارهای انتخاب مطالعات اولیه به‌صورت زیر مشخص می‌شوند:

الف) شناسایی عبارات جستجو

با توجه به سؤالات مطرح شده در بخش گذشته، عبارات زیر به‌عنوان عبارات جستجو تعیین شدند:

- System resilience
- Resilience analysis
- Resilience metric
- Resilience assessment
- Resilience definition

¹ Developing a review protocol

- Resilience concept

طبق عبارات بیان شده در قسمت بالا، رشته جستجو^۱ مطابق با شکل ۲-۲ تعیین شد. این رشته با استفاده از عملگرهای بولی^۲ (AND و OR) ایجاد شده است.

("System resilience" AND ("Resilience analysis" OR "Resilience metric" OR "Resilience assessment" OR "Resilience definition" OR "Resilience Concept"))

شکل ۲-۲- رشته جستجو تعیین شده برای اجرای فرآیند جستجو

ب) شناسایی منابع جستجو

در این بخش، تعدادی از پایگاه‌های داده الکترونیکی معتبر به عنوان منابع جستجو در نظر گرفته شدند. این منابع الکترونیکی عبارتند از:

- ScienceDirect^۳
- Springer-Link^۴
- IEEE Xplore Digital Library^۵
- SAGE Journals^۶
- Wiley Online Library^۷
- MDPI^۸

ج) شناسایی معیارهای انتخاب تحقیقات

با استفاده از رشته جستجو تعیین شده، حجم زیادی از تحقیقات در زمینه تاب‌آوری قابل شناسایی هستند. همانطور که گفته شد، تمام تحقیقات شناسایی شده این امکان را ندارند که در فرآیند مرور سابقه علمی نظام‌مند داخل شوند. معیارهای معمول ورود و خروج تحقیقات شناسایی شده از فرآیند

^۱ Search string

^۲ Boolean operators

^۳ <https://www.sciencedirect.com/>

^۴ <https://link.springer.com/>

^۵ <https://ieeexplore.ieee.org/>

^۶ <https://journals.sagepub.com/>

^۷ <https://onlinelibrary.wiley.com/>

^۸ <https://www.mdpi.com/>

مرور عبارتند از (Kitchenham, 2004; Kitchenham et al., 2009; Kitchenham and Charters, 2007; Manikas and Hansen, 2013; Najafabadi and Mahrin, 2016):

- تحقیقات انتخاب شده باید به زبان انگلیسی باشند.
 - تحقیقات انتخاب شده باید به عنوان مقاله تحقیقاتی منتشر شده باشند. از این رو، اسنادی همچون تحقیقات منتشر نشده، مباحثه‌ها، فصول کتاب‌ها، مطالب مربوط به کارگاه‌های آموزشی، مقالات خبری، مقدمه‌ها، آموزش‌ها و سخنرانی‌ها باید از فرآیند مرور کنار گذاشته شوند.
 - تحقیقاتی که به صورت مطالعه مروری منتشر شده‌اند باید از فرآیند مرور کنار گذاشته شوند.
 - تحقیقاتی که بعد از بررسی عنوان، لغات کلیدی و چکیده آن‌ها مشخص شود که با موضوع مورد نظر مرتبط نیستند باید از فرآیند مرور حذف شوند.
 - تحقیقاتی که نتایج یکسانی را ارائه می‌دهند و به صورت تکراری در مجلات و یا کنفرانس‌های مختلف چاپ شده‌اند باید از فرآیند مرور کنار گذاشته شده و کامل‌ترین نسخه از بین آن‌ها در روند مرور گنجانده شود.
- علاوه بر مواردی گفته شده که معیارهای مرسوم روش مرور نظام‌مند هستند، معیار دیگری در راستای سؤالات تحقیق به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:
- تحقیقاتی که از مفهوم تاب‌آوری در حوزه‌های سیستم‌های غیر فنی استفاده کرده‌اند می‌بایست کنار گذاشته شوند.

د) استراتژی استخراج اطلاعات

استخراج اطلاعات و داده‌های مورد نیاز از تحقیقات شناسایی شده باید به نحوی باشند که به سؤالات مطرح شده توسط پژوهشگر پاسخ داده شود (Kitchenham and Charters, 2007). مواردی که در

این مطالعه می‌بایست به‌عنوان اطلاعات استخراج شوند به‌شرح زیر هستند:

- سال چاپ
- زمینه‌ای که مفهوم تاب‌آوری در آن به‌کار گرفته شده
- نوع مطالعه موردی
- تعاریف ارائه شده برای تاب‌آوری سیستم‌های فنی
- ویژگی‌های تأثیرگذار بر روی تاب‌آوری سیستم‌های فنی و تعاریف آن‌ها
- نوع روش استفاده شده برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی

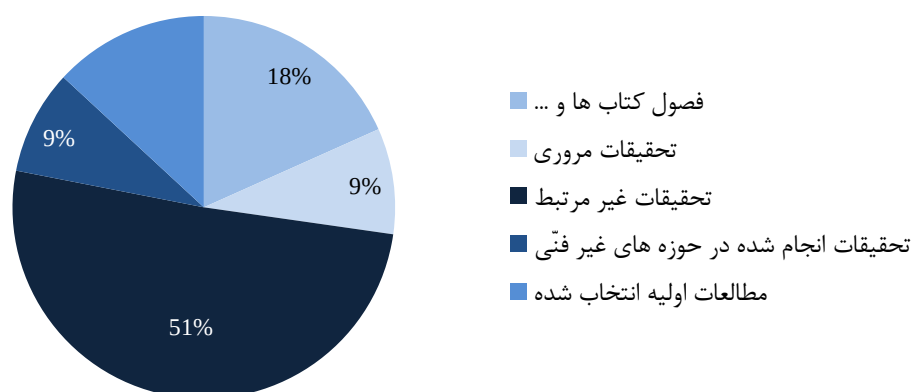
۲-۳-۲- شناسایی و انتخاب تحقیقات اولیه

در این مرحله، طبق جستجوی انجام شده با استفاده از منابع جستجو و رشته جستجو در تاریخ دوم اکتبر ۲۰۲۰، در مجموع، ۱۴۵۴ مورد تحقیق شناسایی شدند. سپس، تحقیقاتی که طبق معیارهای تعیین شده شرایط لازم برای ورود به گروه تحقیقات اولیه را نداشتند، حذف شدند. نتیجه نهایی فرآیند جستجو در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، در مجموع ۱۸۲ تحقیق به‌عنوان تحقیقات اولیه تعیین شده‌اند. لازم به ذکر است که ۱۰ مورد تحقیق جدید بر اساس مراجع موجود در تحقیقات شناسایی شده و نیز نظر پژوهشگر به جمع تحقیقات اولیه افزوده شدند. در نتیجه، مجموعاً ۱۹۲ تحقیق به‌عنوان تحقیقات اولیه نهایی انتخاب شدند. فهرست نهایی تحقیقات شناسایی شده در پیوست شماره ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است، مطالعات اولیه انتخاب شده ۱۳ درصد از کل مطالعات شناسایی شده را تشکیل می‌دهند. در فرآیند جستجو، حدود ۵۱ درصد از تحقیقات شناسایی شده به تاب‌آوری سیستم‌های فنی ارتباطی نداشتند. علاوه بر این، ۹ درصد از تحقیقات شناسایی شده مربوط به حوزه‌های غیر فنی مانند حوزه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی بودند. در چنین حوزه‌هایی، پژوهشگران گاهی از اصطلاح "سیستم" برای نهادهای اجتماعی یا زیست‌محیطی استفاده می‌کنند. در نتیجه، این امر باعث شد تا این نوع تحقیقات

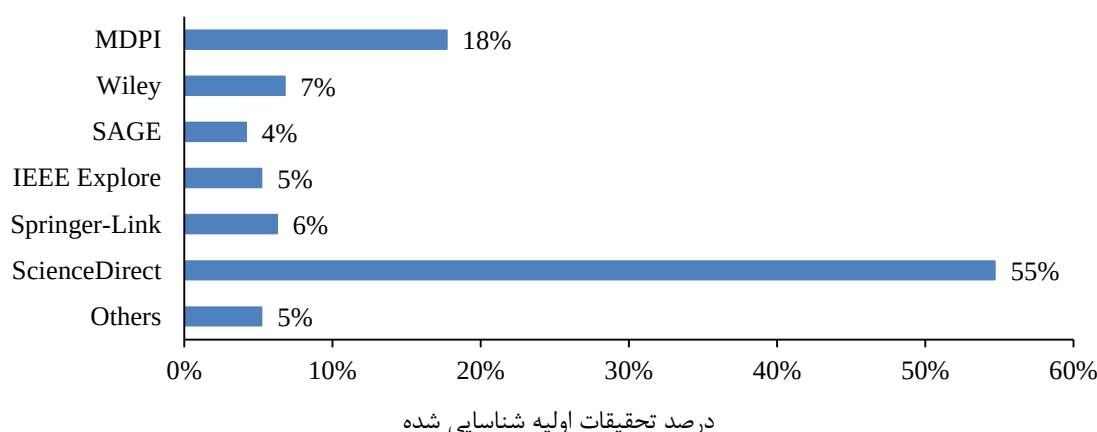
نیز در فرآیند جستجوی اولیه ظاهر شوند. همچنین، تعداد تحقیقات اولیه شناسایی شده به تفکیک منبع جستجو در شکل ۲-۵ ارائه شده است.



شکل ۲-۳- نتایج فرآیند جستجو برای شناسایی تحقیقات



شکل ۲-۴- نسبت تحقیقات حذف شده به تعداد کل تحقیقات یافت شده به تفکیک



شکل ۲-۵- درصد تحقیقات اولیه شناسایی شده در هر منبع جستجو

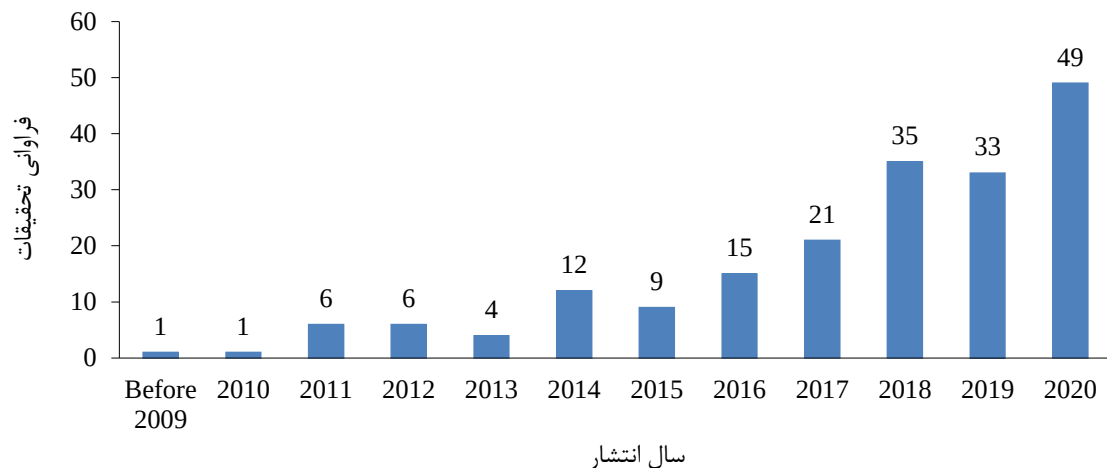
۳-۳-۲- استخراج و تلفیق اطلاعات

در این بخش، تمام تحقیقات اولیه که در مراحل قبل شناسایی شدند مطالعه و بررسی می‌شوند. سپس، براساس اطلاعات یافت شده پاسخ‌های سؤالات تحقیق تعیین می‌شوند.

الف) آیا تاب‌آوری موضوعی نوظهور و برجسته در زمینه سیستم‌های فنی است؟

براساس دسته‌بندی تحقیقات اولیه شناسایی شده، فراوانی تحقیقات منتشر شده در حوزه تاب‌آوری سیستم‌های فنی تا تاریخ ۲ اکتبر ۲۰۲۰ در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. طبق نتایج حاصل شده، سرآغاز ورود مفهوم تاب‌آوری به حوزه سیستم‌های فنی، مربوط به سال ۲۰۰۳ و تحقیقات برونو و

همکارانش در زمینه بررسی سیستم‌های فنی شهرها در مقابل وقوع زمین لرزه می‌شود (Bruneau et al., 2003).



شکل ۲-۶- تفکیک فراوانی تحقیقات شناسایی شده بر اساس سال انتشار تا تاریخ ۲ اکتبر ۲۰۲۰

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود از سال ۲۰۰۳ به بعد، این مفهوم به تدریج جای خود را در میان جامعه مهندسی جهان پیدا کرده و فراوانی تحقیقات صورت گرفته در این حوزه سیری صعودی را در پیش گرفته است. طبق شکل، از سال ۲۰۱۱، نرخ انتشار تحقیقات در این زمینه صعودی است. به‌طور حتم، زلزله توهوکو و سونامی سال ۲۰۱۱ در کشور ژاپن یکی از عوامل اصلی افزایش تحقیقات در این زمینه است. علاوه بر این، افزایش حملات تروریستی یا سایبری (به‌عنوان نمونه، حمله سایبری به شبکه برق کشور اوکراین که ۲۲۵۰۰۰ نفر را در سال ۲۰۱۵ تحت تأثیر قرار داد) نیز منجر به افزایش توجهات به بحث تاب‌آوری سیستم‌های فنی و ضرورت مقابله با تهدیدات فزاینده این‌گونه حملات شده است. چنین مسائلی باعث آغاز پروژه‌های تحقیقاتی بزرگ مقیاس همچون پروژه IMPROVER اروپا در سال ۲۰۱۵ و ایجاد بسیاری از مراکز تحقیقاتی در سراسر جهان مانند مؤسسه تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی ایالات متحده آمریکا^۱ (CIRI) در سال ۲۰۱۶ شده

¹ US Critical Infrastructure Resilience Institute (CIRI)

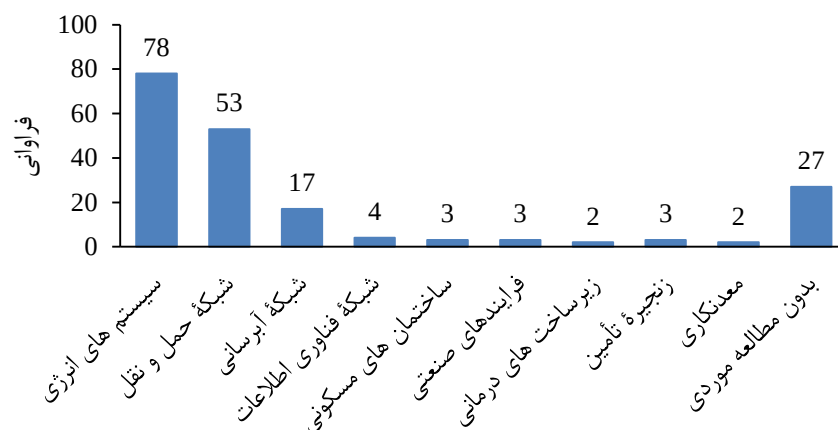
است. چنین فعالیتهایی باعث ایجاد انگیزه در بین پژوهشگران شده و در نهایت منجر به افزایش حجم تحقیقات منتشر شده در مورد تاب‌آوری سیستم‌های فنی از سال ۲۰۱۵ به بعد شده است. همچنین، نقش مهم سیستم‌های فنی همچون شبکه‌های توزیع آب، برق، حمل و نقل، انرژی، سازه‌های عمرانی و ... در رفاه و آسایش جوامع امروزی را می‌توان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دلایل افزایش توجهات به مفهوم تاب‌آوری در حوزه سیستم‌های فنی دانست. در حال حاضر بخش زیادی از تحقیقات انجام شده در حوزه تاب‌آوری سیستم‌های فنی مربوط به چنین زمینه‌هایی می‌شود (Behzadian et al., 2014; Adjetey-Bahun et al., 2016; Cerè et al., 2019; Hossain et al., 2019; Li et al., 2020; Sabouhi et al., 2020).

از آنجا که مفهوم تاب‌آوری در حوزه سیستم‌های فنی موضوعی جدید به حساب می‌آید، ظرفیت تحقیقاتی بسیار زیادی در مورد توسعه مفهوم و روش‌های تحلیل آن وجود دارد. در نتیجه، رفع شکاف‌های تحقیقاتی موجود در مفهوم و روش‌های تحلیل آن برای پژوهشگران این حوزه ایجاد جذابیت می‌کند. به‌طور حتم، در سال‌های آینده روند رو به رشد تحقیقات در این حوزه ادامه خواهد داشت. زیرا راهی برای دوری کامل از وقوع حوادث، اختلالات و خرابی‌ها وجود نداشته و روز به روز به پیچیدگی‌های سیستم‌های فنی افزوده می‌شود. وجود چنین مسائلی چاره‌ای جز روی آوردن به مفهوم تاب‌آوری برای طراحان باقی نمی‌گذارد. در نتیجه، تاب‌آوری موضوعی نوظهور و برجسته در حوزه سیستم‌های فنی به‌شمار می‌آید.

ب) مفهوم تاب‌آوری در چه زمینه‌هایی به‌کار گرفته شده است؟

به‌منظور شناسایی زمینه‌های کاربرد مفهوم تاب‌آوری در حوزه سیستم‌های فنی، مطالعات موردی به‌کار رفته در تمام تحقیقات اولیه شناسایی و دسته‌بندی شدند. نتایج دسته‌بندی در شکل ۲-۷ ارائه

شده است. طبق نتایج بدست آمده، در میان تحقیقات بررسی شده، سیستم‌های انرژی^۱، شبکه حمل و نقل^۲ و شبکه آبرسانی^۳ بیشترین فراوانی را به عنوان مطالعات موردی در بین سایر زمینه‌ها به خود اختصاص داده‌اند. سیستم‌های مذکور نیازهای حیاتی جوامع امروز را فراهم می‌کنند و عملکرد مطلوب آن‌ها از جنبه‌های متعددی همچون امنیت ملی، آسایش، بهداشت و رفاه اجتماعی دارای اهمیت است (Yazdani et al., 2011; Cox et al., 2011; Ouyang and Dueñas-Orsorio, 2014; Zhu et al., 2017; Panteli et al., 2017; Goldbeck et al., 2019). از این رو، مهندسان و طراحان توجه بیشتری نسبت به تحلیل و ارتقای تاب‌آوری این گونه سیستم‌ها داشته‌اند، به‌ویژه در کشورهایی که با بلایای طبیعی و یا حملات تروریستی درگیر هستند.



شکل ۷-۲- فراوانی انواع مطالعات موردی در حوزه تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی

همان‌طور که در شکل ۷-۲ قابل مشاهده است، ۲۷ مورد از تحقیقات بررسی شده نیز یا از مثال‌های فرضی استفاده کرده و یا دارای مطالعه موردی نبودند. همچنین، دو مورد از تحقیقات یافت شده، از مفهوم تاب‌آوری در زمینه معدن‌کاری استفاده کرده‌اند. تحقیقات مذکور از مفهوم تاب‌آوری در زمینه ماشین‌آلات معادن زیرزمینی (Hoseinie et al., 2020) و مدیریت سد باطله در معادن

¹ Energy systems

² Transportation network

³ Water supply network

(Komljenovic et al., 2020) استفاده کرده‌اند. کوملینوویچ و همکارانش از یک رویکرد مبتنی بر تاب‌آوری در تدوین راهبردهای تعطیلی و رهاسازی سدهای باطله معادن ارائه دادند. با توجه به دانش نسبتاً ضعیف و عدم قطعیت‌های عمیق در مورد شرایط طبیعی، تکنولوژیکی و عملیاتی آینده سدهای باطله تعطیل شده، این رویکرد ضمن حفظ پایداری اقتصادی شرکت‌های معدنی که دارای این نوع زیرساخت‌ها هستند، حاشیه ایمنی کافی را نیز فراهم می‌کند. این رویکرد شامل چهار فعالیت و عملکرد متقابل شامل (۱) مدیریت عملیات: بازرسی، نظارت و نگهداری، (۲) مدیریت عمومی، مدیریت ریسک و شرایط اضطراری و آموخته‌ها^۱، (۳) معیارهای طراحی سیستم و تجهیزات: تحقیق و توسعه و نوآوری و (۴) چارچوب قانونی و نظارتی می‌باشد. این فعالیت‌ها و عملکردها تمام مراحل مفهوم تاب‌آوری شامل برنامه ریزی و آماده‌سازی، جذب، بازیابی و سازگاری را پوشش می‌دهند (Komljenovic et al., 2020). همچنین، حسینی و همکارانش مفهوم تاب‌آوری را در بخش معدن، به ویژه در ماشین‌آلات معدنی و سیستم‌های تولید، به کار گرفتند. در این تحقیق، روش تجزیه و تحلیل کمی با استفاده از تابع بازیابی خطی استفاده شده و فرض بر این است که سطح عملکرد ناوگان ماشین‌آلات معدن بلافاصله پس از وقوع خرابی به مقدار "صفر" می‌رسد. بنابراین، در این تحقیق، فرآیند محاسبه تاب‌آوری از طریق مفهوم زمان برای تعمیر و تعمیرپذیری ماشین اجرا شده است (Hoseinie et al., 2020).

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، سیستم‌های انرژی که به‌منظور تأمین انرژی مصرف‌کنندگان خانگی و صنعتی طراحی شده‌اند خود به شبکه‌های برق^۲، گاز^۳ و گرمایش^۴ تقسیم‌بندی می‌شوند. براساس این تقسیم‌بندی، تحقیقات اولیه‌ای که بر روی تاب‌آوری سیستم‌های انرژی متمرکز بودند،

¹ Lessons learned

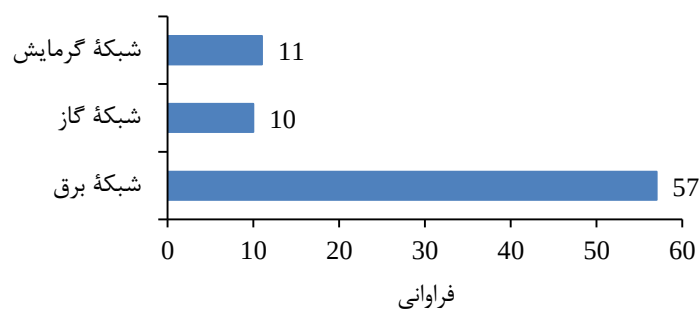
² Electric grid

³ Gas grid

⁴ Heat grid

دسته‌بندی شدند. نتایج دسته‌بندی صورت گرفته در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. با توجه به شکل، شبکه برق که به آن سیستم تأمین برق^۱ نیز گفته می‌شود، به‌عنوان مطالعه موردی در بخش قابل توجی از تحقیقات انجام شده در زمینه سیستم‌های انرژی (۵۷ مورد) استفاده شده است. همچنین، در مجموع ۲۱ مورد از تحقیقات مربوط به شبکه گاز (مانند سیستم انتقال و توزیع گاز طبیعی) و شبکه گرمایش (مانند خطوط انتقال حرارت و نیروگاه‌های تولید حرارت) می‌شوند.

در شکل ۲-۹ فراوانی تحقیقات صورت گرفته در زمینه اجزاء مختلف سیستم تأمین برق (سیستم‌های تولید^۲، انتقال^۳ و توزیع برق^۴) ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، از بین ۵۷ مورد تحقیقی که مطالعه موردی آن‌ها شبکه برق بوده است، ۴۶ درصد بر روی کل سیستم تأمین برق مطالعه کرده‌اند. همچنین ۱۷ درصد از تحقیقات نیز به‌طور خاص بر روی سیستم‌های تولید برق (مانند نیروگاه‌های اتمی، بادی و سوخت فسیلی)، ۲۵ درصد بر روی سیستم انتقال برق و ۱۲ درصد بر روی سیستم توزیع برق مطالعه کرده‌اند.



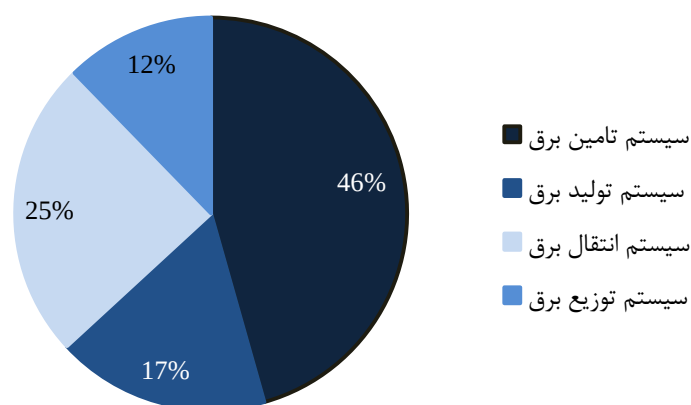
شکل ۲-۸- فراوانی انواع شبکه‌های به کار رفته در زمینه تاب‌آوری سیستم‌های انرژی

¹ Electric power supply system

² Electric power generation system

³ Electric power transmission system

⁴ Electric power distribution system



شکل ۹-۲- فراوانی تحقیقات صورت گرفته در زمینه تاب آوری اجزای مختلف شبکه برق

مشابه با دسته‌بندی صورت گرفته برای شبکه برق، تحقیقات صورت گرفته در زمینه اجزای مختلف شبکه حمل و نقل (شبکه حمل و نقل هوایی^۱، ریلی^۲، جاده‌ای^۳ و دریایی^۴) مطابق با شکل ۱۰-۲ دسته‌بندی شدند. طبق نتایج، از بین ۵۳ مورد تحقیقی که مطالعه موردی آن‌ها شبکه حمل و نقل بوده است، ۲۱ درصد بر روی شبکه حمل و نقل آبی (مانند بنادر و آبراه‌های داخلی^۵)، ۱۵ درصد بر روی شبکه حمل و نقل هوایی (مانند فرودگاه‌ها و سیستم نوابری هواپیماها)، ۱۳ درصد بر روی شبکه حمل و نقل ریلی (مانند مترو، ایستگاه‌های راه‌آهن) و ۲۸ درصد بر روی شبکه حمل و نقل جاده‌ای (مانند شبکه ترافیک و بزرگراه‌ها) مطالعه کرده‌اند. همچنین ۲۳ درصد از تحقیقات به‌طور کلی تاب‌آوری شبکه حمل و نقل را بدون تمرکز بر روی اجزای آن بررسی کرده‌اند. در ارتباط با تحقیقات صورت گرفته در زمینه شبکه آبرسانی نیز ۶ مورد از تحقیقات به بررسی تاب‌آوری سیستم توزیع آب پرداخته و مابقی آن‌ها (۱۱ مورد) بر روی تاب‌آوری کل شبکه تأمین آب (تجهیزات تصفیه، ذخیره، پمپاژ و توزیع آب) مطالعه کرده‌اند.

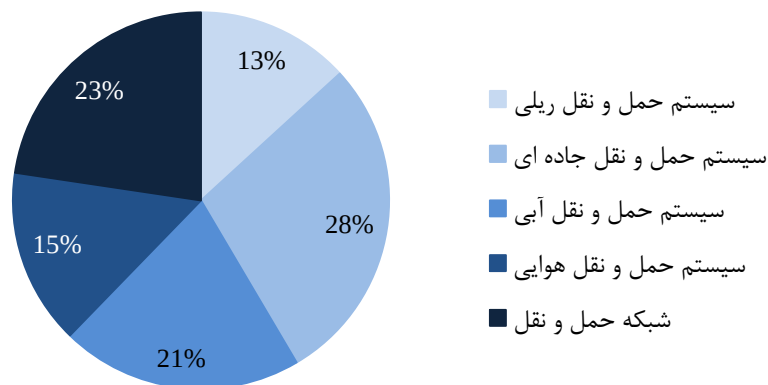
¹ Air transport network

² Rail transport network

³ Road transport network

⁴ Water transport network

⁵ Inland waterways



شکل ۲-۱۰- فراوانی تحقیقات صورت گرفته در زمینه تاب آوری اجزای مختلف شبکه حمل و نقل

همان‌طور که بحث شد، طی سال‌های گذشته، تاب‌آوری سیستم‌های انرژی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. زیرا این سیستم‌ها نیازهای حیاتی جوامع امروزی را تأمین می‌کنند و عملکرد صحیح آن‌ها از بسیاری جهات ضروری است. بیشتر سیستم‌های انرژی شبکه محور^۱ هستند و اختلال در آن‌ها می‌تواند منجر به خرابی آبشاری^۲ در سایر سیستم‌ها شود. به‌عنوان نمونه، اختلال در سیستم تأمین برق نه تنها باعث قطع جریان برق می‌شود، بلکه ممکن است سیستم‌های تأمین آب و ارتباطات را نیز تحت تأثیر قرار دهد (Papic et al., 2020). به‌عنوان یک مثال حقیقی، در سال ۲۰۱۱، زمین لرزه و سونامی در کشور ژاپن به بسیاری از سیستم‌های انرژی آسیب رساند و ۴/۴ میلیون خانوار بدون برق و ۱/۵ میلیون مصرف‌کننده از آب آشامیدنی سالم بی‌بهره شدند. علاوه بر این، حدود ۱۰ روز پس از این رویداد، کماکان ۲/۴۳ میلیون خانوار فاقد برق و ۱/۰۴ میلیون مصرف‌کننده بدون آب بودند (Xu et al., 2019). از دیگر دلایل توجه بیشتر به سیستم‌های انرژی، تلاش برای کاهش تولید گاز CO₂ و بحث توسعه پایدار است که اخیراً اهمیت تاب‌آوری انتقال سیستم‌های انرژی از سیستم‌های

¹ Network-oriented

² Cascading failure

سنتی (مانند نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت فسیلی) به سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدید پذیر (مانند توربین‌های بادی) را افزایش داده است.

ج) تاب‌آوری در زمینه سیستم‌های فنی به چه صورت تعریف می‌شود؟

بر اساس تحقیقات اولیه شناسایی شده، طیف گسترده‌ای از تعاریف تاب‌آوری برای سیستم‌های فنی وجود دارد. در ادامه، تعاریف ارائه شده برای تاب‌آوری سیستم‌های فنی بیان شده است.

طبق بررسی‌های صورت گرفته، برونو و همکاران تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سیستم در کاهش احتمال اختلال، جذب تأثیرات اختلال در صورت وقوع آن و بازیابی سریع وضعیت عادی سیستم پس از وقوع اختلال تعریف کردند (Bruneau et al., 2003). لیو و همکاران تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سیستم برای آماده‌سازی، پاسخ سریع و کاهش تلفات ناشی از اختلال تعریف کردند (Liu et al., 2013). شفیع زاده و باردن (Shafieezadeh and Ivey Burden, 2014)، بارکر و همکاران (Barker et al., 2013) و کنگ و سیمونوویچ (Kong and Simonovic, 2019) تاب‌آوری را به‌صورت نسبت میزان عملکرد سیستم پس از ایجاد اختلال به میزان عملکرد طبیعی سیستم (قبل از وقوع اختلال) تعریف کردند. تئودورسکا تاب‌آوری را توانایی سیستم در بازیابی سطح عملکرد خود تعریف کرد. از نظر او تاب‌آوری تابعی از زمان صرف شده برای بازیابی سیستم و میزان عملکرد سیستم پس از بازیابی است (Teodorescu, 2015). طبق عقیده نان و همکاران تاب‌آوری به توانایی سیستم برای مقاومت در برابر رویدادی مختل کننده با کاهش تأثیرات منفی اولیه، انطباق با شرایط جدید و بازیابی وضعیت عادی گفته می‌شود (Nan et al., 2016). جین و گو تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سیستم در مقاومت در برابر حوادث بالقوه تعریف کردند که این موضوع با توانایی سیستم در کاهش یا جذب تأثیرات ناشی از اختلال و بازیابی سریع شرایط عادی سیستم مشخص می‌شود (Jin and Gu, 2016). بر اساس نظر حسینی و بارکر تاب‌آوری به توانایی سیستم برای تنظیم عملکرد خود در صورت ایجاد اغتشاشات، تهدیدهای خارجی و تغییرات غیرقابل پیش‌بینی و مقاومت در برابر این‌گونه حوادث بدون این‌که اجازه

دهند اجرای عملکردهای سیستم متوقف شود، گفته می‌شود (Hosseini and Barker, 2016). نان و سانساوینی تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سیستم به‌منظور مقاومت در برابر اثرات نیرویی مختل‌کننده و کاهش انحراف‌های ایجاد شده در عملکرد آن تعریف کردند (Nan and Sansavini, 2017). ژائو و همکاران تاب‌آوری را به‌صورت توانایی سیستم در بازیابی عملکرد خود تا سطحی مطلوب و نیز در زمانی معقول بعد از وقوع اختلال تعریف کردند (Zhao et al., 2017). یوون و همکاران تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سیستم در حفظ عملکرد مورد نیاز خود به‌وسیله مقاومت و بازیابی از رویدادی مخرب تعریف کردند (Yoon et al., 2017). فایر و همکاران تاب‌آوری را به‌صورت خصوصیات کلی سیستم‌ها شامل توانایی آن‌ها در حفظ حالت اصلی و سطح خدمات خود و نیز بسیج منابع برای سازگاری با شرایط جدید و تحمل اختلالات در طول زمان تعریف کردند (Faber et al., 2017). مصطفوی تاب‌آوری سیستم را به‌صورت توانایی آن در حفظ عملکردهای مورد نیاز خود، قبل، حین و بعد از وقوع یک اختلال تعریف کرد (Mostafavi, 2017). رهاک و همکاران تاب‌آوری را به‌صورت کیفیتی که آسیب‌پذیری را کاهش می‌دهد، عواقب اختلالات را به حداقل می‌رساند، پاسخ و بازیابی را تسریع می‌کند و سازگاری با یک رویداد مخرب را تسهیل می‌کند، تعریف کردند (Rehak et al., 2018). لو تاب‌آوری را به‌صورت توانایی سیستم در بازیابی سریع وضعیت خود از بدترین عملکردی که تحت اختلال داشته است به عملکرد عادی آن قبل از وقوع اختلال تعریف کرده است (Lu, 2018). علاوه بر این، ژانگ و همکاران، سیستم تاب‌آور را سیستمی تعریف کردند که قادر است اختلالات احتمالی را پیش‌بینی کند، اقدامات مؤثری را برای کاهش تلفات اجزای سیستم در حین اختلال انجام دهد و به سرعت عملکرد خود را بازیابی کند (Zhang et al., 2018b). وانگ و همکاران تاب‌آوری را توانایی سیستم برای مقاومت در برابر انواع خطرات، مقاومت در برابر عواقب آن‌ها و بازگشت سریع به حالت عادی عنوان کردند (Wang et al., 2019a). کاتینی و پزشکی تاب‌آوری را به‌عنوان ظرفیت سیستم برای حفظ خدمات خود با توزیع مجدد خدمات پس از وقوع یک اختلال تعریف کردند (Cutini and Pezzica, 2020). به گفته کارنگلوس و همکاران، تاب‌آوری به توانایی سیستم در مقاومت در برابر

طیف وسیع‌تری از شرایط غیر معمول و بازیابی فوری گفته می‌شود (Karangelos et al., 2020). برخی از تحقیقات نیز تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی مشترک سیستم در جلوگیری و مقاومت در برابر هر گونه خطر احتمالی، جذب آسیب اولیه و بازگشت به حالت عادی تعریف کردند (Ouyang et al., 2012; Ouyang and Dueñas-Orsorio, 2014; Ouyang and Fang, 2017; Ouyang and Wang, 2015). آکادمی ملی علوم ایالات متحده آمریکا^۱ (NAS) نیز تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سیستم برای آماده‌سازی و برنامه‌ریزی، جذب، بازیابی و سازگاری موفقیت آمیز با حوادث مخرب تعریف کرده است (Klise et al., 2017; Galbusera et al., 2018; Haque et al., 2018).

طبق بخش‌نامه سیاست ریاست جمهوری ایالات متحده آمریکا^۲ (PPD) تاب‌آوری به توانایی سیستم برای آماده‌سازی و انطباق با شرایط متغیر و نیز مقاومت و بازیابی سریع از حوادث مخرب گفته می‌شود (Ayyub, 2014; Li et al., 2018). انجمن مهندسين مکانیک آمریکا^۳ (ASME) نیز تاب‌آوری تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سیستم در تحمل اختلالات خارجی و داخلی بدون هیچ‌گونه ایجاد وفقه در انجام عملکرد آن و یا در صورت قطع عملکرد، بازیابی سریع و کامل آن تعریف می‌کند (Cai et al., 2018). دفتر کاهش ریسک بلایای سازمان ملل متحد^۴ (UNISDR) تاب‌آوری را به‌صورت توانایی سیستم، جامعه یا اجتماع در معرض مخاطره برای مقاومت، جذب، انطباق، سازگاری، تبدیل و بازیابی به موقع از اثرات مخاطره همراه با حفظ و بازیابی ساختارها و عملکردهای اساسی تعریف کرده است (Rød et al., 2016; Aydin et al., 2018b; Yang et al., 2019). شورای مشاورتی زیرساخت ملی ایالات متحده^۵ (NIAC) تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی سیستم در پیش‌بینی، جذب، انطباق و بازیابی سریع عملکرد پس از وقوع اختلال تعریف کرده است (Francis and Bekera, 2014; Rød et al., 2016).

¹ US National Academies of Science (NAS)

² US Presidential Policy Directive (PPD)

³ American Society of Mechanical Engineer (ASME)

⁴ United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR)

⁵ National Infrastructure Advisory Council (NIAC)

(2016; Liu et al., 2018). پروژه اروپایی IMPROVER نیز تاب‌آوری را به صورت توانایی زیرساخت حیاتی برای مقاومت، جذب، انطباق و بازیابی به موقع و کارآمد از اثرات مخاطره به منظور حفظ و مرمت خدمات ضروری تعریف کرده است (Petersen et al., 2020). کارگروه تاب‌آوری سیستم‌های برق¹ CIGRE C4.47، تاب‌آوری را به عنوان توانایی محدود کردن میزان، شدت و مدت زمان تنزل سیستم پس از وقوع اختلال تعریف می‌کند (Papic et al., 2020). همچنین، مرکز تحقیقات انرژی انگلستان² نیز تاب‌آوری را به صورت ظرفیت سیستم برای تحمل اختلال و ادامه ارائه خدمات به مصرف کنندگان تعریف می‌کند (Brugnetti et al., 2020).

تعدد تعاریف ارائه شده در حوزه تاب‌آوری سیستم‌های فنی حاکی از آن است که هنوز اجماعی در مورد چگونگی تعریف تاب‌آوری در میان محققان به وجود نیامده است. نکات برجسته تعاریف فوق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- تمام تعاریف بر روی توانایی سیستم در بازیابی عملکرد خود پس از وقوع اختلال تأکید دارند.
- نقش بازیابی به موقع³ یا سریع در برخی از تعاریف مانند تعاریف ارائه شده توسط لو (Lu, 2018)، جین و گو (Jin and Gu, 2016)، ژائو و همکاران (Zhao et al., 2017) و کارنگلوس و همکاران (Karangelos et al., 2020) در نظر گرفته شده است. بر اساس این تعاریف، سیستم‌هایی که قادر باشند در زمانی معقول‌تر و یا سریع‌تر عملکرد خود را پس از رویداد مخرب بازیابی کنند، تاب‌آوری بیشتری دارند.
- در تعاریف ارائه شده توسط تئودورسکا (Teodorescu, 2015)، لو (Lu, 2018) و ژائو و همکاران (Zhao et al., 2017) تنها به قابلیت بازیابی سیستم توجه شده است. حال آن که قابلیت بازیابی مناسب به تنهایی قادر به تضمین تاب‌آور بودن سیستم نخواهد بود.

¹ CIGRE C4.47 Power System Resilience Working Group

² UK Energy Research Center

³ Timely recovery

- در تعریف ارائه شده توسط نان و سانساوینی (Nan and Sansavini, 2017) تنها به توانایی مقاومت سیستم توجه شده است. در صورتی که برای داشتن سیستمی تاب‌آور تنها مقاوم بودن کافی نیست.
- براساس تعاریف ASME (Cai et al., 2018) و لو (Lu, 2018) توانایی بازیابی و بازگرداندن سیستم به حالت اصلی (عملکردی که سیستم قبل از ایجاد اختلال داشته است) برای تاب‌آور بودن سیستم ضروری است، در حالی که سایر تعاریف فقط بر روی بازگشت سیستم به شرایط عادی تأکید دارند.
- در برخی از تعاریف مانند تعاریف ارائه شده توسط NIAC، IMPROVER، برونو و همکاران (Bruneau et al., 2003)، نان و همکاران (Nan et al., 2016) و جین و گو (Jin and Gu, 2016) به قابلیت سیستم برای انطباق با شرایط جدید و جذب تأثیرات ناشی از اختلال توجه شده است.
- طبق تعاریف ارائه شده توسط یوون و همکاران (Yoon et al., 2017)، مصطفوی (Mostafavi, 2017)، فابر و همکاران (Faber et al., 2017)، UNISDR و IMPROVER، سیستم تاب‌آور پس از یک رویداد مخرب، عملکرد مورد نیاز خود را حفظ می‌کند. این بدان معنی است که بعد از ایجاد اختلال، سطح عملکرد سیستم نباید کمتر از یک مقدار مشخص باشد و سیستم باید ارزش اصلی خود را حفظ کند.
- طبق تعاریف ارائه شده توسط حسینی و بارکر (Hosseini and Barker, 2016) و ASME یک سیستم تاب‌آور پس از وقوع اختلال نباید اجازه دهد تا عملکرد آن متوقف شود.
- توانایی سیستم در پیش‌بینی وقوع اختلال فقط در تعاریف ارائه شده توسط برونو و همکاران (Bruneau et al., 2003)، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2018b) و NIAC به صراحت مورد توجه قرار گرفته است.

- هیچ یک از تعاریف ارائه شده تأثیر مثبت توانایی یادگیری سیستم بر روی تاب‌آوری آن را در نظر نمی‌گیرند. زیرا آموخته‌ها و تجربیات قبلی در برخورد با حوادثی که در آینده روی خواهند داد، بسیار مفید هستند.

براساس تعاریف بررسی شده، سیستم‌های فنی تاب‌آور دارای پنج توانایی زیر هستند:

- (۱) توانایی پیش‌بینی آنچه روی خواهد داد را داشته باشد.
- (۲) توانایی حفاظت و مقاومت در برابر رویداد مخاطره آمیز را داشته باشد.
- (۳) توانایی جذب اثرات ناشی از رویداد مخاطره آمیز را داشته باشد.
- (۴) توانایی انطباق با شرایط جدید و تغییرات پیش آمده را داشته باشد.
- (۵) توانایی بازیابی عملکرد سیستم پس از وقوع رویداد مخاطره آمیز را داشته باشد (عملکرد بازیابی شده ممکن است معادل سطح عملکرد اولیه، پایین‌تر از آن و یا حتی بهتر از آن باشد. این موضوع به عواملی همچون کیفیت تصمیمات اتخاذ شده توسط مدیریت، کیفیت تعمیرات و ... وابسته است).

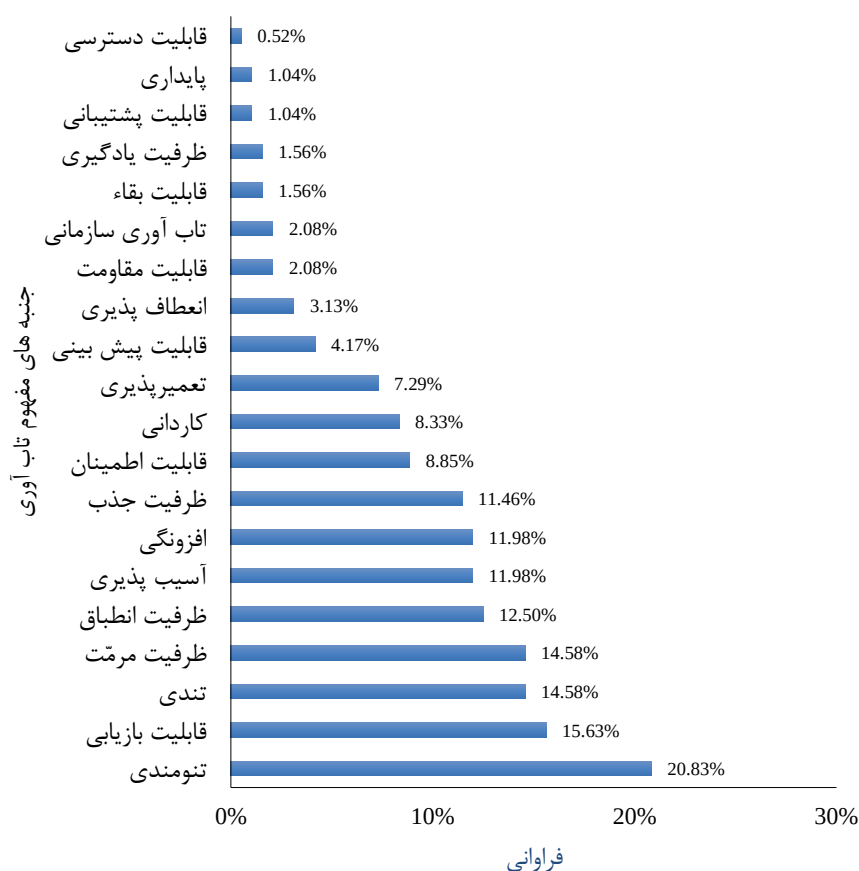
برای دستیابی به توانایی‌های فوق، اجرای دو نوع فعالیت برای سیستم‌های تاب‌آور ضروری است که شامل فعالیت‌های قبل از وقوع اختلال^۱ (آماده‌سازی) و فعالیت‌های بعد از وقوع اختلال^۲ (بازیابی) می‌شوند (Faturechi et al., 2014; Rød et al., 2016; Fotouhi et al., 2017; Barabadi and Ayele, 2018a; Najarian and Lim, 2019; Goldbeck et al., 2019; Yang et al., 2020). آماده‌سازی باید به‌نحوی باشد تا سیستم توانایی حفظ ارزش اصلی خود پس از وقوع اختلال را داشته باشد. طبق نظر فتورچی و همکاران هزینه‌های اقدامات آمادگی از آن دست هزینه‌هایی هستند که مدیریت سیستم می‌بایست متحمل شود؛ چه حادثه روی دهد و چه ندهد (Faturechi et al., 2014).

¹ Pre-disruption activities

² Post-disruption activities

د) چه ویژگی‌هایی تاب‌آوری سیستم‌های فنی را تعریف یا تعیین می‌کنند؟

طبق بررسی‌هایی که بر روی تحقیقات اولیه انجام شد، ۲۰ مورد از ویژگی‌هایی که تاب‌آوری سیستم‌های فنی را تعریف می‌کنند، شناسایی شدند. فراوانی کاربرد موارد شناسایی شده در تحقیقات اولیه در شکل ۲-۱۱ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنومندی^۱ بیشترین کاربرد را در بین سایرین داشته است. تعاریف ویژگی‌های شناسایی شده به شرح زیر هستند:



شکل ۲-۱۱- درصد کاربرد انواع ویژگی‌های تعریف کننده تاب‌آوری سیستم در تحقیقات اولیه

تنومندی: تنومندی به توانایی سیستم برای تحمل و مقاومت در برابر سطح معینی از اختلال و جذب تأثیرات اولیه آن بدون کاهش قابل توجه عملکرد گفته می‌شود. سیستمی با تنومندی بالا، در طول

¹ Robustness

زمان و در صورت بروز حوادث، عملکرد عمده خود را حفظ می‌کند (Bruneau et al., 2003; Cimellaro et al., 2010a; Faturechi et al., 2014; D’Lima and Medda, 2015; Abimbola and Khan, 2019). تنومندی با استفاده از میزان عملکرد باقی‌مانده سیستم پس از وقوع اختلال اندازه‌گیری می‌شود (Ayyub, 2014). همچنین، مفاهیمی مانند قابلیت بقاء^۱، قابلیت مقاومت^۲ و پایداری^۳ معنایی مشابه با تنومندی دارند (Baroud et al., 2014b; Najarian and Lim, 2019; Chen et al., 2020a).

قابلیت بازیابی: به توانایی سیستم برای بازیابی به موقع ظرفیت و عملکرد خود تحت شرایط خاص و با استفاده از منابع موجود قابلیت بازیابی گفته می‌شود (Baroud et al., 2014b; Rød et al., 2016). در برخی تحقیقات مانند بارکر و همکاران قابلیت بازیابی به صورت توانایی سیستم در بازیابی سریع عملکرد خود تعریف شده و به اهمیت منابع مورد نیاز برای انجام عملیات بازیابی توجهی نشده است (Barker et al., 2013).

تندی^۴: به نرخ که سیستم قادر به بازیابی سطح قابل قبولی از عملکرد خود است، تندی گفته می‌شود (Ayyub, 2014; Zobel and Khansa, 2014; Baroud and Barker, 2018). تندی نشان دهنده شیب منحنی عملکرد سیستم در مرحله بازیابی است و اغلب به آن نرخ بازیابی^۵ نیز گفته می‌شود (Cimellaro et al., 2010a; Meng et al., 2018; Kammouh et al., 2020).

ظرفیت مرمت^۶: ظرفیت مرمت میزانی است که سیستم قادر است عملکرد آسیب دیده را به طور مؤثر ترمیم کند (Hosseini and Barker, 2016; Hossain et al., 2019a; Zinetullina et al., 2020). ظرفیت مرمت راه حل‌های دائمی برای آسیب ناشی از اختلال ارائه می‌دهد و در نتیجه هزینه بیشتری

¹ Survivability

² Resistant ability

³ Stability

⁴ Rapidity

⁵ Recovery rate

⁶ Restorative capacity

نسبت به ظرفیت انطباق دارد (Sarwar et al., 2018). معمولاً تندی برای کمی سازی ظرفیت مرمت سیستم استفاده می شود (MacKenzie and Hu, 2018).

ظرفیت جذب^۱: ظرفیت جذب میزانی است که سیستم می تواند به طور خودکار تأثیر منفی ناشی از اختلال را جذب کند. این ظرفیت به عنوان ویژگی ذاتی سیستم برای به حداقل رساندن تأثیرات منفی اختلال در نظر گرفته می شود. ظرفیت جذب شامل مجموعه ای از پیش اقدامات (به عنوان مثال از طریق طراحی ایمن تر) برای مواجهه با تأثیرات رویداد مخرب می شود که می بایست قبل از وقوع اختلال به فکر آن ها بود (Sarwar et al., 2018; Hossain et al., 2019b; Yarveisy et al., 2020; Zinetullina et al., 2020). تنومندی به طور معمول برای کمی سازی ظرفیت جذب سیستم استفاده می شود (Nan et al., 2016).

ظرفیت انطباق^۲: ظرفیت انطباق میزانی است که سیستم قادر است خود به خود سازمان یابد و با استفاده از راه حل های موقتی و اغلب غیراستاندارد از هرگونه توقف عملکرد سیستم در حین وقوع اختلال و حوادث پیش آمده جلوگیری کند. ظرفیت انطباق از سقوط ناگهانی عملکرد سیستم جلوگیری می کند (Hosseini and Barker, 2016; Zhu et al., 2017; Sarwar et al., 2018; Abimbola and Khan, 2019; Hossain et al., 2019b). البته همان طور که گفت شد، این اقدامات ماهیتی موقتی دارند و در اسرع وقت می بایست اقدامات جدی تری انجام شوند. زیرا در صورت تأخیر، هزینه تعمیرات دائمی بسیار بیشتر می شوند.

آسیب پذیری^۳: به میزان حساسیت سیستم در برابر اختلال آسیب پذیری گفته می شود (Zhu et al., 2017). آسیب پذیری ویژگی ذاتی سیستم است؛ حتی قبل از بروز هر گونه اختلال. توجه به

¹ Absorptive capacity

² Adaptive capacity

³ Vulnerability

آسیب‌پذیری باعث شناسایی اجزائی از سیستم می‌شود که در صورت خراب شدن بیشترین خسارات را به بار می‌آورند (Barker et al., 2013; Baroud et al., 2014b, 2014a; Hu and Mahadevan, 2016; Zhu et al., 2017; Sarwar et al., 2018). به‌عنوان مثال، در شبکه حمل و نقل جاده‌ای، تقاطع‌هایی که در صورت وقوع تصادف بیشترین ترافیک و هرج و مرج را به بار می‌آورند به‌عنوان نقاط آسیب‌پذیر شبکه در نظر گرفته می‌شود. در صورت وقوع اختلال، سیستم‌هایی که آسیب‌پذیرتر هستند، شکست شدیدتری را تجربه خواهند کرد (Hu and Mahadevan, 2016).

افزونگی^۱: به میزان وجود عناصر، سیستم‌ها و سایر واحدهای که قابل تعویض بوده و قادر به برآورده کردن نیازهای عملکردی در صورت اختلال سیستم هستند، گفته می‌شود (Bruneau et al., 2003; Labaka et al., 2015; Adjete-Bahun et al., 2016; Zhu et al., 2017). طبق نظر کنگ و سیمونوویچ، افزونگی باعث ایجاد عملکردها و طرح‌هایی جایگزین برای کارکرد سیستم می‌شود و هدف آن رسیدن سیستم به تنومندی است (Kong and Simonovic, 2019). در نتیجه، باعث ارتقای ظرفیت جذب نیز می‌شود (Cimellaro et al., 2010a; Nan and Sansavini, 2017; Amiroun et al., 2019).

قابلیت اطمینان^۲: به توانایی سیستم در اجرای عملکرد مورد نیاز تحت شرایط مشخص و در بازه‌ی زمانی معین بدون از دست دادن عملکرد، قابلیت اطمینان گفته می‌شود (Baroud et al., 2014a; Yoon et al., 2017; Baroud and Barker, 2018). به‌طور کلی، هنگامی که سیستم در وضعیت عادی قرار دارد (قبل از وقوع اختلال)، قابلیت اطمینان عملکرد پایه آن را فراهم می‌کند (Baroud et al., 2014a). در صورت وقوع اختلال در سیستم، هدف ظرفیت‌های جذب، انطباق و مرمت جبران کاهش

¹ Redundancy

² Reliability

ایجاد شده در قابلیت اطمینان سیستم خواهد بود (Youn et al., 2011; Hosseini and Barker, 2016; Yoon et al., 2017; Sarwar et al., 2018; Hossain et al., 2019b).

کاردانی^۱: به استعداد و خرد به کارگیری و بسیج منابع مورد نیاز (پول، اطلاعات، فناوری، نیروی کار، قطعات و...) به منظور تشخیص و حل مشکلات به صورت اولویت بندی شده کاردانی گفته می شود (Bruneau et al., 2003; Cimellaro et al., 2010a; Ayyub, 2014; Zhu et al., 2017; Amirioun et al., 2019). هدف از این ویژگی دست یافتن سیستم به تندی است. در نتیجه، باعث ارتقای ظرفیت مرمت سیستم نیز می شود (Amirioun et al., 2019).

تعمیرپذیری^۲: در حوزه تاب آوری، عبارت تعمیرپذیری به توانایی بازیابی ساده و آسان عملکرد عادی سیستم در مدت زمانی خاص گفته می شود (Rød et al., 2016; Sarwar et al., 2018). در بیشتر تحقیقات از سرعت و یا زمان بازیابی برای کمی سازی تعمیرپذیری سیستم استفاده کرده اند (Teodorescu, 2015; Diao et al., 2016; Jin and Gu, 2016; Malandri et al., 2017; Kim et al., 2017; Ma et al., 2019; Izadi et al., 2020; Hoseini et al., 2020). در نتیجه، هر چه این زمان کوتاه تر باشد سیستم با سهولت بیشتری بازیابی شده و به تبع تعمیرپذیری آن نیز بیشتر است. هدف ظرفیت های جذب، انطباق و مرمت نیز افزایش سهولت بازیابی سیستم است. در واقع، هرچه ظرفیت های مذکور بیشتر باشند، خسارات وارد شده کمتر و تعمیرات ساده تر خواهند بود (Youn et al., 2011; Hosseini and Barker, 2016; Yoon et al., 2017; Sarwar et al., 2018; Hossain et al., 2019b).

¹ Resourcefulness

² Maintainability

قابلیت پیش‌بینی^۱: این قابلیت به کشف زود هنگام نقص^۲ در سیستم اشاره می‌کند و به‌طور مستقیم بر روی بازیابی سیستم تأثیر می‌گذارد (Rød et al., 2016; Jain et al., 2018). کشف نقص و انحراف در سیستم بخشی از روند بازیابی است (Dinh et al., 2012). در حال حاضر، سیستم پیش‌آگهی و مدیریت سلامت^۳ (PHM) به‌عنوان یکی از ابزارهای مفید در زمینه کشف زود هنگام نقص‌ها و انحرافات ایجاد شده در سیستم شناخته می‌شود. سیستم PHM وضعیت فعلی سیستم را ارزیابی می‌کند، نقص‌های احتمالی را پیش‌بینی می‌کند و به مدیریت صحیح سیستم‌های فنی در طول چرخه زندگی آن‌ها کمک می‌کند (Youn et al., 2011; Rød et al., 2016; Yoon et al., 2017).

انعطاف‌پذیری^۴: به توانایی سیستم در پاسخگویی به اختلال به کمک ظرفیت انطباق و بدون نیاز به پیش‌بینی پاسخ خاصی از قبل انعطاف‌پذیری گفته می‌شود (Cox et al., 2011; Dinh et al., 2012; Faturechi et al., 2014).

قابلیت پشتیبانی^۵: قابلیت پشتیبانی نتیجه رویه‌ها و فرآیندهای پشتیبانی^۶ می‌باشد و درجه‌ای است که سیستم برای تعمیر سریع، ارزان و بدون خطا آماده می‌شود. در نتیجه، رویه‌ها و فرآیندهای پشتیبانی مؤثر منجر به قابلیت پشتیبانی مناسب خواهند شد. در مقابل، رویه‌ها و فرآیندهای پشتیبانی نامنظم، ناکافی و یا برنامه‌ریزی نشده به این معناست که قابلیت پشتیبانی مناسب نخواهد بود. پشتیبانی مناسب از سیستم منجر به افزایش قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری آن می‌شود (Tortorella, 2015).

تاب‌آوری سازمانی^۷: تاب‌آوری سازمان مالک سیستم نقش بزرگی در تاب‌آوری آن ایفا می‌کند.

¹ Predictability

² Early fault detection

³ Prognostic and Health Management (PHM) System

⁴ Flexibility

⁵ Supportability

⁶ Support procedures and process

⁷ Organizational resilience

دستیابی به تاب‌آوری بدون وجود سازمانی که بتواند از پس بحران‌های پیش آمده برآید و پاسخ‌هایی درخور برای مسائل ارائه کند، امکان‌پذیر نیست (Omer et al., 2014). به عبارت دیگر، علاوه بر جنبه فنی تاب‌آوری^۱ باید به جنبه سازمانی آن نیز توجه داشت. تاب‌آوری سازمانی شامل کلیه بازیگرانی می‌شود که در مدیریت سیستم دخالت دارند؛ مانند مدیران، پرسنل و اپراتورها. هدف نهایی تاب‌آوری سازمانی، بهبود عملکرد سازمان در زمان مواجهه با شرایط غیر عادی و ایجاد ذهنیت حل مسأله در سطح سازمان است (Rød, 2020). زیرا این مدیران، پرسنل و اپراتورها هستند که مسئولیت اداره سیستم را بر عهده داشته و در صورت وقوع هر نوع اختلال می‌بایست تصمیم‌گیری کرده و با استفاده از منابع موجود تصمیمات را اجرایی کنند. در نتیجه، در صورتی که تاب‌آوری سازمانی در سطح مطلوبی قرار نداشته باشد منجر به کاهش قابلیت بازیابی خواهد شد (Rød et al., 2016).

قابلیت دسترسی^۲: به‌طور کلی، قابلیت دسترسی سیستم به‌صورت نسبت زمان کارکرد سیستم به مجموع زمان کارکرد و زمان خواب سیستم تعریف می‌شود. بنابراین، قابلیت دسترسی نسبت زمان قابل استفاده بودن سیستم را توصیف می‌کند (Barker et al., 2013).

ظرفیت یادگیری^۳: ایجاد چنین ظرفیتی در سیستم نیازمند نظامی رسمی و نهادینه برای انتقال دانش حاصل از تجربیات است. درس گرفتن از تجربیات و اتفاقات گذشته منجر به جلوگیری از وقوع حوادث مشابه در آینده می‌شوند (Sarwar et al., 2018; Wang et al., 2019c).

د) چه روش‌هایی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی ارائه شده است؟

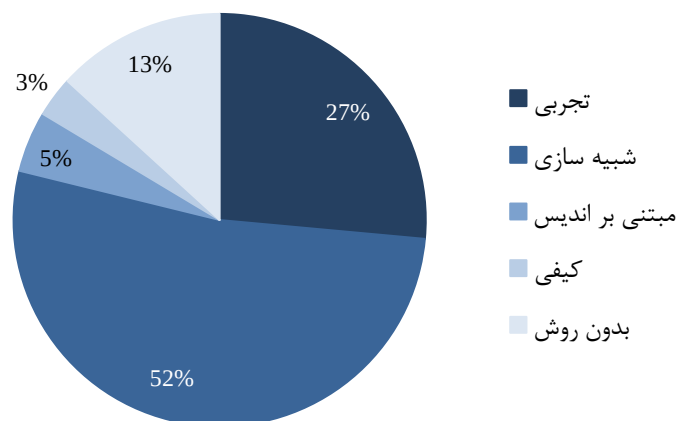
علی‌رغم سال‌ها بحث و تبادل نظر در مورد نحوه تحلیل تاب‌آوری سیستم‌ها، کماکان پژوهشگران این حوزه بر روی روش خاصی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌ها اتفاق نظر ندارند. تا به این لحظه،

¹ Technical resilience

² Availability

³ Learning capacity

روش‌های متنوعی برای تحلیل تاب‌آوری ارائه شده است که هر کدام برداشت خاص خود را از مفهوم تاب‌آوری ارائه کرده‌اند. با این حال، براساس بررسی‌های صورت گرفته، روش‌های تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی را می‌توان در چهار گروه اصلی شامل روش‌های تجربی^۱، کیفی^۲، مبتنی بر اندیس^۳ و شبیه‌سازی^۴ تقسیم‌بندی کرد (Hosseini et al., 2016; Rød, 2020). براساس تقسیم‌بندی ارائه شده، تحقیقاتی که روشی برای تحلیل تاب‌آوری ارائه داده بودند، دسته‌بندی شدند. نتایج در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش‌های شبیه‌سازی بیشترین کاربرد (۵۲ درصد) را در بین تحقیقات شناسایی شده داشته‌اند. همچنین ۲۵ مورد از تحقیقات بررسی شده، از روشی خاص برای تحلیل تاب‌آوری استفاده نکرده بودند.



شکل ۱۲-۲- فراوانی کاربرد روش‌های تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های مهندسی در تحقیقات شناسایی شده

در روش‌های تجربی، معمولاً بوسیله تحلیل اطلاعات تاریخچه سیستم (مانند داده‌های زمانی خرابی و تعمیرات سیستم) منحنی‌های خرابی و بازیابی سیستم مشخص شده و به کمک آن‌ها تاب‌آوری

¹ Empirical

² Qualitative

³ Index-based

⁴ Simulation

سیستم بررسی می‌شود (Rød, 2020). حسینی و همکاران روش‌های تجربی را به دو نوع قطعی^۱ و احتمالاتی^۲ تقسیم‌بندی کرده‌اند (Hosseini et al., 2016). در روش‌های تجربی قطعی، هیچ پارامتر احتمالاتی در محاسبات دخالت داده نمی‌شود (Bruneau et al., 2003; Francis and Bekera, 2014; Hoseini et al., 2020; Zobel and Khansa, 2014; Ahmed et al., 2019; Zobel, 2011; Zhou and Chen, 2020; Cimellaro et al., 2010b). اما در روش‌های احتمالاتی با استفاده از اطلاعات موجود و روش‌های آماری، تابع توزیع بازایی سیستم و ... به دست می‌آیند (Tokgoz and Gheorghe, 2013; Youn et al., 2011; Teodorescu, 2015; Ayyub, 2014; Rød et al., 2016; Najarian and Lim, 2019). به عنوان مثال، ژبل رابطه‌ای قطعی برای محاسبه میزان کاهش تاب‌آوری^۳ سیستم‌ها به صورت زیر ارائه کرد (Zobel, 2011):

$$LR(X, T) = \frac{XT}{2T^*} \quad X \in [0, 1], \quad T \in [0, T^*] \quad (1-2)$$

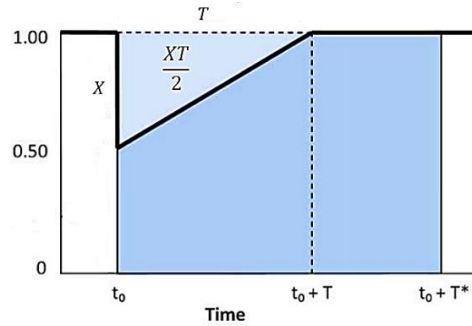
در رابطه ۱-۲، X میزان عملکرد از دست رفته سیستم پس از ایجاد اختلال و T زمان مورد نیاز برای بازایی کامل سیستم هستند. همچنین T^* حد بالای T است که می‌توان آن را معادل کل زمان کارکرد سیستم در نظر گرفت (شکل ۲-۱۳). همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان کاهش عملکرد سیستم نسبت به کل زمان کارکرد سیستم (T^*) محاسبه شده است. در نتیجه، میزان تاب‌آوری سیستم با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Zobel, 2011):

$$R(X, T) = 1 - LR(X, T) = 1 - \frac{XT}{2T^*} \quad (2-2)$$

¹ Deterministic

² Probabilistic

³ Loss of Resilience (LR)

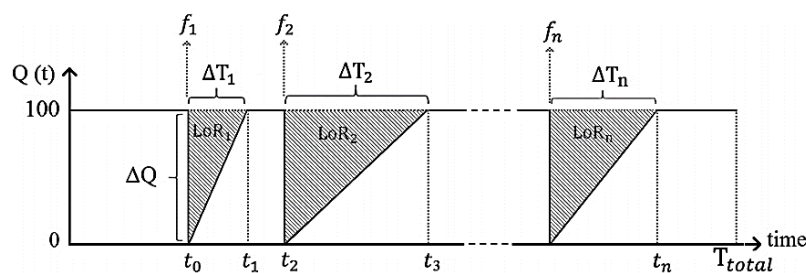


شکل ۲-۱۳- تصویر شماتیک از مفهوم تاب آوری در روش ارائه شده توسط ژبل (Zobel, 2011)

در رابطه ۲-۲ فرض بر این است که سطح عملکرد اولیه سیستم برابر با یک (۱۰۰ درصد) است؛ این یعنی سیستم در بهترین وضعیت خود قرار دارد. همچنین فرض شده است که عملیات بازایی بلافاصله بعد از اتمام اختلال شروع می‌شود. مشابه با رابطه ۲-۲، حسینی و همکاران نیز تاب آوری ماشین آلات معادن جبهه کار طولانی مکانیزه را مورد بررسی قرار دادند (Hoseinie et al., 2020). با این تفاوت که به جای یک اختلال، چندین اختلال در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۲-۳).

$$R = 1 - \frac{1}{2T_{total}} \sum_{i=1}^n \Delta T_i \times \Delta Q_i \quad (2-3)$$

در این رابطه T_{total} معادل کل زمان کارکرد سیستم، ΔT_i زمان سپری شده برای بازایی سیستم از اختلال شماره i و ΔQ_i میزان کاهش عملکرد سیستم در اثر اختلال شماره i است (شکل ۲-۱۴). باید خاطر نشان کرد که در این مطالعه نیز فرض شده است که سطح عملکرد سیستم قبل از وقوع اختلال برابر با ۱۰۰ درصد بوده است. حال آن که با افزایش عمر، عملکرد سیستم‌های مهندسی تنزل می‌یابد.



شکل ۲-۱۴- تصویر شماتیک از مفهوم تاب آوری در روش ارائه شده توسط حیدری و همکاران (Hoseinie et al., 2020)

ایوب نیز رابطه‌ای احتمالاتی به صورت زیر برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌ها ارائه کرد (Ayyub, 2014):

$$R_e = \frac{T_i + F\Delta T_f + R\Delta T_r}{T_i + \Delta T_f + \Delta T_r} \quad (4-2)$$

در رابطه ۴-۲، R_e نماد تاب‌آوری سیستم، T_i زمان وقوع اختلال، T_f زمان خرابی سیستم، T_r زمان بازیابی، $\Delta T_f = T_f - T_i$ مدت زمان خرابی و $\Delta T_r = T_r - T_f$ مدت زمان بازیابی سیستم هستند. همچنین، R و F به ترتیب برابر با منحنی خرابی و بازیابی سیستم هستند و برای بدست آوردن آن‌ها می‌توان از تحلیل آماری داده‌های مربوط به زمان تا خرابی و زمان تا بازیابی سیستم استفاده کرد.

همان‌طور که مشاهده شد، اساس محاسبه تاب‌آوری در روابط معرفی شده مقایسه مقادیر عملکرد سیستم قبل و بعد از وقوع اختلال است. با این حال، روش‌های قطعی دارای فرضیاتی هستند که کاربرد این روش‌ها را محدود می‌سازند. به عنوان مثال، در این گونه روش‌ها فرض بر این است که عملیات بازیابی بلافاصله بعد از اتمام اختلال شروع می‌شود. اما در واقعیت، این امکان وجود دارد تا به دلیل عوامل مختلفی از جمله مهارت کارگران، سرعت تصمیم‌گیری مدیریت، تدارکات و ... عملیات بازیابی با تأخیر آغاز شود. برای تحلیل مناسب و مؤثر تاب‌آوری سیستم، چنین عوامل تأثیرگذاری باید شناسایی شوند و سپس باید تأثیر آن‌ها کمی شود. با این حال، بیشتر مطالعات مبتنی بر روش‌های تجربی، تأثیر چنین عوامل تأثیرگذاری را نادیده گرفته‌اند. علاوه بر این، رویکردهای تجربی تنها متکی به داده‌های تاریخی هستند. در حقیقت، داده‌های تاریخی در بسیاری از موارد در دسترس نیستند و حتی برای داده‌های موجود نیز فرض همگن بودن در بسیاری از موارد توجیه‌پذیر نیست.

همچنین، ممکن است پارامترهای استفاده شده در رابطه مختص نوع خاصی از سیستم‌ها باشند و در سایر زمینه‌ها کاربردی نباشند. برای مثال، احمد و همکاران رابطه ۲-۵ را برای محاسبه تاب‌آوری سیستم حمل و نقل ارائه کردند (Ahmed et al., 2019). در این رابطه R نماد تاب‌آوری سیستم حمل و نقل، NT_{pre} تعداد سفرهایی است که قبل از وقوع اختلال توسط سیستم انجام گرفته است و

nT_{Post} تعداد سفرهایی است که بعد از وقوع اختلال توسط سیستم انجام شده است. واضح است که چنین رابطه ساده‌ای تنها برای سیستم‌های حمل و نقل قابل استفاده است.

$$R = \frac{nT_{Post}}{NT_{Pre}} \quad (5-2)$$

روش‌های شبیه‌سازی چگونگی تأثیر ساختار سیستم بر روی تاب‌آوری را مورد بررسی قرار می‌دهند. در این روش‌ها می‌بایست رفتار سیستم مورد مشاهده قرار بگیرد و ویژگی‌های آن نیز شبیه‌سازی شوند (Hosseini et al., 2016; Rød, 2020). روش‌های شبیه‌سازی بیشترین کاربرد را در زمینه سیستم‌هایی همچون شبکه‌های برق و حمل و نقل دارند (Hosseini and Barker, 2016; Hossain et al., 2019b; Liu et al., 2019a; Zhou et al., 2020; Assad et al., 2019; Afrin and Yodo, 2019). در این نوع روش، معمولاً شبکه بیزین^۱ (Hosseini and Barker, 2016; Hossain et al., 2019b; Cai et al., 2018; Tong et al., 2020; Kammouh et al., 2020; Sarwar et al., 2018) روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۲ (Li et al., 2020; Zhang et al., 2018c)، مدل‌های فازی (Muller, 2012; Tepes and Neumann, 2020) و الگوریتم‌های بهینه‌سازی^۳ (MacKenzie and Zobel, 2016; Nogal et al., 2016) مورد استفاده قرار می‌گیرند. شبکه بیزین بیشتر برای مقابله با عدم قطعیت و اطلاعات جزئی استفاده می‌شوند (Hossain et al., 2019b; Kammouh et al., 2020). در بحث کاربرد شبکه بیزین، مطالعات فعلی عمدتاً فرض می‌کنند که سیستم‌ها ماهیتی ایستا دارند و اخیراً کاربرد شبکه‌های بیزین پویا^۴ مورد توجه قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، کاموه^۵ و همکاران برای در نظر گرفتن ماهیت پویا سیستم حمل و نقل با افزودن بعد زمان، از یک شبکه بیزین پویا استفاده

¹ Bayesian Network (BN)

² Monte Carlo simulation method

³ Optimization

⁴ Dynamic Bayesian Networks (DBNs)

⁵ Kammouh

کردند (Kammouh et al., 2020). کای و همکاران نیز شبکه بیزین پویا و مدل مارکوف را برای تحلیل تابآوری سیستم تأمین برق ترکیب کردند (Cai et al., 2021). به طور کلی، مدل های شبیه سازی، پیچیده، پر هزینه و زمان بر بوده و به سطح بالایی از تخصص و همچنین داده ها و اطلاعات گسترده فنی، عملیاتی و سازمانی نیاز دارند. از این رو، کاربرد آن ها محدود به سازمان هایی است که چنین قابلیت هایی را دارا باشند.

روش های کیفی نیز سعی می کنند تا تابآوری سیستم ها را از نظر کیفی و بدون توصیفات عددی ارزیابی کنند (Sharifi and Yamagata, 2015). از آنجا که این مدل ها کیفی هستند، به ندرت برای سیستم های مهندسی استفاده شده اند. در روش های مبتنی بر اندیس، بر اساس ماهیت سیستم و شرایط عملیاتی، برخی از شاخص ها^۱ برای ارائه تابآوری سیستم در نظر گرفته می شوند. پس از آن، اندیس تابآوری با استفاده از تجمیع شاخص های شناسایی شده (معمولاً با استفاده از روش میانگین وزنی^۲) تخمین زده می شود (Storesund et al., 2018; Rehak et al., 2019; Guo et al., 2020; Barabadi et al., 2020). روش های مبتنی بر اندیس به عنوان روش های نیمه کمی^۳ نیز شناخته می شوند (Nogal and O'Connor, 2018). روش های مبتنی بر اندیس امکان استفاده از عوامل و شاخص های مختلف تأثیرگذار بر روی تابآوری سیستم های فنی و نیز اعمال ضرایب اهمیت آن ها را فراهم می کنند. به طور حتم، این موضوع در شناخت نقاط ضعف و قوت تابآوری سیستم سودمند خواهد بود (Storesund et al., 2018). همچنین، روش های مبتنی بر اندیس امکان استفاده از نظرات متخصصان برای شرایطی که داده های خام در دسترس نیستند را نیز فراهم می کنند (Barabadi et al., 2020). به عنوان مثال، پورسیانین^۴ و همکاران اندیس تابآوری زیرساخت های حیاتی^۵ (CIRI) را

¹ Indicators

² Weighted average method

³ Semi-quantitative

⁴ Pursiainen

⁵ Critical Infrastructure Resilience Index (CIRI)

توسعه دادند (Pursiainen et al., 2017). این اندیس از چرخه مدیریت بحران^۱ الهام گرفته شده است که هم مراحل قبل از ایجاد اختلال (ارزیابی، پیشگیری، آمادگی و هشدار) و هم بعد از اختلال (پاسخ، بازیابی و یادگیری) را در نظر می‌گیرد. این مراحل به عنوان شاخص‌های سطح اول اندیس CIRI در نظر گرفته می‌شوند. امتیاز نهایی اندیس CIRI با تجمیع امتیازات شاخص‌های سطح اول بدست می‌آید که به کمک ویژگی‌های خاص سیستم تعیین می‌شوند. در حال حاضر، این اندیس در موارد مختلفی مانند تاب‌آوری زیرساخت‌های بهداشت و درمان (Barabadi et al., 2020) و شبکه‌های تأمین آب (Storesund et al., 2018) به کار گرفته شده است.

باید توجه داشت که روش‌های مبتنی بر اندیس علاوه بر ارزیابی تاب‌آوری سیستم‌های فنی، در حوزه ارزیابی تاب‌آوری جوامع نیز استفاده شده‌اند (Cutter et al., 2010; Renschler et al., 2010; Miles and Chang, 2011; Pfefferbaum et al., 2013; Kammouh et al., 2017; Kammouh and Cimellaro, 2018; Kammouh et al., 2018; Scherzer et al., 2019). اما به دلیل این که مطالعات مربوطه به‌طور خاص بر روی سیستم‌های فنی تمرکز نداشتند، در فرآیند مرور نیز وارد نشدند. با این حال، در اینجا به چند مورد از کاربردهای روش‌های مبتنی بر اندیس در حوزه تاب‌آوری جوامع نیز اشاره شده است. به عنوان مثال، در شاخص تاب‌آوری پایه برای جوامع^۲ (BRIC) مؤلفه‌هایی مانند اجتماعی، زیست‌محیطی و زیرساختی برای تجزیه و تحلیل تاب‌آوری جامعه مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این روش، شاخص‌هایی مانند ظرفیت سرپناه و ظرفیت درمانی برای ارزیابی ظرفیت بازیابی و پاسخ‌گویی جامعه استفاده می‌شوند (Cutter et al., 2010). رانشلر^۳ و همکاران (Renschler et al., 2010) چارچوب تاب‌آوری^۴ PEOPLES را برای کمی‌سازی تاب‌آوری در مقیاس جامعه و با

¹ Crisis management cycle

² Baseline Resilience Indicators for communities

³ Renschler

⁴ Population and demographics, Environmental/ecosystem, Organized governmental services, Physical infrastructure, Lifestyle and community competence, Economic development, and Social-cultural capital

استفاده از ابعادی مانند محیط زیست، توسعه اقتصادی، زیرساخت‌های فیزیکی، جمعیت و غیره پیشنهاد دادند. تجمیع عملکرد چنین ابعادی در جامعه منجر به محاسبه تاب‌آوری کل جامعه می‌شود. در این چارچوب ضریب اهمیت یا وزن مؤلفه‌های مؤثر بر ابعاد مختلف نیز در نظر گرفته می‌شود. همچنین، این روش به داده‌های کمی و کیفی موجود در مورد حوادثی که در گذشته برای جامعه مورد نظر پیش آمده متکی است (Kammouh et al., 2019; Kammouh and Cimellaro, 2018; Renschler et al., 2010).

۴-۲- جمع‌بندی

در این فصل، برای کسب اطلاعات هر چه بیشتر در مورد مفهوم، زمینه‌های کاربرد و نیز روش‌های تحلیل تاب‌آوری در حوزه سیستم‌های فنی، تحقیقات موجود در این حوزه با استفاده از روش مرور نظام‌مند مورد مرور و بررسی قرار گرفتند. روش مرور سابقه علمی نظام‌مند اولین بار در سال ۲۰۰۴ معرفی شده و ابزاری برای شناسایی، ارزیابی و تفسیر کلیه تحقیقات قابل دسترس در مورد موضوعی خاص به‌شمار می‌آید. برای این نوع مرور، روش‌شناسی کاملاً مشخصی ارائه شده اما بر خلاف روش سنتی (مرور سابقه علمی غیرنظام‌مند)، روش نظام‌مند به سعی و تلاش بسیار بیشتری نیازمند است. همان‌طور که مشاهده شد، پس از طی گام‌های روش نظام‌مند، ۱۴۵۴ مورد تحقیق شناسایی شده و پس از اعمال معیارهای ورود و خروج، ۱۹۲ مورد از تحقیقات شناسایی شده به‌عنوان تحقیقات اولیه مدنظر قرار گرفتند. در مرحله بعد، براساس استراتژی تعریف شده برای استخراج اطلاعات، تحقیقات اولیه مورد بررسی قرار گرفتند و طبق اطلاعات جمع‌آوری شده، به سؤالات پاسخ داده شد. خلاصه نتایج حاصل از اجرای مرور نظام‌مند در بحث تاب‌آوری سیستم‌های فنی به شرح زیر هستند:

- طبق نتایج به‌دست آمده، از سال ۲۰۰۳ به بعد، تاب‌آوری به تدریج جای خود را در میان جامعه مهندسی جهان پیدا کرده و فراوانی تحقیقات صورت گرفته در این حوزه سیری

صعودی را در پیش گرفته است. با توجه به نوپا بودن بحث تاب‌آوری در حوزه سیستم‌های فنی و نبود اتفاق نظر بر روی نحوه تعریف و تحلیل آن، در حال حاضر ظرفیت تحقیقاتی بسیار زیادی در ارتباط با رفع شکاف‌های موجود در مفهوم و نحوه تحلیل آن وجود دارد. در نتیجه، موضوع تاب‌آوری در حوزه سیستم‌های فنی موضوعی نوظهور و دارای پتانسیل تحقیقاتی زیادی به حساب می‌آید.

- سیستم‌های انرژی، شبکه حمل و نقل و شبکه آبرسانی به ترتیب بیشترین فراوانی را به عنوان مطالعات موردی در بین سایر زمینه‌ها به خود اختصاص داده‌اند. در بین سیستم‌های انرژی نیز تحلیل تاب‌آوری شبکه تأمین برق بیشترین فراوانی را داشته است. همچنین تحلیل تاب‌آوری شبکه حمل و نقل آبی بیشترین فراوانی را در بین اجزای مختلف شبکه حمل و نقل داشته است. در میان تحقیقات بررسی شده، دو مورد نیز با زمینه معدن‌کاری در ارتباط بودند.
- برای داشتن سیستمی تاب‌آوری: توانایی پیش‌بینی آنچه روی خواهد داد، توانایی حفاظت و مقاومت در برابر رویداد مخاطره آمیز، توانایی جذب اثرات ناشی از اختلال، توانایی انطباق با شرایط جدید و تغییرات پیش آمده و توانایی بازیابی عملکرد سیستم پس از وقوع رویداد مخاطره آمیز ضروری هستند. برای دستیابی به چنین توانایی‌هایی، اجرای دو نوع فعالیت برای سیستم‌های تاب‌آور حیاتی است که شامل فعالیت‌های قبل از وقوع اختلال (آماده‌سازی سیستم) و فعالیت‌های بعد از وقوع اختلال (بازیابی سیستم) می‌شوند.
- طبق بررسی‌هایی که بر روی تحقیقات اولیه انجام شد، ۲۰ مورد از ویژگی‌هایی که به آماده‌سازی و بازیابی سیستم وابسته هستند و بر روی تاب‌آوری آن تأثیر می‌گذارند، شناسایی شدند. در بین آن‌ها، ویژگی تنومندی بیشترین کاربرد را داشته است.
- تاب‌آوری سازمان مالک سیستم نقش بزرگی در تاب‌آوری آن ایفا می‌کند. دستیابی به سیستمی تاب‌آور بدون وجود سازمانی که بتواند از پس بحران‌های پیش آمده برآید و پاسخ‌هایی درخور برای مسائل ارائه کند، امکان‌پذیر نیست.

- ویژگی‌هایی همچون قابلیت اطمینان، قابلیت پشتیبانی و ... به تنهایی قادر به ایجاد تاب‌آوری در سیستم‌های فنی نیستند. در نتیجه، مدیریت باید به دنبال ایجاد و توسعه ویژگی‌هایی در سیستم باشد که در مقاوم‌سازی، منعطف‌سازی و تعمیرپذیر ساختن آن مشارکت کنند.
- روش‌های تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی به چهار گروه تجربی، شبیه‌سازی، مبتنی بر اندیس و کیفی تقسیم‌بندی می‌شوند. طبق مطالعات بررسی شده، روش‌های شبیه‌سازی بیشترین کاربرد را در تحلیل تاب‌آوری داشته‌اند.
- روش‌های تجربی به دو نوع قطعی و احتمالی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های قطعی دارای فرضیاتی هستند که کاربرد آن‌ها را محدود می‌سازند. روش‌های شبیه‌سازی نیز ساختار و ویژگی‌های سیستم را شبیه‌سازی می‌کنند.
- روش‌های شبیه‌سازی، پیچیده، پرهزینه و زمان‌بر بوده و به سطح بالایی از تخصص و همچنین داده‌ها و اطلاعات گسترده فنی، عملیاتی و سازمانی نیاز دارند. از این رو، کاربرد آن‌ها محدود به سازمان‌هایی است که چنین قابلیت‌هایی را دارا باشند.
- روش‌های مبتنی بر اندیس اغلب به صورت نیمه کمی اجرا می‌شوند. روش‌های کیفی نیز بدون توصیفات عددی سعی در ارزیابی تاب‌آوری سیستم دارند.

فصل ۳: روش‌شناسی تحقیق

۳-۱- آشنایی

تحلیل تاب‌آوری اولین و شاید مهمترین گام در مدیریت مؤثر تاب‌آوری سیستم‌های فنی به حساب می‌آید (Rød, 2020). در بیشتر مواقع، مدیران تمایل دارند تا با اجرای روشی مناسب و کاربردی، نقاط قوت و ضعف موجود در تاب‌آوری سیستم تحت کنترلشان را شناسایی کنند. این کار منجر به شناسایی بخش‌هایی می‌شود که به تحلیل‌ها و اقدامات جدی‌تر احتیاج دارند. در نتیجه، برای نایل شدن به این هدف، مدیران نیازمند روشی با انعطاف‌پذیری بالا هستند. با این حال، دقت تحلیل‌های انجام شده تا حد زیادی به کیفیت و دقت داده‌های جمع‌آوری شده و ابزارهای استفاده شده برای تجزیه و تحلیل داده‌ها بستگی دارد. این‌گونه پیش‌نیازها چالش‌های متعددی برای تحلیل‌گر به وجود می‌آورند. اولین چالش، فقدان داده‌هایی از جنس تاب‌آوری و محدودیت اطلاعات است. دلیل فقدان چنین داده‌هایی این است که در حال حاضر اکثر سیستم‌های جمع‌آوری اطلاعات با هدف تحلیل تاب‌آوری طراحی نشده‌اند. به‌طور کلی، وقتی چنین داده‌هایی ناکافی باشند و یا این‌که در دسترس نباشند، تحلیل تاب‌آوری با استفاده از ابزارهای مرسوم، در بیشتر موارد، غیرممکن خواهد بود. مورد دیگری که باید در تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی مورد توجه قرار گیرد، عدم در نظر گرفتن برخی عوامل مؤثر همچون شرایط عملیاتی در تحلیل تاب‌آوری است. این‌گونه عوامل تأثیرگذار در تحقیقات موجود به خوبی بررسی نشده‌اند. در این رساله، به‌منظور غلبه بر چنین چالش‌هایی و نیز تسهیل روند تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی، روشی جدید ارائه خواهد شد. با نظر به این مقدمه، در این فصل

ابتدا در مورد روش‌شناسی تحقیق و روش پیشنهادی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی صحبت خواهد شد. همچنین، جزئیات و نحوه به‌کارگیری روش ارائه شده به‌طور کامل و گام به گام مورد بررسی قرار داده می‌شود.

۳-۲- روش پیشنهادی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی

طبق نتایج حاصل از بررسی سابقه علمی و مفهومی موضوع تاب‌آوری، در شرایطی که داده و اطلاعاتی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم در دسترس نباشد، استفاده از روش‌های مبتنی بر اندیس مفید واقع خواهد شد. همچنین، این‌گونه روش‌ها امکان در نظر گرفتن تأثیر عوامل مؤثر بر روی تاب‌آوری سیستم را نیز فراهم می‌کنند. به‌طور کلی، اندیس تاب‌آوری متأثر از عوامل مختلفی همچون اقدامات حفاظتی، شرایط عملیاتی، نحوه مدیریت سیستم، فرآیند بازیابی، تدارکات، آموزش، انگیزه پرسنل، بودجه و ... می‌باشد. با این حال، مطالعات مبتنی بر اندیس موجود در مورد شناسایی و تعیین کمیت این‌گونه عوامل تأثیرگذار بسیار دقیق نبوده و به نظر می‌رسد که کمبود داده‌های تاریخی مانع اصلی انجام چنین مطالعات دقیقی است. با توجه به این‌که بیشتر سیستم‌های جمع‌آوری داده برای تحلیل تاب‌آوری طراحی نشده‌اند، کمبود داده یکی از چالش‌های پیش‌روی تحلیل‌گران در سال‌های آینده خواهد بود. علاوه بر این، برخی از عوامل تأثیرگذار بر روی تاب‌آوری سیستم، اگر چه ملموس هستند، اما قابل اندازه‌گیری نیستند (به‌عنوان مثال، انگیزه پرسنل) که این مسأله چالش‌های بیشتری را برای تحلیل‌گر ایجاد می‌کند. به‌طور کلی، هنگامی که داده‌ها ناکافی باشند و یا این‌که در دسترس نباشند، تحلیل‌های انجام شده برای تاب‌آوری نتایج قابل اعتمادی را ارائه نخواهند داد. در چنین شرایطی، با استفاده از قضاوت کارشناسان، داده‌های اساسی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم فراهم خواهند شد.

برای داشتن یک مدل مؤثر مبتنی بر اندیس، ابتدا باید اندیس‌هایی که معرف رفتار سیستم قبل و بعد از وقوع اختلال هستند، شناسایی شوند. همچنین باید عوامل تأثیرگذار بر اندیس‌های تعریف شده نیز

تعیین شوند و سپس با استفاده از یک رویکرد مناسب، تأثیر آن‌ها کمی‌سازی شود. علاوه بر این، هر کدام از عوامل مؤثر بر تاب‌آوری سیستم دارای ضریب اهمیت منحصر به فردی هستند که می‌بایست تعیین شود. بر همین اساس، در این فصل، روشی مبتنی بر اندیس برای تسهیل فرآیند تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی، با در نظر گیری عوامل تأثیرگذار، ارائه خواهد شد. اندیس پیشنهادی برای در نظر گرفتن تأثیر عوامل تأثیرگذار بر روی تاب‌آوری سیستم‌ها در حوزه‌های فنی و سازمانی طراحی شده است. همان‌طور که گفته شد، روش ارائه شده از قضاوت کارشناسان برای تخمین اندیس تاب‌آوری سیستم بهره می‌برد. همچنین، در این روش، کاربرد مجموعه‌های فازی به منظور غلبه بر عدم قطعیت و اریبی موجود در قضاوت کارشناسان پیشنهاد شده است.

تاب‌آوری سیستم‌های فنی به دو نوع تاب‌آوری نرم^۱ و سخت^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. تاب‌آوری سخت نشان دهنده رفتار قسمت فنی سیستم بوده و تاب‌آوری نرم نمایان‌گر افراد و سازمانی است که سیستم را در مراحل آماده‌سازی و بازیابی (قبل از، در حین و بعد از وقوع اختلال) اداره می‌کنند. بنابراین، برای ارزیابی مؤثر تاب‌آوری، مراحل آماده‌سازی و بازیابی سیستم باید به طور مناسب تجزیه و تحلیل شوند (Barabadi and Ayele, 2018b). اخیراً، از قابلیت اطمینان به عنوان نماینده مرحله آماده‌سازی سیستم در تحلیل تاب‌آوری استفاده شده است (Rød et al., 2016; Sarwar et al., 2018; Yodo and Wang, 2016; Yoon et al., 2017; Youn et al., 2011). در نتیجه، برای سیستم‌های فنی، قابلیت اطمینان معرف آمادسازی سیستم است. از سوی دیگر، با گذشت زمان، عملکرد سیستم به دلیل برخی از تنش‌های داخلی و خارجی تنزل می‌یابد. در نتیجه، برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم، سازمان نیازمند یک سیستم PHM مؤثر برای شناسایی نقص و عیب سیستم در اسرع وقت می‌باشد (Youn et al., 2011; Rød et al., 2016; Yoon et al., 2017). به‌طور کلی، سیستم‌های

¹ Soft resilience

² Hard resilience

PHM وضعیت سیستم فعلی را ارزیابی کرده و برای شناسایی، تشخیص و پیش‌بینی خرابی‌های سیستم ساخته شده‌اند. این قابلیت به تشخیص زود هنگام نقص و عیب در سیستم اشاره دارد و بر روی بازیابی سیستم تأثیر می‌گذارد (Rød et al., 2016; Jain et al., 2018; Dinh et al., 2012). زیرا، عیوب سیستم هرچه زودتر شناسایی شوند، رسیدگی به آن‌ها و بازیابی بخش معیوب آسان‌تر و سریع‌تر خواهد بود. علاوه بر این، پس از ایجاد اختلال، این تعمیرپذیری است که تعیین می‌کند سیستم با چه سرعتی قادر است تا به سطح عملکرد دلخواه خود بازگردد (Sarwar et al., 2018). برای داشتن تعمیرپذیری مناسب، سازمان نیازمند ایجاد طرحی مؤثر برای بحث پشتیبانی و تدارکات است. تدارکات می‌بایست در مراحل آماده‌سازی سیستم برنامه‌ریزی شوند و بر این اساس، در حین وقوع اختلال و پس از آن در فرآیند بازیابی سیستم به‌کار گرفته شوند. چنین طرحی نیازمند افراد با مهارت بالا، فرایند مؤثر و رویه‌های کاملاً مشخصی است که توسط سازمان مالک سیستم تدوین شده باشند. بنابراین، تعمیرپذیری، تاب‌آوری سازمان مالک سیستم و کارایی سیستم PHM که توسط سازمان ایجاد شده است، به‌عنوان معرف‌های مرحله بازیابی سیستم در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به مطالب ذکر شده، روش تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های فنی که از خانواده روش‌های مبتنی بر اندیس به‌حساب می‌آید، به‌صورت شکل ۱-۳ ارائه می‌شود. این شکل نشان دهنده اندیس تاب‌آوری کل^۱ (TRI) می‌باشد که در آن مفاهیم تاب‌آوری^۲ (RC) تعریف شده شامل قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، کارایی سیستم PHM و تاب‌آوری سازمان مالک سیستم در سطح اول ساختار سلسله مراتبی در نظر گرفته شده‌اند. هر یک از مفاهیم ذکر شده توسط برخی از شاخص‌های عمومی^۳ (GI) تعریف می‌شوند که در سطح دوم در نظر گرفته شده‌اند. به‌عنوان مثال، برای اندیس قابلیت اطمینان، شاخص‌های شرایط عملیاتی^۴، طراحی^۱ و استراتژی فعلی نت (نگهداری و تعمیرات) سیستم به‌عنوان شاخص‌های

¹ Total Resilience Index (TRI)

² Resilience Concept (RC)

³ Generic Indicator (GI)

⁴ Operational conditions indicator

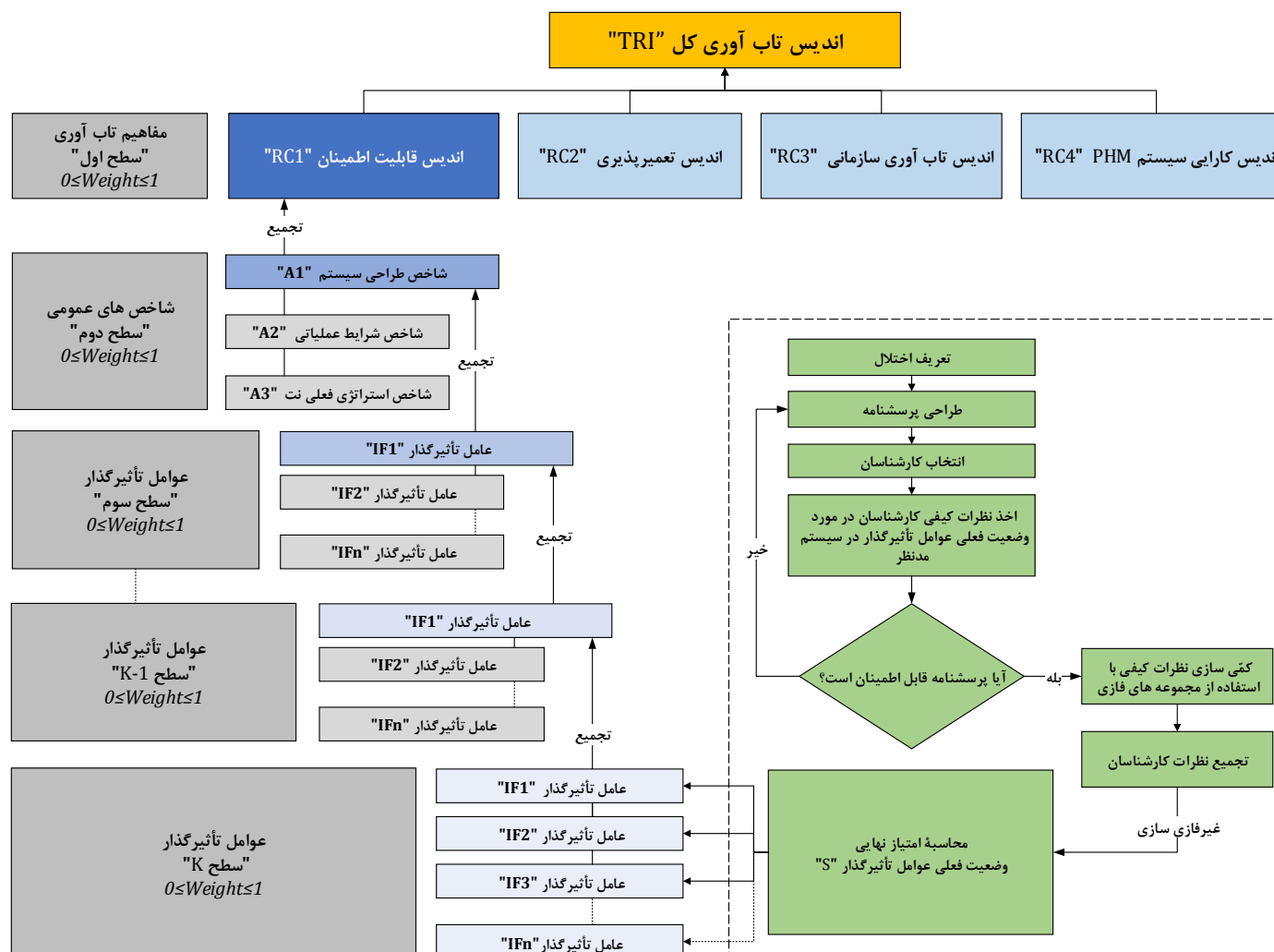
عمومی در نظر گرفته شده است. پس از تعریف شاخص‌های عمومی، عوامل تأثیرگذار^۲ (IF) بر روی این شاخص‌ها باید شناسایی شوند. در سطح $k-1$ ام، تمام عوامل تأثیرگذار بر شاخص‌های عمومی به بخش‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. به همین ترتیب، این امکان وجود دارد تا فرآیند شناسایی این‌گونه عوامل تا در نظر گرفتن عوامل مؤثر در سطح k ام که به توسعه بیشتری نیاز ندارند، ادامه پیدا کند. عوامل تأثیرگذار بر تاب‌آوری سیستم باعث می‌شوند تا نقاط قوت و ضعف سیستم در زمینه‌های فنی (تاب‌آوری سخت) یا سازمانی (تاب‌آوری نرم) شناسایی شوند. این مسأله به مدیران سیستم کمک کرده تا بخش‌هایی از سیستم که حساس‌تر بوده و نیاز به توجه بیشتری دارند را مشخص کنند. ایجاد ساختار سلسله‌مراتبی باید از سطح اول شروع شده و تا سطح k ام ادامه یابد. باید توجه داشت که ممکن است مقدار " k " برای هر عامل تأثیرگذار متفاوت باشد. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌های انجام شده از پایین‌ترین سطح (سطح k ام) به سمت سطوح بالاتر، تا زمانی که اندیس تاب‌آوری کل بدست آید، تجمیع می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌منظور غلبه بر چالش‌های موجود (مانند فقدان داده‌های از جنس تاب‌آوری)، راهکاری که در این روش برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز ارائه شده مبتنی بر نظرات کارشناسانی است که تجربهٔ سال‌ها کار و تعامل با سیستم را دارند.

۳-۲-۱- اندیس تاب‌آوری کل: شاخص‌های عمومی (سطح دوم)

طبق شکل ۳-۱، تاب‌آوری سازمانی، کارایی سیستم PHM، تعمیرپذیری و قابلیت اطمینان به‌عنوان معرف‌های مراحل بازیابی و آماده‌سازی سیستم در سطح اول سلسله‌مراتب استفاده شده‌اند. این مفاهیم تحت تأثیر شاخص‌های عمومی هستند که در سطح دوم مدل می‌شوند.

¹ System design indicator

² Influencing factors (IF)



شکل ۳-۱- روش پیشنهاد شده برای تحلیل تاب آوری سیستم فنی

الف) شاخص‌های عمومی اندیس‌های قابلیت اطمینان (RC_1) و تعمیرپذیری (RC_2)

برای سیستمی که در حالت عادی قرار دارد (قبل از ایجاد اختلال)، قابلیت اطمینان نشان دهنده احتمال فراهم شدن عملکرد مورد نیاز سیستم می‌باشد (Baroud et al., 2014a). همچنین، تعمیرپذیری نشان دهنده میزان سهولت بازیابی سیستم پس از وقوع اختلال است (Rød et al., 2016; Sarwar et al., 2018). به‌طور کلی، مختل شدن عملکرد سیستم‌ها به دلیل نت غیر صحیح، عملکرد نامناسب یا خطا در مرحله طراحی می‌باشد (The Council of the European Union, 2008). در نتیجه، در یک سیستم فنی، حفظ عملکرد مورد نیاز سیستم و بازیابی سریع آن پس از وقوع اختلال به ویژگی‌های طراحی، وضعیت نت (نگهداری و تعمیرات) و شرایط عملیاتی بستگی دارد. بنابراین، شاخص‌های طراحی سیستم، استراتژی فعلی نت و شرایط عملیاتی به‌عنوان شاخص‌های عمومی برای ارزیابی وضعیت اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری در نظر گرفته شده‌اند.

• شاخص طراحی سیستم

این شاخص به عواملی اشاره دارد که می‌بایست در مرحله طراحی سیستم و برای اطمینان از عملکرد مناسب آن مورد توجه قرار گیرند (Sarwar et al., 2018). به‌عنوان مثال، استفاده از سه عدد بادبزین اصلی موازی برای ایجاد ویژگی افزونگی در سیستم تهویه در مرحله طراحی در نظر گرفته می‌شود.

• شاخص استراتژی فعلی نت

استراتژی نت شامل اجرای تعداد زیادی از تصمیمات مرتبط با بازرسی، تعمیر و جایگزینی اجزای مختلف سیستم می‌شود (Kelly, 2006). کیفیت عملیات نت در بهبود و یا افت قابلیت اطمینان سیستم نقش مهمی را ایفا می‌کند (Hoseinie et al., 2012a, 2012b). به‌عنوان مثال، اجرای بازرسی‌های ادواری توسط تیم نت باعث شناسایی و رفع عیب‌های موجود در سیستم شده و افت قابلیت اطمینان آن را جبران می‌کند. علاوه بر این، شناسایی عیوب در مراحل اولیه منجر به کاهش

زمان انجام تعمیر¹ (TTR) نیز می‌شود. در نتیجه، عملیات نت بر روی تعمیرپذیری سیستم نیز تأثیر می‌گذارد. هدف استراتژی نت به حداکثر رساندن زمان کارکرد سیستم است (Kelly, 2006; Hoseinie et al., 2012b; Garg et al., 2013; Deighton, 2016).

• شاخص شرایط عملیاتی

شرایط عملیاتی ماهیتی دوگانه دارند. این شرایط قادرند موجب کاهش و یا افزایش قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری سیستم شوند (Sarwar et al., 2018). به عنوان مثال، تعمیرکار یا اپراتوری که آموزش کافی ندیده باشد به طور حتم باعث آسیب دیدگی سیستم در حین عملیات آن خواهد شد، حتی اگر سیستم به درستی طراحی شده باشد.

ب) شاخص‌های عمومی اندیس تاب‌آوری سازمانی (RC_3)

به کارگیری مفهوم تاب‌آوری عاملی است که به سازمان‌ها کمک می‌کند تا قادر باشند به طور مؤثر با حوادث غیر منتظره کنار بیایند، به ویژه در مواقعی که شرایط بسیار ناپایدار و نامشخص است (Walker et al., 2014; Rehak, 2020). اهمیت تاب‌آوری سازمانی زمانی بیشتر می‌شود که بدانیم تاب‌آوری سیستم‌های فنی نه تنها به فناوری به کار رفته در آن‌ها بلکه به سازمان‌هایی که آن‌ها را مدیریت می‌کنند نیز بستگی دارد (Brown et al., 2017).

تاب‌آوری سازمانی شامل کلیه بازیگران درگیر در مدیریت سیستم مانند مدیران، پرسنل و اپراتورها می‌شود. در نتیجه، تصور داشتن سیستمی تاب‌آور بدون وجود سازمانی که قادر باشد از پس اختلالات پیش‌آمده بر آید، امکان پذیر نیست (Omer et al., 2014). هدف نهایی تاب‌آوری سازمانی بهبود عملکرد سازمان در مواجهه با شرایط غیر عادی و ایجاد ذهنیت حل مسأله در سطح سازمان است (Rød, 2020; Rød et al., 2016; Rehak, 2020). سازمانی که پرسنل آن دارای احساس

¹ Time to Repair (TTR)

مالکیت^۱ (Luthans et al., 2015)، ابتکار عمل^۲ (Walker et al., 2014)، خلاقیت^۳ (Brown et al., 2017; Lv et al., 2018) و انعطاف‌پذیری^۴ (Denyer, 2017) می‌باشند، قادر است تا به‌طور مؤثری در شرایط اضطراری رفتار کند. بنابراین، در این رساله، موارد مذکور به‌عنوان شاخص‌های عمومی برای ارزیابی وضعیت اندیس تاب‌آوری سازمان مالک سیستم در نظر گرفته شده‌اند. شاخص‌های مذکور در ادامه تشریح شده‌اند:

• احساس مالکیت

طبق نظر لوتانس^۵ (Luthans et al., 2015)، سازمان‌ها باید به دنبال سازوکاری باشند که با استفاده از آن قادر به شنیدن پرسنل خود باشند و شرایطی را فراهم کنند که منجر به ایجاد حس مالکیت و تعهد در آن‌ها شود. به‌طور حتم، وقتی پرسنل نسبت به سازمان احساس مالکیت داشته باشند، تلاش بیشتری برای انجام وظایف خود، به‌ویژه در شرایط اضطراری، خواهند داشت.

• ابتکار عمل

ابتکار عمل پرسنل در سازمان به‌عنوان اتخاذ رویکردی فعالانه و خودجوش نسبت به کار و فرا رفتن از آنچه که رسماً در شغل معینی لازم است، تعریف می‌شود (Frohman, 1997; Walker et al., 2014). پرسنلی که ابتکار عمل دارند معمولاً چابک‌تر و مشتاق‌تر هستند. وقتی اتفاق غیرمنتظره‌ای رخ می‌دهد آن‌ها می‌توانند واکنش هوشمندانه‌ای از خود نشان دهند. این مسأله منجر به ایجاد محیط کاری کارآمدی شده و فعالیت‌های سازمان را به مسیرهای جدیدتری وارد می‌کند.

¹ Sense of ownership

² Initiative

³ Creativity

⁴ Flexibility

⁵ Luthans

• خلاقیت

خلاقیت به آوردن چیزی جدید به مرحله وجود دلالت می‌کند. خلاقیت تولید کننده راه‌حل‌های باکیفیت، اصیل و مناسب برای مشکلات سازمان است (Mumford et al., 2012). خلاقیت سوخت مورد نیاز ایده‌های جدید و کاربردی است. خلاقیت در سازمان اغلب به‌عنوان ایجاد و خلق ایده‌های کارآمد و جدید تعریف می‌شود (علیرضایی و تولایی، ۱۳۸۷).

• انعطاف‌پذیری

سازمان‌ها در محیط رقابتی و غیرقابل پیش‌بینی امروزی، نیازمند سازگاری با محیط خود هستند. انعطاف‌پذیری پرسنل بر روی سازگاری ویژگی‌های آن‌ها نظیر دانش، مهارت‌ها و رفتارها با شرایط محیطی در حال تغییر، متمرکز شده است. انعطاف‌پذیری نیروی کار، توانایی و قابلیت تعدیل و سازگاری با تهدیدها و فرصت‌هاست (طیبی و همکاران، ۱۳۹۴). انعطاف‌پذیری توانایی ایجاد تغییرات نسبتاً کوتاه مدت و با هزینه کم بوده و قادر است عواقب رویدادهای مخرب را محدود سازد (Hollnagel et al., 2006; Denyer, 2017). سازمان‌های انعطاف‌پذیر قادرند سازوکار داخلی خود را به‌نحوی تنظیم کنند تا با شرایط جدید وفق یابند (Cox et al., 2011).

ج) شاخص‌های عمومی اندیس کارایی سیستم PHM (RC_4)

سیستم PHM ابزار بسیار مفیدی در زمینه تشخیص و پیش‌بینی نقص‌های سیستم‌های فنی است. سیستم PHM از تصمیمات منطقی در مورد زمان و نحوه بازیابی سیستم و اجزای آن حمایت می‌کند. در نتیجه، کارایی این سیستم نشان دهنده قابلیت پیش‌بینی سیستم فنی خواهد بود. چرخه عملکرد سیستم PHM شامل جمع‌آوری اطلاعات توسط حسگرها، پردازش اطلاعات، ارزیابی شرایط، تشخیص نقص، پیش‌بینی نقص و تصمیم‌گیری می‌شود (Javed et al., 2015).

تعیین کارایی سیستم PHM برای سیستم‌های فنی که از این نوع سیستم استفاده می‌کنند کار راحتی است. اما ممکن است برخی از سیستم‌های فنی از این نوع سیستم استفاده نکنند و اطلاعاتی که حسگرها نشان می‌دهند توسط افراد (اپراتور یا اعضای تیم نت) ثبت و تحلیل شوند. در چنین شرایطی، کارایی سیستم PHM تحت تأثیر صحت تشخیص و پیش‌بینی عیوب توسط اپراتور یا اعضای تیم نت است. کارایی سیستم PHM عمدتاً به وسیله ارزیابی احتمال تشخیص^۱ صحیح نقص و احتمال پیش‌آگهی^۲ صحیح خرابی تعیین می‌شود (Youn et al., 2011)، برای تخمین اندیس کارایی سیستم PHM نیز می‌توان از چنین احتمالاتی کمک گرفت. در نتیجه احتمال تشخیص صحیح نقص و احتمال پیش‌آگهی صحیح خرابی به عنوان شاخص‌های عمومی اندیس کارایی سیستم PHM در نظر گرفته می‌شوند. برای تخمین احتمال تشخیص صحیح نقص و احتمال پیش‌آگهی صحیح خرابی و به تبع تخمین اندیس کارایی سیستم PHM، می‌توان از روش تحلیل درخت خطا فازی^۳ (FFTA) استفاده کرد.

۳-۲-۲- عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص‌های عمومی

پس از شناسایی شاخص‌های عمومی در سطح دوم، در مرحله بعد، عوامل مؤثر بر روی آن‌ها می‌بایست مشخص شوند. شناسایی عوامل تأثیرگذار نقش بسیار مهمی در تحلیل نهایی تاب‌آوری سیستم خواهد داشت. همچنین، به شناسایی بخش‌هایی از سیستم که نیازمند توجه بیشتری هستند نیز کمک می‌کند. بنابراین، در هر سطح، عوامل باید به گونه‌ای شناسایی شوند که به درستی منعکس‌کننده عوامل مرتبط با خود در سطح بالای سلسله مراتب باشند. در ادامه، برخی از عواملی که به صورت بالقوه

¹ Diagnosis

² Prognosis

³ Fuzzy fault tree analysis (FFTA)

بر شاخص‌های عمومی تأثیر می‌گذارند، بررسی می‌شوند. از این عوامل می‌توان به‌عنوان نقطه شروع استفاده کرد.

الف) عوامل مؤثر بر شاخص‌های عمومی اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری از ویژگی‌های طراحی سیستم و تحت تأثیر استراتژی‌های نت و شرایط عملیاتی هستند. از این رو، همان‌طور که بیان شد، شاخص‌های طراحی سیستم، شرایط عملیاتی و استراتژی فعلی نت به‌عنوان شاخص‌های عمومی برای اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری در سطح دوم در نظر گرفته شدند. علاوه بر این، شاخص‌های عمومی اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری نیز تحت تأثیر برخی عوامل تأثیرگذار در سطح سوم سلسله مراتب قرار دارند. در ادامه، برخی از این‌گونه عوامل که به‌صورت بالقوه بر شاخص‌های عمومی اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری تأثیر می‌گذارند، معرفی می‌شوند.

• عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص طراحی سیستم

شاخص طراحی سیستم در برگیرنده عواملی است که می‌بایست در مرحله طراحی برای ارتقای قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری زیرساخت مورد ملاحظه قرار گیرند. به‌عنوان مثال، در نظر گرفتن سیستم‌های پشتیبان^۱ برای زیرساخت که در واقع باعث ایجاد افزونگی و در نهایت افزایش ظرفیت جذب آن می‌شوند، مربوط به مرحله طراحی هستند. اما همواره شکافی اجتناب ناپذیر بین آن چیز که در تصور طراح بوده با آن چیز که در عمل روی می‌دهد، وجود دارد. بنابراین، طراحان علاوه بر این‌که باید در طراحی خود به فکر تمهیداتی برای پیشگیری از وقوع حوادث و اختلالات باشند، می‌بایست به فکر تمهیدات واکنشی برای انجام اصلاحات لازم پس از وقوع حادثه نیز باشند (Provan et al., 2020). از این رو، دو گروه از عوامل بر ارزیابی وضعیت شاخص طراحی سیستم در سطح سوم در نظر گرفته

¹ Backup utility systems

می‌شوند که شامل استراتژی‌های کنشگرایانه^۱ و واکنشی^۲ می‌شوند (Bea, 2005; Sarwar et al., 2018; Kumari and Kaur, 2018; Provan et al., 2020).

استراتژی کنشگرایانه: استراتژی کنشگرایانه آن دسته از عوامل را شامل می‌شود که باید در مرحله طراحی در نظر گرفته شوند و هدف آن‌ها ایجاد ظرفیت‌هایی برای جذب تأثیر اختلالات و سازگاری (انطباق) سیستم با شرایط جدید، قبل از وقوع اختلالات و یا در حین وقوع آن‌هاست (Bea, 2005; Sarwar et al., 2018; Kumari and Kaur, 2018; Provan et al., 2020). از آنجا که برای داشتن ظرفیت‌های جذب و انطباق می‌بایست از قبل اقدام کرد و تأثیرات آن‌ها قبل از و در حین وقوع اختلال نمایان می‌شوند، ظرفیت‌های مذکور به‌عنوان عوامل مرتبط با استراتژی‌های کنشگرایانه در سطح چهارم نظر گرفته می‌شوند (Sarwar et al., 2018; Abimbola and Khan, 2019; Hossain et al., 2019b; Yarveysy et al., 2020; Zinetullina et al., 2020). به‌عنوان مثال، در نظر گرفتن پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی^۳ برای قطعاتی که در معرض چنین آسیبی هستند نوعی ظرفیت جذب در سیستم ایجاد می‌کند. همچنین، فراهم کردن سازوکاری برای کاهش دور موتور در شرایطی که لاس‌ها^۴ در اثر فرسودگی دچار لرزش می‌شوند، ظرفیت انطباق ایجاد می‌کند.

استراتژی واکنشی: استراتژی واکنشی آن دسته از عوامل را شامل می‌شود که باید در مرحله طراحی سیستم در نظر گرفته شوند و هدف آن‌ها ایجاد ظرفیت‌هایی برای انطباق با شرایط جدید و مرمت سیستم در حین و پس از وقوع اختلالات است (Bea, 2005; Sarwar et al., 2018; Kumari and Kaur, 2018; Provan et al., 2020). با توجه به این‌که برای داشتن ظرفیت انطباق و مرمت می‌بایست از قبل اقدام کرد و تأثیر آن‌ها در حین و بعد از وقوع اختلال نمایان می‌شود، ظرفیت‌های

¹ Proactive strategy

² Reactive strategy

³ Anti-corrosion coating

⁴ Bearings

مذکور به‌عنوان عوامل مرتبط با استراتژی‌های واکنشی در سطح چهارم در نظر گرفته می‌شوند (Hosseini and Barker, 2016; Sarwar et al., 2018; Hossain et al., 2019a; Zinetullina et al., 2020). به‌عنوان مثال، وقتی خسارت ایجاد شده در برینگ‌ها به حد بحرانی برسد، کاهش دور موتور (انطباق با شرایط) دیگر مفید واقع نخواهد نشد و این قطعات باید جایگزین شوند (مفاهیم ظرفیت‌های جذب، انطباق و مرمت سیستم در فصل دوم بیان شده است).

باید توجه داشت که عوامل مؤثر سطوح پایین‌تر سلسله مراتب که با استفاده از آن‌ها ارزیابی وضعیت ظرفیت‌های جذب، انطباق و مرمت سیستم امکان‌پذیر خواهد بود، وابسته به سیستم فنی مورد مطالعه بوده و ممکن است برای هر سیستمی متفاوت باشند. بنابراین، این‌گونه عوامل که در سطوح پایین‌تر قرار می‌گیرند باید با توجه به سیستم مدنظر برای تحلیل تاب‌آوری انتخاب شوند.

• عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص استراتژی فعلی نت

یکی از عواملی که در کیفیت استراتژی فعلی نت سیستم نقش مؤثری دارد، قابلیت پشتیبانی سیستم می‌باشد (Ghodrati, 2005; Ghodrati et al., 2010; Tortorella, 2015; Hosseini and Barker, 2016). در نتیجه، قابلیت پشتیبانی به‌عنوان عامل تأثیرگذار بر روی شاخص استراتژی فعلی نت در سطح سوم سلسله مراتب در نظر گرفته می‌شود. پشتیبانی‌های صورت گرفته برای بهبود عمومی امکانات مورد نیاز برای تعمیرات، بدون توجه به هیچ گونه تعمیر خاصی، پشتیبانی "خارج از خط"^۱ نامیده می‌شود. به‌عنوان مثال، تدارکات قطعات یدکی^۲ و امکانات مورد نیاز بخش نت^۳ از جمله مواردی هستند که در پشتیبانی خارج از خط مدنظر قرار می‌گیرند. در مقابل، پشتیبانی‌هایی که مستقیماً در ارتباط با آماده‌سازی برای تعمیری خاص صورت می‌پذیرند، پشتیبانی "بر خط"^۴ نامیده می‌شوند.

^۱ Off-line

^۲ Spare part logistics

^۳ Maintenance facilities

^۴ Online

به‌عنوان مثال، سرعت انتقال قطعات یدکی و تشخیص صحت علت خرابی روی داده از جمله مواردی هستند که در پشتیبانی بر خط در نظر گرفته می‌شوند (Tortorella, 2015). با توجه به مطالب گفته شده، عبارات خارج از خط و بر خط را می‌توان به‌ترتیب معادل با کنش‌پذیر^۱ و کنش‌گر^۲ در نظر گرفت. بنابراین، از آنجا که قابلیت پشتیبانی نتیجه رویه‌ها و فرآیندهای پشتیبانی است، پشتیبانی‌های کنش‌پذیر و کنش‌گر به‌عنوان عوامل تأثیرگذاری که با استفاده از آن‌ها امکان ارزیابی وضعیت قابلیت پشتیبانی سیستم فراهم می‌شود، در سطح چهارم سلسله مراتب در نظر گرفته می‌شوند.

سایر عواملی که بر روی شاخص استراتژی فعلی نت سیستم تأثیر می‌گذارند وابسته به نوع استراتژی اتخاذ شده برای نت سیستم بوده و ممکن است برای هر سیستمی متفاوت باشند. همچنین، عوامل تأثیرگذار بر روی پشتیبانی‌های کنش‌پذیر و کنش‌گر نیز از این مسأله تبعیت می‌کنند. بنابراین، این‌گونه عوامل که در سطوح پایین‌تر قرار می‌گیرند، می‌بایست با توجه به نوع استراتژی نت و وضعیت سیستم تحت بررسی انتخاب شوند.

• عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص شرایط عملیاتی

شاخص شرایط عملیاتی آن‌دسته از عوامل را شامل می‌شود که برای ارتقای قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری در حین عملیات سیستم، مورد نیاز هستند. اپراتور و تعمیرکاران آموزش دیده، به‌کارگیری و یا تعمیر سیستم تحت شرایط استاندارد و وضعیت مدیریت سیستم از جمله موارد هستند که در حین عملیات بر روی عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند (Sarwar et al., 2018). بنابراین، آموزش^۳، مدیریت^۴ و استانداردسازی سیستم^۵ به‌عنوان عوامل تأثیرگذاری که با استفاده از آن‌ها امکان ارزیابی وضعیت شاخص شرایط عملیاتی سیستم فراهم می‌شود، در نظر گرفته شده‌اند.

¹ Passive

² Active

³ Training

⁴ Management

⁵ System standardization

مشابه با موارد گذشته، سایر عوامل مؤثری که با استفاده از آن‌ها ارزیابی وضعیت عوامل آموزش، مدیریت و استانداردسازی سیستم امکان‌پذیر خواهد بود وابسته به شرایط سیستم می‌باشند. در نتیجه، عوامل مؤثری که در سطوح پایین‌تر قرار می‌گیرند، باید با توجه به وضعیت سیستم انتخاب شوند.

۳-۲-۳- عوامل مؤثر بر شاخص‌های عمومی اندیس تاب‌آوری سازمانی

در بحث اندیس تاب‌آوری سازمانی، برخی از عوامل مؤثری که در تعیین وضعیت شاخص‌های احساس مالکیت، ابتکار عمل، خلاقیت و انعطاف‌پذیری در سازمان نقش دارند، به شرح زیر هستند:

الف) عوامل مؤثر بر شاخص احساس مالکیت

در سازمان، این امکان وجود دارد تا پرسنل نسبت به تصمیماتی که توسط مدیریت اتخاذ می‌شوند، سؤالات و یا انتقاداتی داشته باشند. بنابراین، باید برای آن‌ها حقی قائل شد تا به‌دور از هرگونه واهمه‌ای انتقادات و نظرات خود را در جهت پیشرفت سازمان بیان کرده و تا حدی در فرآیند تصمیم‌گیری نقش داشته باشند. علاوه بر این، باید به استقلال پرسنل نیز توجه شود. استقلال به احساس آزادی پرسنل در داشتن انتخاب و کنترل بر روی امور مربوط می‌شود (Fock et al., 2011). استقلال شغلی حدی است که مدیریت عالی اتخاذ تصمیمات ویژه را به سطوح پایین‌ترین واگذار می‌کند. آزادی عمل بهترین راه برای توانمندسازی پرسنل و ایجاد تعهد و احساس مسئولیت در آن‌هاست (Harrison et al., 2006; Deci et al., 2017). همچنین باید توجه داشت که ارتکاب به اشتباه امری اجتناب‌ناپذیر است و بیش از سرزنش و مجازات پرسنل، باید با تحلیل علل ریشه‌ای^۱ (RCA) آن‌ها به دنبال راه‌حلی برای رفعشان بود. از سوی دیگر، ذینفع بودن پرسنل به اشکال مختلف، همچون به‌کارگیری طرح مالکیت سهم پرسنل^۲ (ESOP) و اهدای کمک هزینه‌های درمانی و

^۱ Root cause analysis (RCA)

^۲ Employee Stock Ownership Program (ESOP)

آموزشی، یکی از عوامل مهم برای ایجاد حس مالکیت در میان پرسنل سازمان به‌شمار می‌آید. در واقع پرسنل متوجه می‌شوند که منافع حاصل از زحماتشان به خودشان هم باز می‌گردد (Lengnick-Hall and Bereman, 1994). شفاف‌سازی نیز از جمله مواردی است که باید به آن توجه داشت. گفتگو شفاف درباره اهداف آینده و وضعیت فعلی مجموعه، نقش مهمی در ایجاد اعتماد و تعهد در بین پرسنل دارد (Schnackenberg and Tomlinson, 2016). بنابراین، مدیریت باید سعی کند تا دور از دسترس نباشد و همواره با اعضای مجموعه خود درباره فعالیت‌های فعلی و آتی سازمان و به‌ویژه اهداف آن از طریق جلسات صحبت کند. در کنار موارد ذکر شده، ایجاد انگیزه در پرسنل نیز برای ایجاد حس مالکیت در آن‌ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به‌طور حتم، پرسنل با انگیزه در شرایط اضطراری عکس‌العمل مناسب‌تری از خود به نمایش می‌گذارد (Kanfer and Chen, 2016; Lee and Raschke, 2016).

با توجه به مطالب فوق، ایجاد احساس مالکیت در پرسنل سازمان امری اتفاقی نیست و نیاز به خلق محیطی دارد که در آن تا حدی اجازه ارتکاب به اشتباه وجود داشته باشد، پرسنل در انجام امور استقلال داشته باشند، تصمیمات مدیریت برای آن‌ها شفاف‌سازی شود، پرسنل در سود و زیان سازمان سهیم بوده و حق اظهار نظر داشته باشند. همچنین، می‌بایست به بحث ایجاد انگیزه در پرسنل نیز توجه شود. بر همین اساس، آزادی خطا^۱، شفاف‌سازی^۲، حق اظهار نظر داشتن^۳، ذینفع بودن پرسنل^۴، استقلال^۵ و انگیزش^۶ به‌عنوان عوامل سطح سوم که با استفاده از آن‌ها ارزیابی وضعیت احساس مالکیت در سازمان امکان پذیر خواهد بود در نظر گرفته شدند. باید توجه داشت که هیچ کدام از عوامل مذکور به تنهایی قادر به ایجاد احساس مالکیت در پرسنل سازمان نبوده و تأثیر جمعی

¹ Allow for mistake

² Transparency

³ Allow for coments

⁴ Personnel benefit

⁵ Autonomy

⁶ Motivation

آن‌هاست که کارگشا خواهد بود. بدیهی است که ایجاد چنین شرایطی مستلزم صرف هزینه خواهد بود؛ اما در مقابل مزایای بسیار زیادی نیز خواهد داشت.

ب) عوامل مؤثر بر شاخص ابتکار عمل

مشابه با احساس مالکیت، ایجاد ابتکار عمل در پرسنل سازمان نیز اتفاقی نیست و تحت تأثیر مسائلی همچون میزان انگیزه ایجاد شده در بین پرسنل سازمان، میزان استقبال از پیشنهادات ارائه شده توسط آن‌ها و عدم سرکوب ابتکار عمل آن‌ها می‌باشد. بنابراین، انگیزش، استقبال از پیشنهادات^۱ و عدم سرکوب ابتکار عمل^۲ به عنوان عوامل تأثیرگذار در سطح سوم سلسله مراتب که ارزیابی وضعیت ابتکار عمل در سازمان را امکان‌پذیر می‌کنند، انتخاب شدند. باید توجه داشت که سرکوب کارهای مبتکرانه پرسنل و یا عدم استقبال از پیشنهادات آن‌ها به مرور باعث خواهد شد تا پرسنل نسبت به مسائل پیش آمده در محیط سازمان رفتاری منفعل از خود نشان دهند.

ج) عوامل مؤثر بر شاخص خلاقیت

مواردی همچون استفاده از کارگروهی^۳ در انجام امور، ایجاد انگیزه در بین پرسنل سازمان، اتخاذ رویکرد غیر تنبیهی^۴ توسط مدیریت سازمان و نیز افزایش آگاهی پرسنل از رویدادها و اطلاعات جدید مرتبط با زمینه‌ای که در آن فعالیت می‌کنند، باعث ارتقای خلاقیت پرسنل سازمان می‌شوند. شبکه‌سازی^۵ از جمله راه‌های افزایش آگاهی پرسنل نسبت به رویدادهای جدیدی است که مرتبط با وظایف آن‌هاست. شرکت در کنفرانس‌ها، همایش‌ها، جلسات و... از جمله راه‌های مؤثر برای شبکه‌سازی پرسنل شناخته می‌شود. به عنوان مثال، حضور در مجامع علمی باعث می‌شود تا فرد با تعداد بسیار زیادی از ایده‌های جدید و خلاقانه به سازمان بازگردد و یا با افراد متخصصی آشنا شود که

¹ Welcome suggestion

² Unsuppressed initiative

³ Teamwork

⁴ Non-punitive approach

⁵ Networking

ارتباط با آن‌ها برای پیشبرد اهداف سازمان مفید باشند. همچنین، در رویکرد غیر تنبیهی مدیریت سازمان به فرد اجازه می‌دهد تا عملکرد خود را بهبود ببخشد. در این رویکرد، مدیریت به‌جای قضاوت، پرسنل را هدایت کرده تا سطح عملکرد خود را به سطح مطلوب و استاندارد سازمان برسانند. خلاقیت یک ویژگی قابل یادگیری است و عواملی مانند کارگروهی، شبکه‌سازی، رویکرد غیر تنبیهی مدیریت و انگیزش باعث ارتقای آن می‌شوند.

د) عوامل مؤثر بر شاخص انعطاف‌پذیری

همان‌طور که عنوان شد، سازمان‌های منعطف قادرند سازوکار داخلی خود را به‌نحوی تنظیم کنند تا با شرایط پیش آمده سازگار شوند. ارتباط و هماهنگی مناسب بین بخش‌های مختلف سازمان، وجود روحیه همکاری در بین پرسنل برای انجام امور، آموزش کافی و مناسب پرسنل، فرهنگ حاکم بر سازمان و سرعت پاسخگویی سازمان به رویدادهای غیر منتظره از جمله مواردی هستند که به سازگاری سازمان با شرایط جدید کمک می‌کنند (Cox et al., 2011; Brown et al., 2017; Heeks and Ospina, 2019; Rehak, 2020). بر همین اساس، برای ارزیابی وضعیت انعطاف‌پذیری سازمان از عواملی همچون ارتباط و هماهنگی^۱، همکاری^۲، آموزش، فرهنگ^۳ سازمان و زمان^۴ (سرعت پاسخگویی سازمان به حوادث) در سطح سوم استفاده شده است. این امکان وجود دارد تا هر کدام از عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص‌های عمومی اندیس تاب‌آوری سازمانی متأثر از عوامل مؤثر دیگری باشند که در سطوح پایین‌تر قرار بگیرند. این‌گونه عوامل که به مسائل جزئی‌تری می‌پردازند، ممکن است برای هر سازمان متفاوت باشند. بنابراین، چنین عواملی باید با توجه به سازمان تحت بررسی انتخاب شوند.

¹ Communication and coordination

² Collaboration

³ Culture

⁴ Time

۳-۲-۴- رویکرد جمع‌آوری اطلاعات مبتنی بر قضاوت کارشناسان

هنگامی که اطلاعات کافی یا با کیفیت بالا وجود نداشته باشند، استفاده از قضاوت کارشناسان اهمیت بالایی در ارزیابی تاب‌آوری سیستم خواهد داشت (Rød et al., 2016). با این حال، استفاده از قضاوت کارشناسان با چالش‌هایی نیز همراه است. عدم قطعیت در قضاوت کارشناسان و اریبی نظرات آن‌ها از جمله چالش‌های این رویکرد می‌باشند. روش‌های مختلفی برای غلبه بر عدم قطعیت‌ها و کاهش اریبی قضاوت‌های کارشناسان ارائه شده است. در این بین، نظریه مجموعه‌های فازی از جمله روش‌هایی است که برای این منظور استفاده می‌شوند (Baziuk et al., 2016). در رویکرد پیشنهادی، به منظور جمع‌آوری داده‌های لازم برای تحلیل تاب‌آوری سیستم فنی، ابتدا باید پرسشنامه‌ای طراحی شود. تعداد سؤالات مطرح شده در پرسشنامه برابر با تعداد عوامل تأثیرگذار در سطح k ام سلسله مراتب می‌باشد. همچنین، سؤالات می‌بایست در جهت تعیین وضعیت فعلی عوامل تأثیرگذار در سیستم تحت بررسی تدوین شوند. باید توجه داشت که قضاوت در مورد وضعیت فعلی برخی از عوامل تأثیرگذار در سیستم مانند "وضعیت تدارکات قطعات یدکی" وابسته به نوع اختلالی است که برای سیستم روی داده است. بنابراین، ابتدا می‌بایست نوع اختلال تعریف شود. در نتیجه، تمام سؤالات مربوط به عوامل تأثیرگذاری که قضاوت در مورد وضعیت فعلی آن‌ها بستگی به نوع اختلال دارد، می‌بایست با توجه به نوع اختلال از پیش تعریف شده طراحی شوند. با این حال، سؤالات مربوط به سایر عوامل تأثیرگذار همچون "انگیزش" که قضاوت در مورد وضعیت فعلی آن‌ها به نوع اختلال بستگی ندارد، بدون توجه به نوع اختلال طراحی می‌شوند. در مرحله بعد می‌بایست کارشناسان واجد شرایط برای مشارکت در فرآیند نظرسنجی را انتخاب کرد. افرادی که برای مصاحبه و نظرسنجی انتخاب می‌شوند، علاوه بر داشتن دانش کافی در مورد سیستم تحت بررسی، می‌بایست تجربه کافی در تعامل با آن را نیز داشته باشند. کارشناسان انتخاب شده ممکن است شامل مدیران سیستم، اپراتورها، خدمه نت و مهندسين فنی باشند که کاملاً با سیستم مربوطه در ارتباط هستند. همچنین، برای تشویق هر چه بیشتر کارشناسان به منظور مشارکت در فرآیند نظرسنجی، لازم است که اهمیت کار برای آن‌ها به صورت

کامل و شفاف توضیح داده شود. موضوع دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد تعداد کافی کارشناسان مشارکت کننده است. اگر چه در مورد تعداد کافی کارشناسان شرکت کننده در نظرسنجی توافقی وجود ندارد، اما به عنوان قانونی کلی، شش تا هشت کارشناس (و نه کمتر از چهار نفر) می‌بایست در فرآیند نظرسنجی شرکت کنند (Szwed, 2016). اخذ نظرات و قضاوت‌های کارشناسان به صورت کیفی و بر اساس مقیاس هفت درجه‌ای لیکرت^۱ انجام می‌گیرد. نمونه‌ای از عبارات زبانی^۲ که می‌توان برای اخذ نظرات کیفی کارشناسان استفاده کرد در جدول ۱-۳ ارائه شده است. کارشناسان منتخب باید از این مقیاس برای قضاوت‌های کیفی خود در مورد وضعیت فعلی عوامل تأثیرگذاری که در سطح k ام سلسله مراتب قرار دارند، استفاده کنند. به عنوان مثال، هنگامی که کارشناس برای توصیف وضعیت عاملی گزینه "ضعیف" را انتخاب کند، طبق نظر وی، وضعیت فعلی عامل مربوطه در سیستم (با توجه به نوع اختلال تعریف شده) ضعیف است. لازم به ذکر است، برای تعیین پایایی پرسشنامه، اجرای آزمون آلفای کرونباخ^۳ نیز مفید خواهد بود. به طور کلی، اگر مقدار به دست آمده برای آلفای کرونباخ بیشتر از ۰/۷ باشد، پایایی پرسشنامه در سطح قابل قبولی قرار دارد (Azadeh et al., 2017; Taghi- Molla et al., 2020).

جدول ۱-۳- عبارات زبانی و مجموعه‌های فازی متناظر با آن‌ها (Goyal et al., 2008)

شماره	عبارت زبانی	نماد	مجموعه فازی متناظر
۱	بسیار کم/ بسیار ضعیف/ بسیار بد	VL	(۰, ۰, ۰/۱)
۲	کم/ ضعیف/ بد	L	(۰, ۰/۱, ۰/۳)
۳	تا حدودی کم/ تا حدودی ضعیف/ تا حدودی بد	RL	(۰/۱, ۰/۳, ۰/۵)
۴	متوسط/ معمولی	M	(۰/۳, ۰/۵, ۰/۷)
۵	تا حدودی زیاد/ تا حدودی قوی/ تا حدودی خوب	RH	(۰/۵, ۰/۷, ۰/۹)
۶	زیاد/ قوی/ خوب	H	(۰/۷, ۰/۹, ۱/۰)
۷	بسیار زیاد/ بسیار قوی/ بسیار خوب	VH	(۰/۹, ۱/۰, ۱/۰)

¹ Seven point likert scale

² Linguistic terms

³ Cronbach's alpha test

در مرحله بعد، عدم قطعیت‌ها و ابهامات موجود در قضاوت‌های کارشناسان می‌بایست کمی‌سازی شوند. در نظرسنجی‌های سنتی، پیش‌بینی‌های ارائه شده توسط کارشناسان در قالب اعداد قطعی بیان می‌شوند. در حالی که استفاده از اعداد قطعی برای پیش‌بینی‌های بلند مدت، نتیجه پیش‌بینی را از واقعیت دور می‌سازد. از طرفی، کارشناسان از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خود برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند و این نشان می‌دهد که عدم قطعیت حاکم بر این شرایط، از نوع امکانی است نه احتمالی. امکانی بودن عدم قطعیت، با مجموعه‌های فازی سازگاری دارد و بنابراین بهتر است که با استفاده از مجموعه‌های فازی، به پیش‌بینی بلند مدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخته شود (عطائی، ۱۳۹۴).

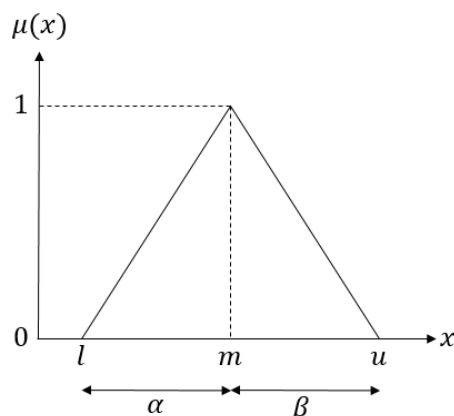
نظریه مجموعه‌های فازی اولین بار توسط زاده^۱ ارائه شد. این نظریه بر گرفته از تعمیم نظریه مجموعه‌های کلاسیک بوده و در منطق فازی^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نظریه، علامت " $\sim$ " در بالای نمادی که معرف مجموعه فازی است، قرار داده می‌شود. به‌طور معمول، از اعداد فازی مثلثی^۳ (TFN) و یا دوزنقه‌ای^۴ برای نشان دادن مجموعه‌های فازی استفاده می‌شود. همچنین، به‌دلیل سادگی، بیشتر از اعداد فازی مثلثی استفاده می‌شود. تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عدد فازی مثلثی " $\tilde{a}$ " به صورت $\tilde{a} = (l, m, u)$ نمایش داده می‌شود. عناصر l ، m و u به ترتیب به حداقل مقادیر ممکن، امیدبخش‌ترین و حداکثر مقادیر ممکن که بیانگر رویداد فازی " $\tilde{a}$ " هستند، اشاره می‌کنند (Zadeh, 1965). بر همین اساس، برای کمی‌سازی نظرات کیفی کارشناسان می‌توان از اعداد فازی ارائه شده در جدول ۳-۱ کمک گرفت.

^۱ Zadeh

^۲ Fuzzy logic

^۳ Triangular Fuzzy Number (TFN)

^۴ Trapezoidal



شکل ۳-۲- تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی

پس از کمی‌سازی نظرات کارشناسان با استفاده از اعداد فازی، می‌بایست این نظرات با یکدیگر تجمیع^۱ شوند تا بر روی وضعیت فعلی عامل تأثیرگذار در سطح k ام سلسله مراتب، اجماع^۲ صورت گیرد. بر همین اساس، هنگامی که تعداد کارشناسان مشارکت کننده در فرآیند نظرسنجی برابر با Z باشد و عدد فازی حاصل از نظر Z امین کارشناس در مورد وضعیت فعلی i امین عامل تأثیرگذار در سطح k ام سلسله مراتب برابر با $\tilde{s}_{iz} = (a_{iz}, b_{iz}, c_{iz})$ باشد، خروجی اجماع قضاوت‌های کارشناسان در مورد وضعیت فعلی i امین عامل مؤثر در سطح k ام سلسله مراتب از رابطه ۳-۱ بدست می‌آید (Chen et al., 2006).

$$(\tilde{S}_i)_k = (a_i, b_i, c_i) = \left(\min_Z \{a_{iz}\}, \frac{\sum_{z=1}^Z b_{iz}}{Z}, \max_Z \{c_{iz}\} \right), (z = 1, 2, \dots, Z) \quad (1-3)$$

در رابطه ۳-۱، a_i ، b_i و c_i به ترتیب حد پایین، بالا و متوسط عدد فازی حاصل از اجماع قضاوت‌های کارشناسان در مورد وضعیت فعلی i امین عامل مؤثر در سطح k ام سلسله مراتب به حساب می‌آیند. عدد فازی حاصل از اجماع قضاوت کارشناسان نشان دهنده امتیاز فازی وضعیت فعلی i امین عامل تأثیرگذار در سطح k ام می‌باشد. پس از اجماع نظرات، اعداد فازی حاصل شده برای تمام عوامل مؤثر در سطح k ام سلسله مراتب، می‌بایست غیرفازی‌سازی شوند تا امتیازات قطعی وضعیت فعلی آن‌ها

¹ Aggregate

² Consensus

به‌دست آید. مقدار قطعی عدد فازی $\tilde{a} = (l, m, u)$ با استفاده از میانگین امکانی قطعی $(\bar{M}(\tilde{a}))^1$ به‌صورت رابطه زیر تعیین می‌شود (Carlsson and Fullér, 2001):

$$\bar{M}(\tilde{a}) = m + \left[\frac{(u - m) - (m - l)}{6} \right] \quad (2-3)$$

بر همین اساس، در صورتی که خروجی حاصل از اجماع نظرات کارشناسان در مورد وضعیت فعلی i آمین عامل تأثیرگذار در سطح k ام برابر با $(\tilde{S}_i)_k = (a_i, b_i, c_i)$ باشد، خروجی غیرفازی‌سازی شده با استفاده از رابطه ۳-۳ به‌دست می‌آید. خروجی رابطه زیر به‌عنوان امتیاز قطعی وضعیت فعلی i آمین عامل مؤثر در سطح k ام سلسله مراتب در نظر گرفته می‌شود.

$$(S_i)_k = \frac{(a_i + 4b_i + c_i)}{6}, \quad (0 \leq S_i \leq 1) \quad (3-3)$$

امتیاز وضعیت فعلی عامل تأثیرگذار j ام در سطح $k-1$ ام سلسله مراتب نیز با استفاده از میانگین وزن دار امتیازات عوامل مؤثر بر روی آن عامل در سطح k ام به‌صورت زیر برآورد می‌شود:

$$(S_j)_{k-1} = \left(\sum_{i=1}^n S_i W_i \right)_k, \quad \sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (4-3)$$

در رابطه ۳-۴، S_j امتیاز وضعیت فعلی عامل تأثیرگذار j ام در سطح $k-1$ ام و n نشان دهنده تعداد عوامل مؤثری است که متصل به عامل تأثیرگذار j ام در سطح $k-1$ ام هستند. همچنین، W_i معرف ضریب وزنی نرمال شده i آمین عامل مؤثر در سطح k ام است. ضرایب وزنی عوامل تأثیرگذار در سطح k ام نشان دهنده میزان تأثیر آن‌ها بر روی عامل مؤثر j ام در سطح $k-1$ ام می‌باشد. به‌منظور تخمین وزن‌های عوامل تأثیرگذار نیز می‌توان از روش‌هایی همچون روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره^۲

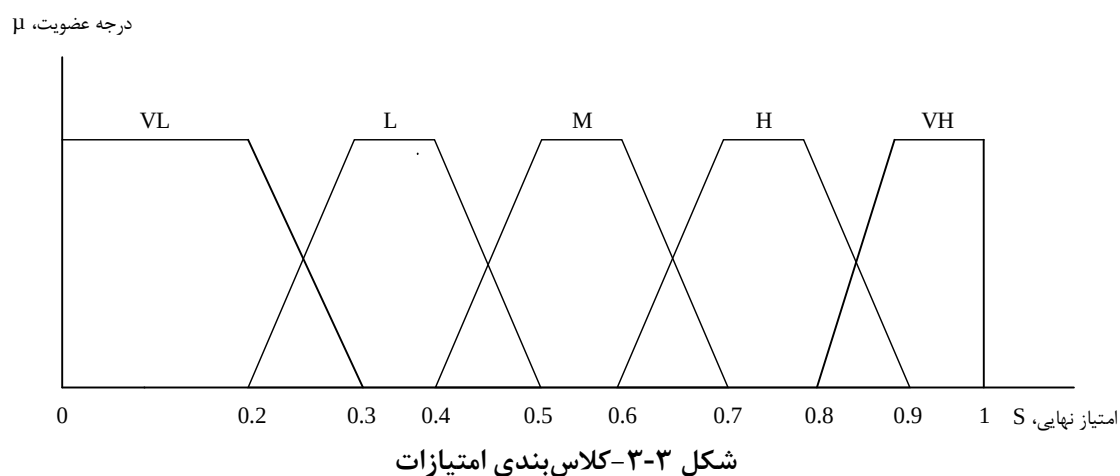
¹ Crisp possibilistic mean value

² Multi-Criteria Decision-Making Method (MCDM)

(MCDEM) و یا نسخه‌های فازی آن‌ها استفاده کرد. لازم به ذکر است که آن دسته از عواملی که تأثیرشان منفی است، می‌بایست از متمم امتیاز آن‌ها در محاسبات استفاده کرد. در نهایت، اندیس تاب‌آوری کل (TRI) با استفاده از رابطه ۳-۵ برآورد می‌شود. در این رابطه، W_{RC_i} و S_{RC_i} به ترتیب معرف امتیاز قطعی و ضریب وزنی i آمین مفهوم تاب‌آوری در سطح اول سلسله مراتب هستند.

$$TRI = \sum_{i=1}^4 W_{RC_i} S_{RC_i}, \quad 0 \leq TRI \leq 1 \quad (5-3)$$

به منظور طبقه‌بندی یا کلاس‌بندی امتیازات محاسبه شده برای عوامل در هر سطحی از سلسله مراتب، شکل ۳-۳ ارائه شده است. نماد هر کدام از کلاس‌ها تعریف شده (مجموعه‌های فازی) در جدول ۳-۲ معرفی شده است. برای تعیین کلاس امتیاز بدست آمده، ابتدا باید مقدار درجه عضویت (μ) امتیاز محاسبه شده در هر کدام از کلاس‌های تعریف شده در شکل ۳-۳، تعیین شوند. برای این منظور، می‌توان از روابط ۳-۶ الی ۳-۱۰ استفاده کرد. به عنوان مثال، $\mu_{VL}(S)$ معرف مقدار درجه عضویت امتیاز محاسبه شده (S) در کلاس "خیلی کم" است. پس از محاسبه درجات عضویت، بردار درجات عضویت امتیاز محاسبه شده در هر کدام از پنج کلاس به صورت رابطه ۳-۱۱ تشکیل می‌شود. در نهایت، طبق رابطه ۳-۱۲ کلاسی که امتیاز محاسبه شده بیشترین مقدار درجه عضویت را در آن داشته باشد، به عنوان کلاس نهایی انتخاب می‌شود.



جدول ۳-۲- معرفی عبارات زبانی هر کدام از کلاس‌ها

شماره کلاس	عبارت زبانی	نماد کلاس
۱	خیلی کم/ضعیف	VL
۲	کم/ضعیف	L
۳	متوسط	M
۴	خوب/زیاد	H
۵	خیلی خوب/زیاد	VH

$$\mu_{VL}(S) = \begin{cases} 1 & S \leq 0.2 \\ (0.3 - S)/(0.3 - 0.2) & 0.2 < S < 0.3 \\ 0 & S \geq 0.3 \end{cases} \quad (۳-۶)$$

$$\mu_L(S) = \begin{cases} 0 & S \leq 0.2 ; S \geq 0.5 \\ (S - 0.2)/(0.3 - 0.2) & 0.2 < S < 0.3 \\ 1 & 0.3 \leq S \leq 0.4 \\ (0.5 - S)/(0.5 - 0.4) & 0.4 < S < 0.5 \end{cases} \quad (۳-۷)$$

$$\mu_M(S) = \begin{cases} 0 & S \leq 0.4 ; S \geq 0.7 \\ (S - 0.4)/(0.5 - 0.4) & 0.4 < S < 0.5 \\ 1 & 0.5 \leq S \leq 0.6 \\ (0.7 - S)/(0.7 - 0.6) & 0.6 < S < 0.7 \end{cases} \quad (۳-۸)$$

$$\mu_H(S) = \begin{cases} 0 & S \leq 0.6 ; S \geq 0.9 \\ (S - 0.6)/(0.7 - 0.6) & 0.6 < S < 0.7 \\ 1 & 0.7 \leq S \leq 0.8 \\ (0.9 - S)/(0.9 - 0.8) & 0.8 < S < 0.9 \end{cases} \quad (۳-۹)$$

$$\mu_{VH}(S) = \begin{cases} 1 & S \geq 0.9 \\ (S - 0.8)/(0.9 - 0.8) & 0.8 < S < 0.9 \\ 0 & S \leq 0.8 \end{cases} \quad (۳-۱۰)$$

$$\mu(S) = [\mu_{VL}(S) \cdot \mu_L(S) \cdot \mu_M(S) \cdot \mu_H(S) \cdot \mu_{VH}(S)] \quad (۳-۱۱)$$

$$Class(S) = \max \{\mu_i(S)\} \quad (۳-۱۲)$$

در کنار توجه به مقدار بدست آمده برای اندیس تاب‌آوری کل که بیانگر وضعیت کلی سیستم از لحاظ تاب‌آوری است، باید به وضعیت عوامل تأثیرگذاری که باعث حاصل شدن آن شده‌اند نیز توجه داشت. گاهی اوقات، توجه محض به اندیس تاب‌آوری کل باعث می‌شود تا مدیران سیستم از اطلاعات مربوط به عواملی که در حال حاضر وضعیت مناسبی ندارند، غافل شوند. بنابراین، توجه به وضعیت فعلی

عوامل تأثیرگذار بر روی اندیس تاب‌آوری کل سیستم منجر به شناسایی نقاط قوت و ضعف تاب‌آوری سیستم در زمینه‌های فنی یا سازمانی خواهد شد. این مسأله به مدیران سیستم کمک می‌کند تا بخش‌هایی از آن که حساس‌تر بوده و نیاز به توجه بیشتری دارند را تشخیص دهند. از این رو، امکان اجرای ارزیابی‌های دقیق‌تر برای بخش‌های شناسایی شده و نیز اتخاذ استراتژی‌های بهبود دهنده فراهم خواهد شد. البته باید توجه داشت که اندیس تاب‌آوری کل نیز در برخی از موقعیت‌های خاص قابل استفاده است. به عنوان مثال، برخی از اوقات، مدیران ارشد سیستم نیازی به اطلاعات جزئی و دقیق ندارند و فقط ارائه یک اندیس واحد برای اطلاع آن‌ها کفایت می‌کند. همچنین، زمانی که مدیران به دنبال یک راه حل مؤثر هستند، استفاده از یک اندیس واحد به مقایسه نتایج حاصل از راه‌حل‌های مختلف کمک می‌کند. علاوه بر این، هنگام گزارش تأثیری که تغییرات اعمال شده در سیستم بر روی تاب‌آوری آن گذاشته‌اند (مانند اثر اصلاح سیستم PHM بر تاب‌آوری کل)، استفاده از اندیس واحد سودمند خواهد بود.

۳-۳- جمع‌بندی

تحلیل تاب‌آوری اولین و شاید مهمترین گام در مدیریت مؤثر تاب‌آوری سیستم‌های فنی است. اما مهمترین چالشی که در طی این گام پیش‌روی تحلیل‌گران قرار دارد، فقدان داده‌های از جنس تاب‌آوری است. زیرا اکثر سیستم‌های جمع‌آوری اطلاعات با هدف تحلیل تاب‌آوری طراحی نشده‌اند. عدم دسترسی به چنین اطلاعاتی باعث می‌شود تا تحلیل تاب‌آوری با استفاده از ابزارهای مرسوم غیر ممکن شود. بر همین اساس، در این فصل، به منظور غلبه بر چنین چالش‌هایی و نیز تسهیل روند تحلیل تاب‌آوری اندیس تاب‌آوری کل (TRI) ارائه شد. در اندیس تاب‌آوری کل به صورت هم‌زمان به مراحل آماده‌سازی و بازیابی سیستم توجه شده است. این اندیس برآمده از ساختاری سلسله مراتبی است که در سطح اول آن چهار مفهوم اساسی تاب‌آوری شامل اندیس‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، کارایی سیستم PHM و تاب‌آوری سازمان مالک سیستم قرار دارند. هر کدام از مفاهیم

مذکور متأثر از برخی شاخص‌های عمومی و عوامل تأثیرگذار در سطوح پایین‌تر سلسله مراتب بوده که دارای ضرایب اهمیت متفاوتی نیز هستند. در این فصل، شاخص‌های عمومی و برخی از عوامل تأثیرگذار بر روی آن‌ها معرفی شدند. همچنین اشاره شد که برخی از عوامل تأثیرگذار در سطوح پایین‌تر سلسله مراتب وابسته به نوع و وضعیت سیستم مورد مطالعه هستند و می‌بایست متناسب با آن برای تحلیل تاب‌آوری انتخاب شوند. همچنین، به‌منظور غلبه بر محدودیت دسترسی به اطلاعاتی از جنس تاب‌آوری، رویکردی مبتنی بر قضاوت کارشناسان برای تعیین وضعیت هر کدام از عوامل مؤثر که در پایین‌ترین سطح سلسله مراتب قرار دارند ارائه شد. برای برآورد اندیس تاب‌آوری کل، اندازه‌گیری‌های انجام شده در مورد وضعیت فعلی عوامل تأثیرگذار، از پایین‌ترین سطح به سمت سطوح بالاتر و با استفاده از روش میانگین وزنی ادغام می‌شوند. اندیس تاب‌آوری کل روشی کاربردی بوده و به سادگی منجر به شناسایی نقاط قوت و ضعف تاب‌آوری سیستم می‌شود که نقشه راهی برای تحلیل‌ها و اقدامات عمیق‌تر خواهند بود. زیرا در بیشتر مواقع، مدیران تمایل دارند تا در ابتدا با اجرای روشی مناسب و کاربردی، نقاط قوت و ضعف موجود در تاب‌آوری سیستم تحت کنترلشان را شناسایی کنند. باید توجه داشت که اندیس تاب‌آوری کل در موقعیت‌های خاصی قابل استفاده است. بنابراین، در کنار توجه به مقدار اندیس تاب‌آوری کل که بیانگر وضعیت کلی سیستم از لحاظ تاب‌آوری است، می‌بایست به وضعیت عواملی که منتج به آن شده‌اند نیز توجه ویژه‌ای داشت. گاهی اوقات، توجه محض به اندیس تاب‌آوری کل باعث می‌شود تا مدیران سیستم از اطلاعات مربوط به عواملی که در حال حاضر وضعیت مناسبی ندارند، غافل شوند.

فصل ۴: مطالعه موردی و جمع آوری اطلاعات

۴-۱- آشنایی

سیستم تهویه در معادن زیرزمینی از اجزای مختلفی تشکیل شده است. این سیستم با توجه به انواع شرایط زمین‌شناسی، نرخ تولید، قوانین و آیین‌نامه‌های معدن‌کاری دارای مدل‌های متفاوتی خواهد بود. با این حال، اجزای پایه در سیستم‌های تهویه معادن هنوز یکسان هستند (Cheng et al., 2014). در نتیجه، اجزای سیستم تهویه معادن شامل مجموعه بادبزن‌های اصلی^۱، بادبزن‌های کمکی^۲، شبکه تهویه^۳، تأسیسات تهویه^۴ (مانند درها، هوابندها، سدها، دریچه‌ها، پرده‌ها و پل تهویه)، تأسیسات پایش اتمسفر معدن^۵ (حس‌گرهای پایش غلظت گازها و گرد و غبار سمی و قابل انفجار) و تأسیسات پیش‌گیری از وقوع حوادث^۶ (مانند تأسیسات کنترل و زهکشی گاز متان) می‌شوند. در معادن زیرزمینی، به‌ویژه در معادن زغالسنگ، بادبزن اصلی حکم قلب تپنده را داشته و مهمترین زیرساختی است که وظیفه تأمین جریان هوای مورد نیاز برای فعالیت در کارگاه‌ها را به عهده دارد. در نتیجه، عملکرد مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن نقش مهمی در شکست و یا موفقیت سیستم تهویه خواهد

¹ Primary ventilation fan (Main fan)

² Auxiliary fans

³ Ventilation network

⁴ Ventilation facilities

⁵ Mine atmosphere monitoring facilities

⁶ Disaster prevention facilities

داشت. طبق مشاهدات میدانی صورت گرفته در حین بررسی مطالعه موردی رساله، مشخص شد که مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن شرایط حساس‌تری نسبت به سایر اجزای سیستم تهویه دارد. بنابراین، در این رساله، مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن برای به‌کارگیری مفهوم تاب‌آوری در حوزه معدن‌کاری انتخاب شده است. بر همین اساس، در این فصل، ابتدا مطالعه موردی در نظر گرفته شده برای پیاده‌سازی اندیس تاب‌آوری کل به‌صورت کامل معرفی می‌شود. سپس، نحوه جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز برای به‌کارگیری اندیس پیشنهادی و نتایج حاصل از آن ارائه می‌شوند.

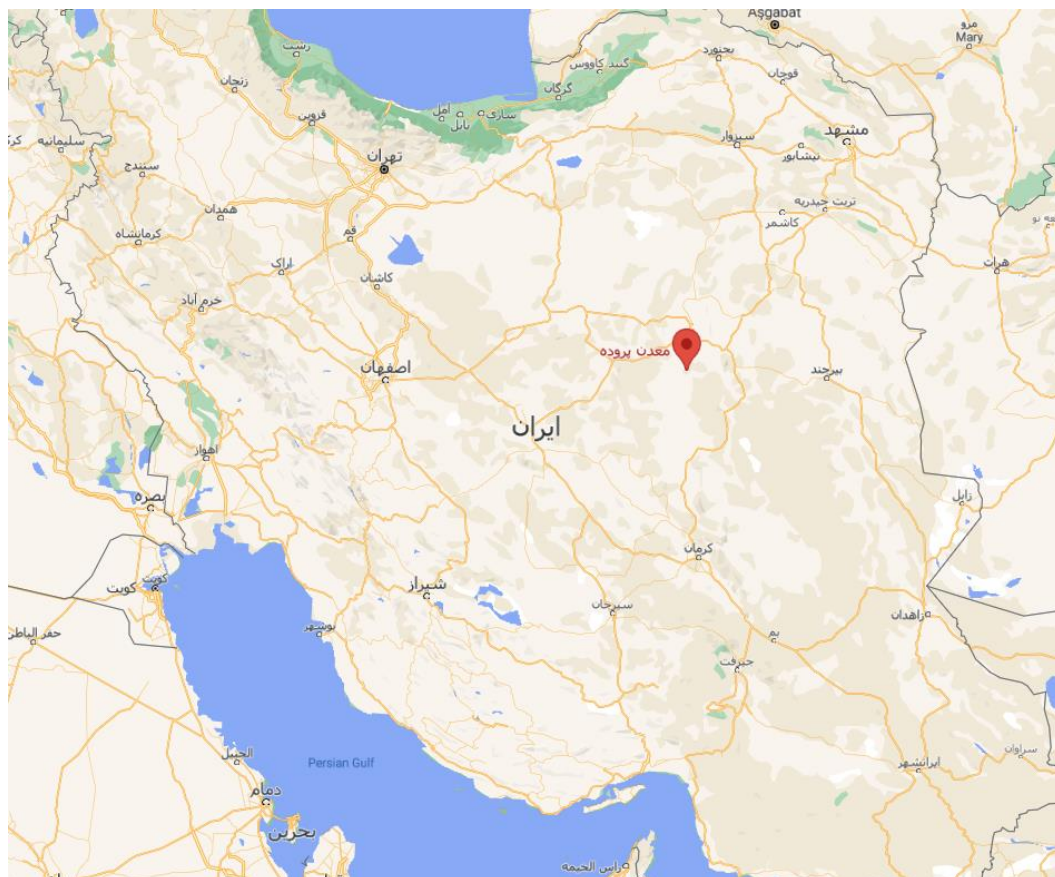
۴-۲- مطالعه موردی - مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس

حوضه زغال‌دار طبس با وسعتی بالغ بر ۳۰,۰۰۰ کیلومتر مربع و منبع اکتشافی ۲/۷۵ میلیارد تن زغالسنگ کک شو و حرارتی، غنی‌ترین و بزرگترین ناحیه زغالی ایران محسوب می‌شود. ناحیه پروده با وسعت ۱۲۰۰ کیلومتر مربع و منبع زمین‌شناسی ۱/۱ میلیارد تن زغالسنگ کک شو، یکی از چهار ناحیه حوضه زغالی طبس و بزرگ‌ترین حوضه زغالسنگ کک شو ایران محسوب می‌شود. علاوه بر این، معدن زغالسنگ پروده طبس مکانیزه‌ترین معدن زغالسنگ ایران است. ناحیه زغال‌دار پروده در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان طبس در محدوده عرض جغرافیایی $32^{\circ}50'$ تا $33^{\circ}05'$ و طول جغرافیایی $56^{\circ}45'$ تا $57^{\circ}15'$ قرار گرفته است. لایه زغال در این معدن از شرق به غرب گسترش یافته و ضخامت آن از ۰/۵ متر تا ۲/۲ متر (متوسط ۱/۸ متر) متغیر است. در معدن زغالسنگ پروده طبس، استخراج در معدن مرکزی (ذخایر کم عمق) با روش اتاق و پایه^۱ به‌صورت جبهه کار کوتاه و در معدن شماره یک (لایه‌های عمیق‌تر) با استفاده از روش جبهه کار طولانی^۲ انجام می‌شوند (Ebrahimabadi et al.,).

^۱ Room and Pillar method

^۲ Longwall method

(2015). در شکل ۴-۱ موقعیت جغرافیایی این محدوده و تصویری ماهواره‌ای از معدن زغالسنگ پروده طبس نشان داده شده است.



شکل ۴-۱- موقعیت جغرافیایی ناحیه زغال‌دار پروده طبس

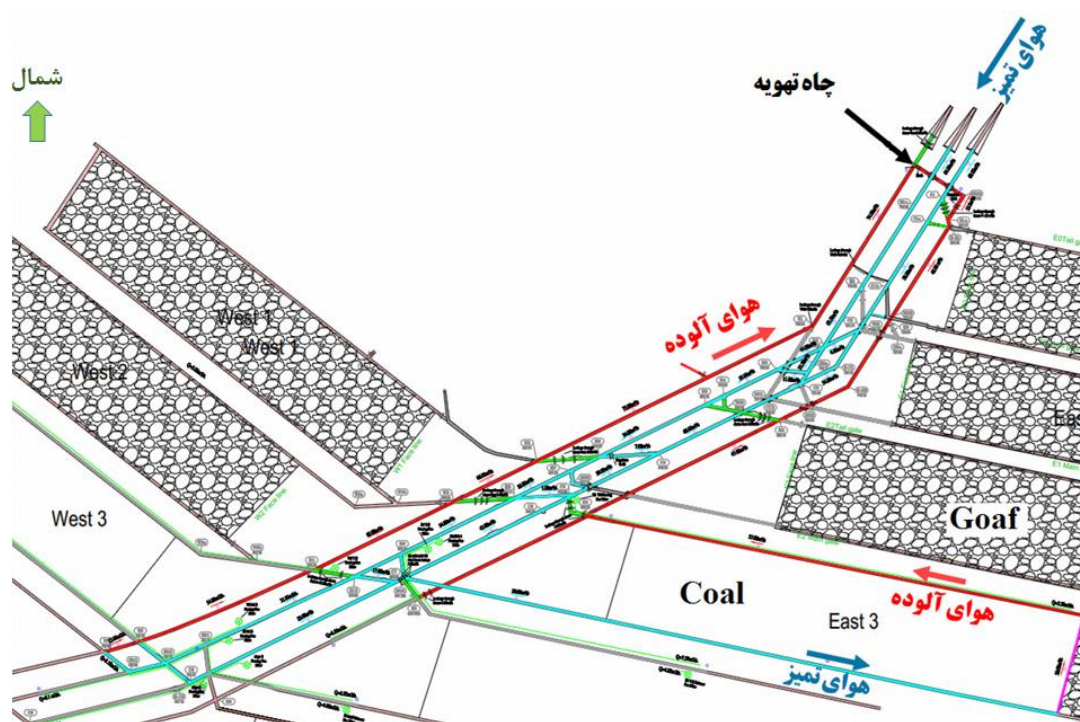
ناحیه زغال‌دار پروده جزء مناطق کویری با آب و هوای خشک محسوب می‌شود که نوسانات درجه حرارت شبانه روزی و ماهیانه آن زیاد می‌باشد. حداکثر درجه حرارت منطقه در فصل تابستان تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و در فصل زمستان و یخبندان تا مرز منفی ۵ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد. میزان بارندگی سالانه در این منطقه بین ۳۵ تا ۱۴۵ میلی‌متر است و در زمستان نیز هوا سرد و خشک می‌باشد. راه‌های ارتباطی طبس از طریق جاده‌های آسفالتی با پنج استان همجوار و نیز از طریق خط‌آهن ریلی و فرودگاه برقرار است.

۴-۲-۱- معرفی مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن

به‌منظور تهویه کارگاه‌های استخراج در معدن زغالسنگ پروده طبس از سیستم تهویه مکشی^۱ استفاده می‌شود. در این سیستم، بادبزن اصلی با ایجاد مکش باعث می‌شود تا فشار هوای درون معدن کمتر از فشار اتمسفر شود. بنابراین، هنگامی که بادبزن اصلی متوقف می‌شود، فشار هوای داخل معدن افزایش می‌یابد. این افزایش فشار باعث کند شدن انتشار گاز از قسمت تخریب و لایه‌های زغال می‌شود. سیستم مکشی اگر چه باعث افزایش ایمنی معدن می‌شود، به علت عبور ذرات و گازهای خورنده (مانند H_2S) منجر به صدمه دیدن پره‌های^۲ بادبزن نیز می‌شود. مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس در مکانی به‌نام جایگاه بادبزن^۳ (یا فن هوس) نصب شده است. نمایی از نحوه تهویه کارگاه‌های جبهه کار طولانی پسرو^۴ و موقعیت مکانی مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن به‌ترتیب در شکل ۴-۲ و شکل ۴-۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با شروع فعالیت مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن هوای ورودی^۵ تازه و تمیز از طریق تونل‌های ورودی^۶ وارد معدن شده و کارگاه‌های استخراج را با استفاده از روش مرکزی^۷ تهویه می‌کند. سپس هوای برگشتی^۸ آلوده از طریق چاه تهویه^۹ در فضای آزاد تخلیه می‌شود. لازم به ذکر است که در برخی از نقاط معدن، مانند سینه‌کارهای^{۱۰} در حال پیشروی، از بادبزن‌های دهشی کمکی^{۱۱} با توان‌های ۳۷، ۵۰ و ۹۰ کیلووات نیز استفاده می‌شود.

¹ Exhaust² Blades³ Fan House⁴ Retreating Longwall⁵ Intake air⁶ Downcasts⁷ Central⁸ Return air⁹ Upcast shaft¹⁰ Working faces¹¹ Auxiliary forcing fans

همان‌طور که در شکل ۴-۴ مشخص است، جایگاه بادبزن از سه عدد بانک تهویه^۱ که به‌صورت موازی^۲ در کنار هم نصب شده‌اند، تشکیل شده است. طبق شکل ۴-۴، جایگاه بادبزن به‌صورتی احداث شده است تا از بانک‌های تهویه در برابر تابش مستقیم نور خورشید و بارش باران محافظت شود. علاوه بر این، اجزای تشکیل دهنده بانک‌های تهویه دارای پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی هستند. هر کدام از بانک‌های تهویه شامل دو عدد بادبزن محوری^۳ هستند که به‌صورت سری به یکدیگر متصل شده و از نوع ZEL 1-24-630/6 می‌باشند. جایگاه بادبزن معدن از سال ۱۳۸۵ فعالیت خود را آغاز کرده و بانک تهویه شماره ۲ در سال ۱۳۹۷ تعمیرات اساسی^۴ شده است. همچنین، به‌طور معمول، یک عدد از بانک‌ها عمل تهویه معدن را انجام داده و دو بانک دیگر به‌عنوان سیستم‌های پشتیبان استفاده می‌شوند. مشخصات کلی بانک تهویه معدن در جدول ۴-۱ ارائه شده است.



شکل ۴-۲- نمایی از نحوه تهویه کارگاه جبهه کار طولانی پسر و در معدن زغالسنگ پروده طبس

¹ Ventilation Bank

² Parallel

³ Axial

⁴ Overhaul



شکل ۳-۴- موقعیت مکانی مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس



شکل ۴-۴- بانک‌های تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس

جدول ۴-۱- مشخصات کلی بانک تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس^۱

شماره	مشخصات	توضیح
۱	نوع بادبزن	ZEL 1-24-630/6
۲	تعداد بادبزن در هر بانک	۲ عدد
۳	سرعت نامی بادبزن‌ها	۹۹۴ دور بر دقیقه
۴	قطر دهانه ورود هوا	۲۴۰ سانتی‌متر
۵	قطر دهانه خروج هوا	۲۸۰ سانتی‌متر
۶	چگالی هوا	۱,۲ کیلوگرم بر متر مکعب

اجزای اصلی بادبزن‌های محوری در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اجزای اصلی بادبزن‌های محوری شامل موتور الکتریکی^۲، رولبرینگ^۳ سمت جلو (DE^۴) و بلبرینگ^۵ سمت عقب (NDE^۶)، چرخ دوار^۷ و پره‌ها می‌شود. موتور الکتریکی اصلی‌ترین بخش بادبزن به‌شمار آمده و باعث حرکت چرخ دوار و تولید جریان هوا می‌شود. همچنین، مشخصات فنی موتور الکتریکی بادبزن‌ها در جدول ۴-۲ ارائه شده است.

جدول ۴-۲- مشخصات فنی موتور الکتریکی بادبزن‌های محوری بانک تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس^۱

شماره	مشخصات	توضیح
۱	سازنده	Morley Electric Motors LTD.
۲	نوع	سه فاز تک دور
۳	سرعت نامی	۹۹۴ دور بر دقیقه
۴	توان نامی	۶۳۰ کیلو وات
۵	جریان نامی	۲۴ آمپر
۶	ولتاژ نامی	۶۹۰ ولت
۷	وزن	۵۰۰۰ کیلوگرم
۸	نوع رولبرینگ سمت جلو	NU 328 C3
۹	نوع بلبرینگ سمت عقب	6326 MC3
۱۰	عمر برینگ‌ها	۵۰۰۰۰ ساعت

^۱ برگرفته از گزارش اورهال بانک ۲ فن هوس شرکت زغالسنگ پروده طبس

^۲ Electromotor

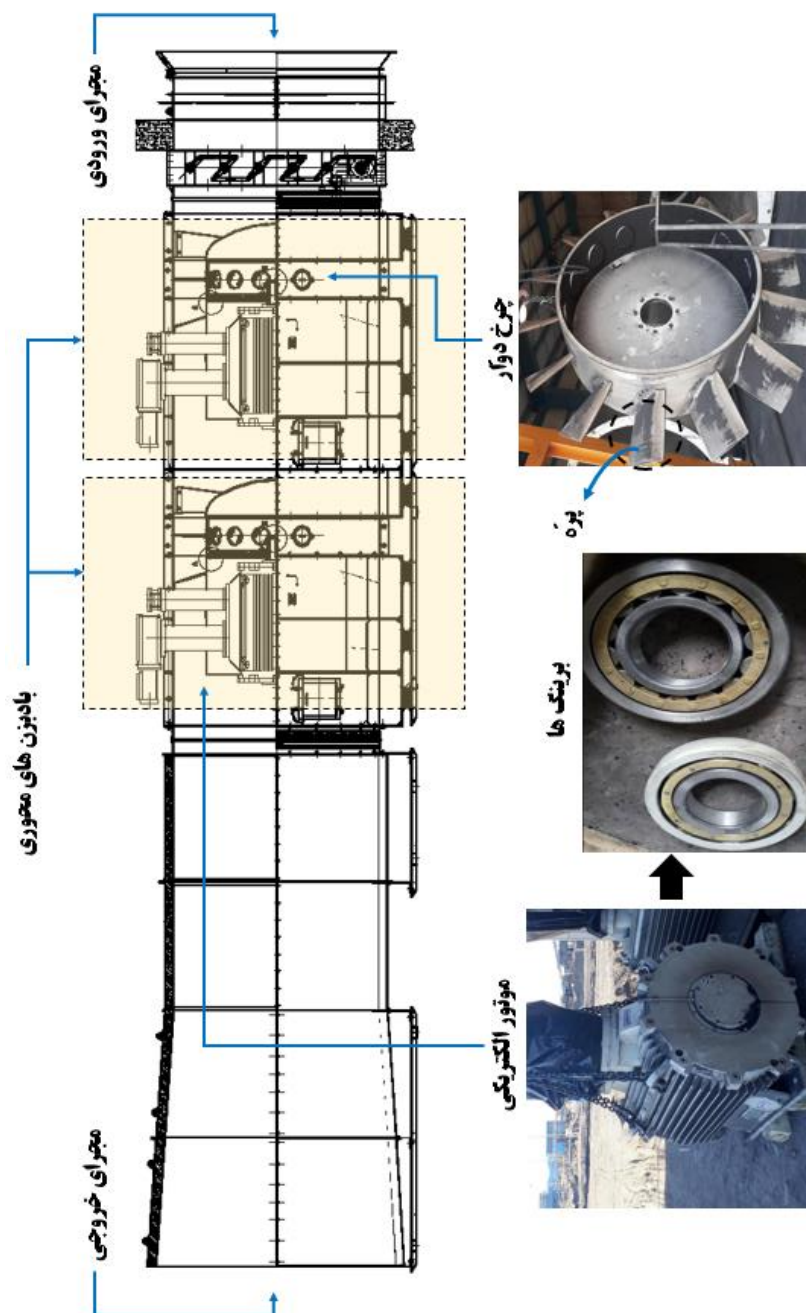
^۳ Roller bearing

^۴ Drive End (DE)

^۵ Ball bearing

^۶ Non-Drive End (NDE)

^۷ Impeller



شکل ۴-۵- نمایش شماتیک از اجزای تشکیل دهنده بانک تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس

برق مصرفی بادبزن اصلی از طریق پست ۶۶ کیلو ولت با جریان متناوب تأمین می‌شود. اما به‌منظور ایجاد سرعت‌های مختلف برای دوران بادبزن، ابتدا بخشی از جریان برق متناوب با استفاده از یکسو کننده^۱ به جریان مستقیم تبدیل می‌شود. سپس، جریان مستقیم ایجاد شده توسط معکوس کننده^۱

^۱ Rectifier

به جریان متناوبی تبدیل می‌شود که فرکانس، ولتاژ و توان آن به‌صورت دلخواه قابل تنظیم است. در نتیجه، دور موتور قابل کنترل شده و دوران بادبزن با سرعت‌های مختلف امکان‌پذیر می‌شود. از این رو، از منظر کنترل سرعت، یکسو کننده‌ها و معکوس کننده‌های بانک‌های تهویه اهمیت دارند. بایستی خاطر نشان کرد که در صورت قطع برق در معدن، امکان استفاده از سیستم برق اضطراری برای تأمین برق مورد نیاز بادبزن اصلی وجود دارد. در نتیجه، در صورت قطع جریان اصلی برق، مولد دیزلی اضطراری^۲ به‌عنوان منبع تغذیه وارد مدار می‌شود.

در موتور الکتریکی بادبزن، با اتصال ایستانه^۳ به منبع جریان برق، میدانی مغناطیسی ایجاد شده و این میدان محور^۴ را به چرخش در می‌آورد. امکان چرخش محور توسط برینگ‌ها فراهم می‌شود و در نهایت باعث دوران چرخ دوار و تولید جریان هوا می‌شود. در صورت فرسودگی برینگ‌ها، ارتعاشات شدیدی در بادبزن ایجاد می‌شود که عملاً فعالیت بادبزن در سرعت‌های بالا را غیرممکن می‌سازد. در نتیجه، پایش لرزش برینگ‌ها راهی مناسب برای نظارت بر سلامت آن‌هاست (حداکثر سرعت مجاز برای لرزش برینگ ۸ میلی‌متر بر ثانیه است). بر همین اساس، در معدن زغالسنگ پروده طبس، حسگرهای مختلفی برای پایش وضعیت اجزای مهم هر کدام از بانک‌های تهویه در نظر گرفته شده‌اند. لرزش و دمای برینگ‌های جلو و عقب، دمای سیم‌پیچ موتور و فشار هوای داخل پره‌ها با استفاده از حسگرهای نصب شده پایش شده و در فرم‌های گزارش روزانه بادبزن‌های اصلی معدن ثبت می‌شوند.

۴-۲-۲- بررسی تاریخچه فعالیت مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن

به‌منظور بررسی تاریخچه فعالیت مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس، اطلاعات مستخرج از فرم‌های گزارش روزانه مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن و گزارش‌های بخش نت (نگهداری

¹ Inverter

² Emergency diesel generator

³ Stator

⁴ Shaft

و تعمیرات) که مربوط به مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن بودند، با یکدیگر ادغام شده و در جدول ۳-۴ ارائه شدند. با توجه به نتایج، بانک تهویه شماره ۲ از تاریخ ۲۰ خرداد ماه ۱۳۸۵ شروع به کار کرده است. این بانک طی فعالیت خود یک مورد شکستن پرّه بادبزن و یک مورد خرابی یکسو کننده را تجربه کرده است. همچنین، دو مرتبه یکسو کننده‌های این بانک تعویض شده و دو مرتبه نیز با سایر بانک‌های تهویه جابه‌جا شده‌اند. زمانی که چنین جابه‌جایی‌هایی صورت می‌گیرد، عملاً یکی از بانک‌ها از شرایط آماده به کار خارج می‌شود. علاوه بر این، ارتعاشات بسیار زیاد ناشی از فرسودگی برینگ‌های بانک شماره ۲، باعث شده است تا تعمیرات اساسی این بانک توسط شرکت شیب شکن در تاریخ ۱۸ بهمن ماه ۱۳۹۶ آغاز شود. طی تعمیرات اساسی که تا تاریخ ۹ خرداد ماه ۱۳۹۷ به طول انجامید، برینگ‌های سفارش داده شده از خارج با نام تجاری ¹ SKF نیز جایگزین برینگ‌های فرسود شده‌اند. پس از اتمام تعمیرات اساسی، بانک شماره ۲ از تاریخ ۴ مرداد ماه ۱۳۹۷ به طور مجدد در مدار تهویه معدن قرار گرفته است. بانک تهویه شماره ۳ نیز از تاریخ ۱۰ دی ماه ۱۳۸۵ در مدار تهویه معدن قرار گرفته است. طبق اطلاعات بخش نت، این بانک مشکل یکسو کننده و معکوس کننده جریان برق داشته و مشابه با بانک شماره ۲، یکسو کننده‌های این بانک نیز دو مرتبه با سایر بانک‌های تهویه جابه‌جا شده است. همچنین، به علت فرسودگی برینگ‌ها، ارتعاشات این بانک نیز از حد مجاز بیشتر است. به همین دلیل، فعالیت بانک در سرعت‌های بالا محدود شده و حداکثر با سرعت ۴۵۰ دور بر دقیقه عمل تهویه را انجام می‌دهد.

بانک تهویه شماره ۱ نیز از تاریخ ۱۱ بهمن ماه ۱۳۸۷ آغاز به کار کرده است و در این بین دو مرتبه یکسو کننده آن با بانک‌های ۲ و ۳ جابه‌جا شده است. این بانک یک مرتبه نیز به دلیل خرابی یکسو کننده خاموش شده است. همچنین، یک مرتبه معکوس کننده جریان این بانک برای تعمیر به تهران

¹ Svenska Kullager Fabriken (SKF)

ارسال شده است. فعالیت این بانک به دلیل فرسودگی برینگ‌ها محدود به سرعت‌های پایین بوده و مشابه با بانک شماره ۳، حداکثر با سرعت ۴۵۰ دور بر دقیقه عمل تهویه را انجام می‌دهد.

پس از اتمام تعمیرات اساسی بانک شماره ۲، بانک‌های شماره ۱ و ۳ در تاریخ ۴ مرداد ماه ۱۳۹۷ خاموش شده و تهویه معدن بر عهده بانک شماره ۲ قرار گرفته است. حال اگر بانک شماره ۲ به هر دلیل از مدار تهویه خارج شود، برای تأمین هوای مورد نیاز معدن، بانک‌های شماره ۱ و ۳ می‌بایست به‌طور هم‌زمان شروع به کار کنند. همان‌طور که گفته شد، بانک‌های شماره ۱ و ۳ به دلیل مشکلات برینگ‌ها قادر به استفاده از حداکثر ظرفیت خود نیستند. اگرچه جابه‌جایی اجزای بانک‌های تهویه با یکدیگر و کم کردن سرعت چرخش بادبزن‌ها راهکارهای مؤثری برای انطباق با شرایط پیش آمده هستند، اما این‌گونه اقدامات جنبه موقتی داشته و باید به فکر راه‌حل‌های دائمی بود. در غیر این‌صورت، فرسودگی اجزای بانک‌های تهویه افزایش پیدا کرده و تداوم تهویه معدن بحرانی‌تر می‌شود.

طبق مطالب ذکر شده، مشکلات عمده مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس مربوط به برینگ‌ها و یکسو کننده‌های جریان می‌شود. علاوه بر این، تحریم‌ها و مستندسازی ضعیف وضعیت بانک‌های تهویه را نیز باید به مشکلات فوق افزود. زیرا طبق بررسی‌های انجام شده در محل معدن، بادبزن‌های محوری، موتورهای الکتریکی آن‌ها، اجزای مختلف موتورهای از جمله برینگ‌ها، پره‌های بادبزن و بخش‌های الکتریکی و کنترلی بادبزن‌ها همگی به علت تحریم‌ها دردسترس نیستند. همچنین طبق اظهارات خدمه بخش نت معدن، به علت وجود ضعف در گزارش‌دهی و نیز برخی ناهماهنگی‌ها بین بخش‌های تهویه و نت، ممکن است برخی از مسائل و مشکلات پیش آمده برای بادبزن‌های اصلی مستندسازی نشده باشند. به‌عنوان مثال، زمان دقیق وقوع خرابی‌های رخ داده در بادبزن‌های اصلی معدن مستند نشده‌اند. بر همین اساس، ضعف مستندسازی باعث می‌شود تا هر گونه تحلیل آماری بر روی اطلاعات جمع‌آوری شده از صحت و دقت کافی برخوردار نباشد.

جدول ۴-۳- تاریخچه فعالیت بانک‌های تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس

شماره بانک	موضوع	وضعیت بانک	تاریخ ثبت
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۸۵/۰۳/۲۰
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۸۵/۱۰/۱۰
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۸۵/۱۰/۱۰
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۸۶/۰۲/۰۵
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۸۶/۰۲/۰۵
۲	شکستن پرّه بادبزن	فعال	۱۳۸۶/۱۲/۲۰
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۸۷/۰۱/۱۱
۱	بانک شماره ۱ روشن شد	فعال	۱۳۸۷/۰۱/۱۱
۱	بانک شماره ۱ متوقف شد	خواب	۱۳۸۷/۰۲/۱۸
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۸۷/۰۲/۱۸
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۸۷/۰۸/۱۰
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۸۷/۰۸/۱۰
۱	شستشوی پرّه های بادبزن	خواب	۱۳۸۷/۱۰/۰۲
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۸۷/۱۰/۲۴
۱	بانک شماره ۱ روشن شد	فعال	۱۳۸۷/۱۰/۲۴
۳	یکسو کننده بانک مشکل دارد	خواب	۱۳۸۸/۰۵/۲۱
۳	جابه‌جایی معکوس کننده این بانک با بانک شماره ۲	خواب	۱۳۸۸/۰۹/۱۰
۱	بانک شماره ۱ متوقف شد	خواب	۱۳۸۸/۰۹/۲۴
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۸۸/۰۹/۲۴
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۸۸/۱۱/۱۰
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۸۸/۱۱/۱۰
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۸۸/۱۱/۳۰
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۸۸/۱۱/۳۰
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۸۹/۰۱/۱۰
۱	بانک شماره ۱ روشن شد	فعال	۱۳۸۹/۰۱/۱۰
۱	بانک شماره ۱ متوقف شد	خواب	۱۳۸۹/۰۱/۲۰
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۸۹/۰۱/۲۰
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۸۹/۰۱/۳۰
۱	بانک شماره ۱ روشن شد	فعال	۱۳۸۹/۰۱/۳۰
۱	بانک شماره ۱ متوقف شد	خواب	۱۳۸۹/۰۴/۰۱
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۸۹/۰۴/۰۱
۳	ارسال یکسو کننده به تهران برای تعمیر	خواب	۱۳۸۹/۰۴/۰۲
۱	ارسال معکوس کننده به تهران برای تعمیر	خواب	۱۳۸۹/۰۵/۰۱
۲	یکسو کننده بانک تعویض شد	فعال	۱۳۸۹/۰۵/۰۳

جدول ۴-۳- ادامه

شماره بانک	موضوع	وضعیت بانک	تاریخ ثبت
۲	یکسو کننده بانک تعویض شد	فعال	۱۳۸۹/۱۱/۱۱
۲	شستشوی پرّه ها	فعال	۱۳۸۹/۱۱/۲۰
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۸۹/۱۱/۳۰
۱	بانک شماره ۱ روشن شد	فعال	۱۳۸۹/۱۱/۳۰
۱	بانک مشکل صفحه نمایشگر دارد	فعال	۱۳۹۰/۰۱/۰۲
۱	بانک شماره ۱ متوقف شد	خواب	۱۳۹۰/۰۱/۱۵
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۹۰/۰۱/۱۵
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۹۰/۰۱/۳۰
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۹۰/۰۱/۳۰
۲	خراب شدن یکسو کننده جریان	فعال	۱۳۹۰/۰۲/۰۳
۱	جابه‌جایی یکسو کننده این بانک با بانک شماره ۲	خواب	۱۳۹۰/۰۳/۱۵
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۹۰/۰۹/۳۰
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۹۰/۰۹/۳۰
۲	جابه‌جایی یکسو کننده این بانک با بانک شماره ۳	خواب	۱۳۹۰/۱۰/۱۱
۱	شستشوی پرّه ها	خواب	۱۳۹۰/۱۰/۱۷
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۹۰/۱۰/۱۸
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۹۰/۱۰/۱۸
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۹۱/۰۲/۱۳
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۹۱/۰۲/۱۳
۳	جابه‌جایی یکسو کننده این بانک با بانک شماره ۱	فعال	۱۳۹۱/۰۳/۰۱
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۹۱/۰۷/۱۷
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۹۱/۰۷/۱۷
۳	جابه‌جایی یکسو کننده این بانک با بانک شماره ۱	خواب	۱۳۹۱/۱۱/۱۵
۲	تصحیح حسگرهای دبی و فشار	فعال	۱۳۹۱/۱۱/۱۸
۱	جابه‌جایی یکسو کننده این بانک با بانک شماره ۳	خواب	۱۳۹۱/۱۲/۱۵
۳	باز شدن صفحه نمایشگر	خواب	۱۳۹۲/۰۱/۱۹
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۹۲/۰۲/۰۲
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۹۲/۰۲/۰۲
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۹۲/۰۴/۱۶
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۹۲/۰۴/۱۶
۲	جابه‌جایی یکسو کننده این بانک با بانک شماره ۳	فعال	۱۳۹۲/۰۶/۱۰
۳	بانک مشکل حسگر لرزش و صفحه نمایشگر دارد	خواب	۱۳۹۳/۰۲/۰۱
۳	بانک مشکل یکسو کننده و معکوس کننده جریان دارد	خواب	۱۳۹۳/۰۵/۰۱
۱	شستشوی پرّه‌ها	خواب	۱۳۹۳/۰۵/۰۱

جدول ۴-۳- ادامه

شماره بانک	موضوع	وضعیت بانک	تاریخ ثبت
۳	برینگ‌های بانک مشکل دارند (لرزش زیاد)	خواب	۱۳۹۳/۰۶/۰۱
۱	دمپرهاى بانک کامل بسته نمى‌شوند	خواب	۱۳۹۴/۰۱/۰۱
۳	دمپرهاى بانک کامل بسته نمى‌شوند	خواب	۱۳۹۴/۰۱/۰۱
۱	برینگ‌های بانک باید تعویض شوند	خواب	۱۳۹۴/۰۱/۲۸
۱	موتور دمپرها روغن ریزی دارد	خواب	۱۳۹۴/۰۲/۰۱
۱	تصحیح حسگرهای دبی و فشار	خواب	۱۳۹۴/۰۲/۰۱
۳	موتور دمپرها روغن ریزی دارد	خواب	۱۳۹۴/۰۲/۰۱
۳	تصحیح حسگرهای دبی و فشار	خواب	۱۳۹۴/۰۲/۰۱
۳	تعویض فیوز	خواب	۱۳۹۴/۰۷/۲۵
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۹۴/۰۷/۲۷
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۹۴/۰۷/۲۷
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۹۵/۰۸/۱۲
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۹۵/۰۸/۱۲
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۹۵/۱۰/۱۲
۱	بانک شماره ۱ روشن شد	فعال	۱۳۹۵/۱۰/۱۲
۲	چک بالانس بادبزین	خواب	۱۳۹۵/۱۱/۰۵
۱	بانک شماره ۱ متوقف شد	خواب	۱۳۹۵/۱۱/۰۵
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۹۵/۱۱/۰۵
۱	چک بالانس بادبزین	خواب	۱۳۹۵/۱۱/۰۵
۲	چک بالانس بادبزین بانک	خواب	۱۳۹۵/۱۱/۰۵
۲	بانک شماره ۲ متوقف شد	خواب	۱۳۹۵/۱۱/۰۹
۱	بانک شماره ۱ روشن شد	فعال	۱۳۹۵/۱۱/۰۹
۱	بانک شماره ۱ متوقف شد	خواب	۱۳۹۵/۱۱/۲۰
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۹۵/۱۱/۲۰
۱	روغن کاری موتور بانک	خواب	۱۳۹۶/۰۳/۲۳
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۹۶/۰۳/۲۳
۱	بانک شماره ۱ روشن شد	فعال	۱۳۹۶/۰۳/۲۳
۳	روغن کاری موتور بانک	خواب	۱۳۹۶/۰۳/۲۳
۲	روغن کاری موتور بانک	خواب	۱۳۹۶/۰۳/۲۳
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۹۶/۰۴/۲۴
۲	تعمیرات اساسی بانک در شرکت شیب شکن	خواب	۱۳۹۶/۱۱/۱۸
۲	اتمام تعمیرات اساسی و بازگشت به جایگاه بادبزین	خواب	۱۳۹۷/۰۳/۰۹
۱	بانک شماره ۱ متوقف شد	خواب	۱۳۹۷/۰۴/۱۱
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۹۷/۰۴/۱۱

جدول ۴-۳- ادامه

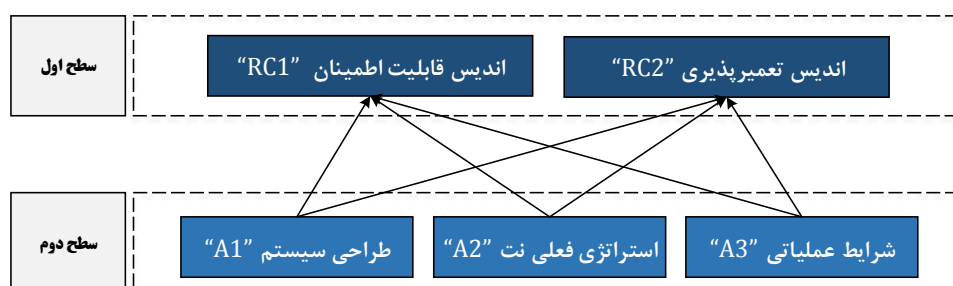
شماره بانک	موضوع	وضعیت بانک	تاریخ ثبت
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۹۷/۰۴/۱۱
۲	خرابی یکسو کننده جریان	فعال	۱۳۹۷/۰۴/۲۵
۱	بانک شماره ۱ روشن شد	فعال	۱۳۹۷/۰۴/۲۵
۳	بانک شماره ۳ روشن شد	فعال	۱۳۹۷/۰۴/۲۵
۱	بانک شماره ۱ متوقف شد	خواب	۱۳۹۷/۰۵/۰۴
۳	بانک شماره ۳ متوقف شد	خواب	۱۳۹۷/۰۵/۰۴
۲	بانک شماره ۲ روشن شد	فعال	۱۳۹۷/۰۵/۰۴

۴-۳- جمع‌آوری اطلاعات لازم برای تحلیل تاب‌آوری مجموعه بادبزن‌های اصلی

همان‌طور که در روش‌شناسی تحقیق عنوان شد، طبق شکل ۳-۱، برای محاسبه اندیس تاب‌آوری کل ابتدا باید امتیازات عوامل مؤثر بر روی هر کدام از چهار مفهوم تاب‌آوری که در سطح k ام سلسله مراتب قرار دارند با استفاده از رویکرد مبتنی بر قضاوت کارشناسان تعیین شوند. در نتیجه، ابتدا نیاز است تا برخی از عوامل تأثیرگذار بالقوه‌ای که متناسب با سیستم تحت بررسی هستند، تعیین شوند.

۴-۳-۱- شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

همان‌طور که در فصل سوم بیان شد، اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری متأثر از شاخص‌های عمومی شامل طراحی سیستم، استراتژی فعلی نت و شرایط عملیاتی می‌باشند (شکل ۴-۶). در ادامه، برخی از عواملی که بر روی شاخص‌های مذکور تأثیر می‌گذارند، متناسب با مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس تعیین می‌شوند.



شکل ۴-۶- شاخص‌های عمومی مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

الف) عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص طراحی سیستم مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

در فصل سوم مشخص شد که ظرفیت‌های جذب، انطباق و مرمت بر روی شاخص طراحی سیستم تأثیر می‌گذارند. در ادامه، برخی از عواملی که با استفاده از آن‌ها ارزیابی وضعیت ظرفیت‌های جذب، انطباق و مرمت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن امکان‌پذیر خواهد بود، به شرح زیر ارائه شده‌اند:

• شناسایی عوامل مؤثر بر روی ظرفیت جذب مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

دما یا لرزش باعث می‌شود تا از افزایش دمای سیم پیچ موتور الکتریکی بادبزنی و یا فرسودگی برینگ‌های آن مطلع شده و از بروز خسارات بیشتر جلوگیری کرد. امکانات حافظتی استفاده شده برای مراقبت امکانات پایش سیستم^۱، امکانات حفاظت از سیستم^۲، ارتباطات و هماهنگی^۳، سیستم‌های پشتیبان (افزونگی) و نیز پرسنل ماهر^۴ از جمله عوامل بالقوه‌ای هستند که می‌توان از آن‌ها به عنوان عوامل تأثیرگذار بر روی ظرفیت جذب مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طیس استفاده کرد (Hosseini and Barker, 2016; Sarwar et al., 2018; Rehak et al., 2019; Wang et al., 2019c). این عوامل باعث افزایش مقاومت سیستم در برابر اختلالات می‌شوند. هرچه به کارگیری امکانات پایش وضعیت سیستم (مانند حسگرهای لرزش) و امکانات حفاظت از آن (مانند استفاده از پوشش‌های ضد خوردگی بر روی پرّه‌ها و یا روغن کاری اجزای موتورهای الکتریکی) مؤثرتر باشند، ظرفیت جذب سیستم نیز بیشتر خواهد بود. ارتباط و هماهنگی مناسب بین بخش‌های تهویه و نت باعث افزایش سرعت عمل و کاهش تأثیر اختلالات خواهد شد. به عنوان مثال، در صورت وجود هماهنگی مناسب بین بخش تهویه و بخش نت، موارد پیش آمده برای بادبزنی‌های اصلی به موقع به بخش نت اطلاع داده شده و با برطرف شدن سریع مشکل از بروز خسارات بیشتر جلوگیری به عمل می‌آید. وضعیت مناسب سیستم‌های پشتیبان مانند مولد برق اضطراری و بانک‌های تهویه موازی آماده

¹ System monitoring facilities

² System protection facilities

³ Communication and coordination

⁴ Skilled laborers

به کار نیز برای مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن ظرفیت جذب ایجاد می‌کند. بایستی توجه داشت که سیستم‌های پشتیبانی که آماده کار نباشند، نقشی در ظرفیت جذب سیستم نخواهند داشت. همچنین، عامل پرسنل ماهر به میزان به‌کارگیری اپراتور و خدمه‌ای که مهارت لازم برای کار با بادبزنهاى اصلی معدن را دارند، اشاره می‌کند.

• شناسایی عوامل مؤثر بر روی ظرفیت انطباق مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن

ظرفیت انطباق شامل اقدامات موقتی و کم هزینه می‌شود. براساس مشاهدات میدانی، در بحث مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس، کاهش دور موتور بادبزنها به دلیل فرسودگی برینگ الکتورموتورها و جابه‌جایی یکسوکونده بادبزنها با یکدیگر از جمله اقدامات موقتی اتخاذ شده برای سازگاری سیستم با شرایط موجود به حساب می‌آیند. کارایی مناسب چنین اقداماتی نشان دهنده ظرفیت انطباق و سازگاری قابل قبول بادبزنهاى اصلی معدن در شرایط اضطراری است. در نتیجه، اصلاحات موقتی مؤثر^۱ به‌عنوان عاملی برای ارزیابی ظرفیت انطباق سیستم در نظر گرفته شده است.

• شناسایی عوامل مؤثر بر روی ظرفیت مرمت مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن

طبق مشاهدات میدانی، ظرفیت مرمت مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس تحت تأثیر میزان دسترسی به منابع مالی و برنامه تدارکات و پشتیبانی از سیستم می‌باشد. در نتیجه، بودجه^۲ و قابلیت پشتیبانی سیستم از جمله عوامل بالقوه‌ای هستند که می‌توان از آنها به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر روی ظرفیت مرمت مجموعه بادبزنهاى اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس استفاده کرد (Tortorella, 2015; Hosseini and Barker, 2016; Sarwar et al., 2018; Rehak et al., 2019; Hossain et al., 2019a). زیرا ظرفیت مرمت اقداماتی را شامل می‌شود که ماهیتی دائمی داشته و در نتیجه به منابع (مالی، تجهیزات، قطعات و نیروی انسانی) بسیار بیشتری نسبت به اقدامات

¹ Effective temporary fixings

² Budget

موقتی نیاز دارند. پیش‌بینی بودجه کافی برای اجرای تعمیرات و یا تأمین به‌موقع قطعات مورد نیاز بادبزنی اصلی همچون برینگ‌ها، باعث ارتقای ظرفیت مرمت سیستم می‌شوند. همچنین، پشتیبانی مناسب از بادبزنی اصلی، به‌ویژه از منظر تدارکات قطعات یدکی، باعث ارتقای این ظرفیت می‌شوند. عوامل موثر نهایی شناسایی شده برای شاخص طراحی سیستم در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.

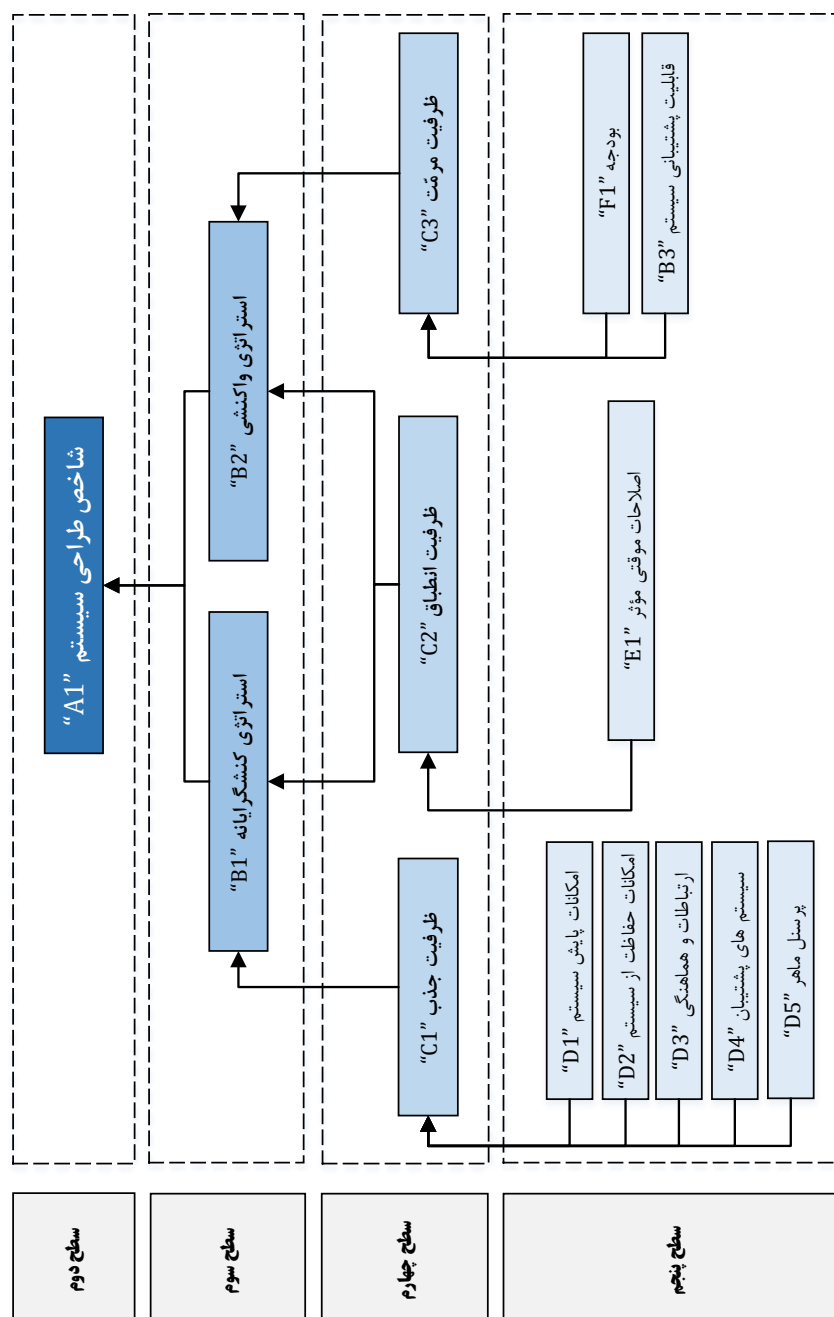
ب) عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص استراتژی فعلی نت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

در فصل سوم مشخص شد که پشتیبانی از سیستم عاملی است که به‌طور کلی بر روی کیفیت استراتژی نت سیستم تأثیر می‌گذارد. اما علاوه بر پشتیبانی مناسب، عوامل دیگری نیز بر روی کیفیت این شاخص تأثیرگذار هستند که وابسته به نوع استراتژی اتخاذ شده برای نت سیستم می‌باشند. در معدن زغالسنگ پروده طبس، استراتژی فعلی نت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن از نوع نت پیشگیرانه^۱ (PM) است. در میان استراتژی‌های نت موجود، نت پیشگیرانه که به آن نت مبتنی بر زمان نیز گفته می‌شود، یکی از اولین استراتژی‌های نت بوده و در حال حاضر به‌عنوان استراتژی مؤثر و پر کاربرد در حوزه نت شناخته می‌شود (Deighton, 2016). در نتیجه، با توجه به نوع نت، یکی از دیگر عواملی که بر روی کیفیت استراتژی فعلی نت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن تأثیرگذار خواهد بود، اجرای منظم بازرسی‌های دوره‌ای از سیستم می‌باشد. از این رو، بازرسی منظم^۲ مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن در قالب برنامه‌های دوره‌ای نت به‌همراه قابلیت پشتیبانی سیستم، به‌عنوان عوامل مؤثر بر شاخص استراتژی فعلی نت سیستم در نظر گرفته شده‌اند.

همان‌طور که بیان شد، پشتیبانی از سیستم نیز متأثر از پشتیبانی‌های کنش‌پذیر و کنش‌گر می‌باشد. برخی از عوامل مؤثر بر روی پشتیبانی کنش‌پذیر و کنش‌گر بادبزنی‌های اصلی معدن به‌شرح زیر هستند:

^۱ Preventive Maintenance (PM)

^۲ Regular inspection



شکل ۴-۷- عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص طراحی مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس

• عوامل تأثیرگذار بر روی پشتیبانی کنش‌پذیر مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن

وضعیت تدارکات قطعات یدکی، وضعیت امکانات نت^۱ (مانند ابزارآلات و روان کننده^۲) و ارگونومی

^۱ Maintenance facilities

^۲ Lubricant

طراحی، چیدمان و تجهیزات محل کار^۱ به‌عنوان عوامل مؤثر بر پشتیبانی کنش‌پذیر مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس در نظر گرفته شده‌اند (Ghodrati, 2005; Ghodrati et al., 2010; Tortorella, 2015). بایستی توجه داشت که در طراحی مبتنی بر ارگونومی، ظرفیت‌ها و توانمندی‌های انسان بررسی شده و اطلاعات به‌دست آمده در طراحی محیط‌های کار و تجهیزات استفاده می‌شوند. به‌عنوان مثال، تأمین نور کافی در محیط کار از جمله مسائلی است که در طراحی مبتنی بر ارگونومی مدنظر قرار می‌گیرد (Das and Sengupta, 1996; Cimino et al., 2009).

تدارکات مناسب قطعات یدکی برای اجزای مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن متأثر از عواملی همچون وضعیت شناسایی قطعات یدکی^۲، وضعیت مدیریت قطعات یدکی^۳ و وضعیت انبارداری قطعات یدکی^۴ می‌باشد. شناسایی قطعات یدکی مورد نیاز سیستم با استفاده از داده‌های موجود یا پیشنهاد سازنده سیستم باعث می‌شود تا اجزایی که نیاز به قطعات یدکی دارند، مشخص شوند. انبارداری قطعات یدکی با استفاده از برنامه‌ریزی قطعات یدکی و کنترل موجودی انبار امکان دسترسی همیشگی به قطعات را فراهم کرده و از تأخیرهای ایجاد شده به دلیل نبود قطعات مورد نیاز جلوگیری می‌کند. همچنین، برنامه مؤثر مدیریت قطعات یدکی منجر به تضمین وجود حداقل یک فقره از همه قطعات ضروری می‌شود (Smith and Schaefer, 1985; Ghodrati, 2005; Ghodrati et al., 2010; Diallo et al., 2012).

• عوامل تأثیرگذار بر روی پشتیبانی کنش‌گر مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

نیروی کار موجود^۵ (به‌ویژه تعمیرکار حرفه‌ای)، تشخیص صحیح علت خرابی^۱، هماهنگی سریع و مطمئن تقاضای قطعات یدکی^۲، اختصاص دستورالعمل صحیح تعمیر یا تعویض^۳، سرعت انتقال

^۱ Ergonomics of the workstation design, layout and facilities

^۲ Spare parts identification status

^۳ Spare parts management status

^۴ Spare parts inventory status

^۵ Available workforce

قطعات یدکی^۴ و نیز محدودیت‌های سیستم^۵ به‌عنوان عواملی در نظر گرفته شدند که بر روی قابلیت پشتیبانی کنش‌گر بادبزنی‌های اصلی معدن تأثیرگذار هستند (Ghodrati, 2005; Tortorella, 2015; Hosseini and Barker, 2016; Sarwar et al., 2018). در بحث محدودیت‌های سیستم، حجم دانش، تجهیزات و قطعات تحریم شده^۶ و کمیاب^۷ نیز به‌عنوان عوامل تأثیرگذاری که ارزیابی وضعیت عامل محدودیت‌های سیستم را فراهم می‌کنند، در نظر گرفته شدند ("محدودیت‌های سیستم" عاملی منفی به‌حساب می‌آید). عوامل نهایی تأثیرگذار بر روی شاخص استراتژی فعلی نت سیستم در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.

ج) عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص شرایط عملیاتی مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

همان‌طور که در فصل گذشته بیان شد، به‌طور کلی، شاخص عمومی شرایط عملیاتی متأثر از آموزش کافی پرسنل، مدیریت مؤثر سیستم و به‌کارگیری سیستم تحت شرایط استاندارد می‌باشد. در این بخش، عوامل مؤثر بر روی آموزش، مدیریت و استانداردسازی سیستم به‌صورت زیر تعیین شده‌اند:

• عوامل تأثیرگذار بر روی آموزش پرسنل مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

عامل آموزش سطح کیفی پرسنل را نشان می‌دهد. برگزاری برنامه‌ها و دوره‌های آموزشی مناسب برای پرسنل، تهیه ابزارهای آموزشی برای آن‌ها مانند کتابچه‌های راهنمای تجهیزات، ایجاد بسترهای مناسب برای حفظ و انتقال تجارب و آموخته‌های پرسنل کهنه‌کار به افراد تازه‌کار و نیز ارتقای توانایی پرسنل برای کار با سیستم مورد نظر در شرایط اضطراری به‌عنوان عواملی در نظر گرفته شدند که بر روی آموزش کافی پرسنل مرتبط با بادبزنی‌های اصلی معدن مربوطه تأثیرگذار هستند. بنابراین،

¹ Diagnosing the correct failure cause

² Fast and secure coordination of the demand for spare parts

³ Assign the correct repair or replacement instruction

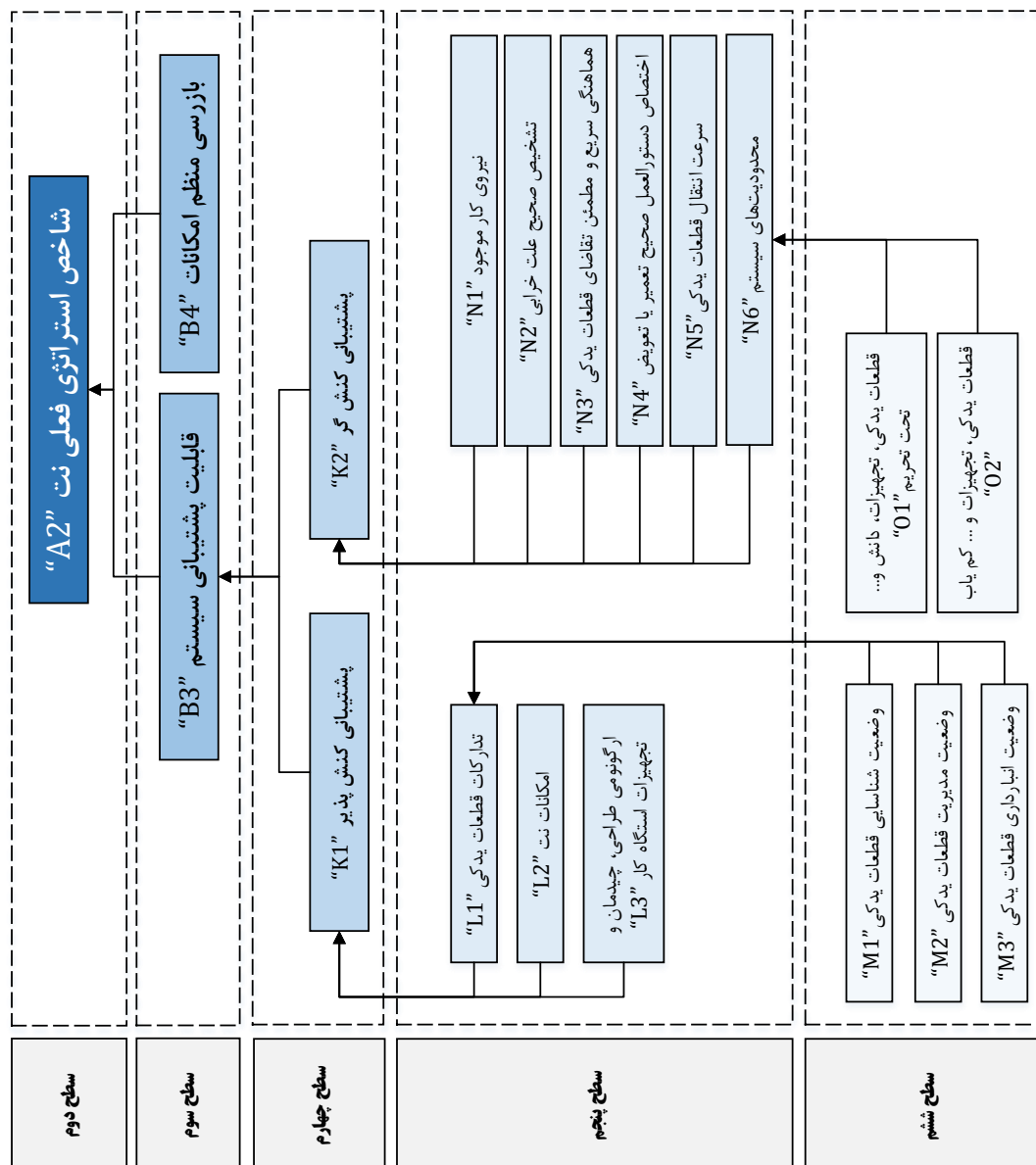
⁴ Spare parts transportation speed

⁵ System constraints

⁶ Embargoed materials, spare parts and science

⁷ Rare materials, spare parts and science

تمرینات مناسب^۱، ابزارهای آموزشی^۲، آموخته‌ها^۳ و صلاحیت پرسنل^۴ به‌عنوان عوامل تأثیرگذاری در نظر گرفته شدند که با استفاده از آن‌ها امکان ارزیابی وضعیت عامل آموزش فراهم می‌شود (Sarwar et al., 2018).



شکل ۴-۸- عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص استراتژی فعلی نت مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس

¹ Good practices

² Training tool-kits

³ Lessons learned

⁴ Staff Competence

منظور از تمرینات مناسب، آن دسته از تمریناتی هستند که در ارتقا و حفظ عملکرد پرسنل مؤثر هستند. اجرای این تمرینات پرسنل را قادر می‌سازد تا مهارت فنی لازم برای اجرای وظایف محوله را کسب کنند. حفظ و انتقال تجارب و آموخته‌ها به‌ویژه در مورد حوادثی که در گذشته برای سیستم رخ داده‌اند، نشان دهنده اهمیت مدیریت دانش^۱ در سازمان است. همچنین، صلاحیت داشتن پرسنل برای انجام وظایف محوله یکی از موارد دیگریست که نشان دهنده کافی بودن بحث آموزش است. زیرا ممکن است فرد مهارت لازم برای اجرای وظایف را داشته باشد، اما در شرایط اضطراری هنگامی که در خط مقدم حادثه قرار دارد، توانایی ارائه عملکرد مناسب با شرایط پیش آمده باشد را نداشته باشد.

• عوامل تأثیرگذار بر روی مدیریت مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن

طبق بررسی‌ها صورت گرفته، جلوگیری از افزایش فشار کاری و خستگی پرسنل، ایجاد انگیزه در میان آن‌ها، فرهنگ‌سازی برای رعایت اصول ایمنی در میان پرسنل، توانایی مدیران در تصمیم‌گیری به موقع و صحیح در مواقع اضطراری، توانایی اجرای مؤثر تصمیمات اتخاذ شده و پرداخت منظم و عادلانه حقوق پرسنل از جمله عواملی هستند که نشان دهنده مدیریتی مؤثر هستند. از آنجا که خستگی پرسنل باعث کاهش دقت و ایمنی آنان در حین کار می‌شود، مدیریت باید به شکلی برنامه کاری آن‌ها را طرح‌ریزی کند که از بروز خستگی بیش از حد جلوگیری شود. ایجاد انگیزه در بین پرسنل (مانند قدردانی از تلاش‌های آنان) باعث می‌شود تا آنان در شرایط اضطراری تمام تلاش خود را برای رفع مشکل به کار گیرند. همچنین، مدیریت باید پرسنل را نسبت به اجرای مسائل ایمنی تشویق کند. نیروی کاری که از لحاظ فرهنگ ایمنی ضعیف باشد، کل سیستم را با خطر مواجه می‌سازد. همچنین، به هنگام وقوع حوادث، صحت و سرعت تصمیم‌گیری توسط مدیریت سیستم، تأثیر زیادی بر روی کیفیت و کمیت فرآیند بازیابی سیستم می‌گذارد. با این حال، نکته‌ای که باید به آن توجه کرد

¹ Knowledge management

این است که توانایی مدیریت در اجرای تصمیمات اتخاذ شده نیز اهمیت دارد. در برخی مواقع، اگرچه تصمیمات صحیحی گرفته می‌شوند، ممکن است قدرت اجرای آن‌ها از لحاظ مالی و فنی وجود نداشته باشد. علاوه بر این، پرداخت منظم و عادلانه حقوق پرسنل آرامش فکری برای آنان ایجاد می‌کند. به‌عنوان مثال، اپراتوری که حقوق معوقه دارد، به‌طور حتم دچار سردرگمی و اضطراب فکری می‌شود. چنین شرایطی بر روی میزان مراقبت و توجه او در حین انجام وظایف تأثیر منفی می‌گذارد. طبق آنچه گفته شد، جلوگیری از خستگی پرسنل^۱، ارتقای فرهنگ ایمنی^۲، انگیزش^۳، تصمیم‌گیری صحیح و به‌موقع^۴، توانایی اجرای تصمیمات^۵ و پرداخت به‌موقع و کافی حقوق پرسنل^۶ به‌عنوان عواملی برای ارزیابی وضعیت عامل مدیریت در نظر گرفته می‌شوند. لازم به ذکر است که برگزاری جلسات مرتبط با ایمنی به صورت مؤثر (دوره‌های آموزشی، سمینار و ...) که در آن‌ها با بیانی ساده و واضح در مورد مسائل ایمنی صحبت شود، تأثیر مثبتی بر روی ارتقای فرهنگ ایمنی پرسنل خواهد داشت. علاوه بر این، برگزاری منظم چنین دوره‌هایی نیز از اهمیت بسیار زیادی در ارتقای فرهنگ ایمنی برخوردار است.

• عوامل تأثیرگذار بر روی استانداردسازی سیستم مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

استانداردسازی سیستم کمک می‌کند تا سیستم تحت روش‌های استاندارد به کار گرفته شود. در بحث استانداردسازی، عدم پیچیدگی و سادگی رویه‌های موجود (به‌عنوان مثال، برای بازرسی اجزای بادبزنی اصلی، تعمیر یا تعویض قطعات معیوب آن)، کالیبراسیون منظم تجهیزات (به ویژه حسگرهای مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن) و مدون کردن اطلاعات و داده‌های مرتبط با مجموعه بادبزنی‌های اصلی

¹ Prevent staff fatigue

² Promote safety culture

³ Motivation

⁴ On-time and correct decision-making

⁵ Decision accomplishment capability

⁶ On-time and adequate salary payment

معدن بسیار اهمیت دارند. بنابراین، رویه‌های ساده^۱، برنامه کالیبراسیون تجهیزات^۲ و مستندسازی اطلاعات^۳ به عنوان عوامل مؤثر برای ارزیابی وضعیت استانداردسازی سیستم مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت، عوامل تأثیرگذار شناسایی شده برای شاخص شرایط عملیاتی سیستم در شکل ۴-۹ نشان داده شده است.

۴-۳-۲- شناسایی عوامل تأثیرگذار بر روی اندیس تاب‌آوری سازمانی

همان‌طور که در فصل سوم گفته شد، اندیس تاب‌آوری سازمانی متأثر از شاخص‌های عمومی شامل احساس مالکیت، ابتکار عمل، خلاقیت و انعطاف‌پذیری است. در مورد شاخص احساس مالکیت، طبق بررسی‌های صورت گرفته، اهدا پاداش و ترفیع^۴ به پرسنل پرتلاش، جو حاکم بر سازمان^۵، احترام گذاشتن^۶ به پرسنل و به رسمیت شناختن^۷ آن‌ها (مانند درگیر کردن آنان در فعالیت‌ها) عوامل بالقوه‌ای هستند که بر روی انگیزش پرسنل معدن تأثیر می‌گذارند. در مورد شاخص انعطاف‌پذیری نیز تمرینات مناسب، ابزارهای آموزشی، آموخته‌ها و صلاحیت پرسنل به عنوان عوامل تأثیرگذار بر عامل آموزش در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، عدم وابستگی به هنجارها^۸ و وجود تنوع^۹ فکری، جنسیتی، تحصیلاتی و ... از جمله عواملی هستند که بر روی فرهنگ یک سازمان و به تبع انعطاف‌پذیری آن تأثیر مثبت می‌گذارند. سازمان‌ها در برخورد با حوادث باید قادر باشند تا از راهکارهای جدید و تا حدی مغایر با هنجارهای معمول خود استفاده کنند (Lengnick-Hall et al., 2011). عوامل نهایی مؤثر بر

¹ Simple procedure

² Equipment calibration schedule

³ Documentation

⁴ Rewards

⁵ Organization atmosphere

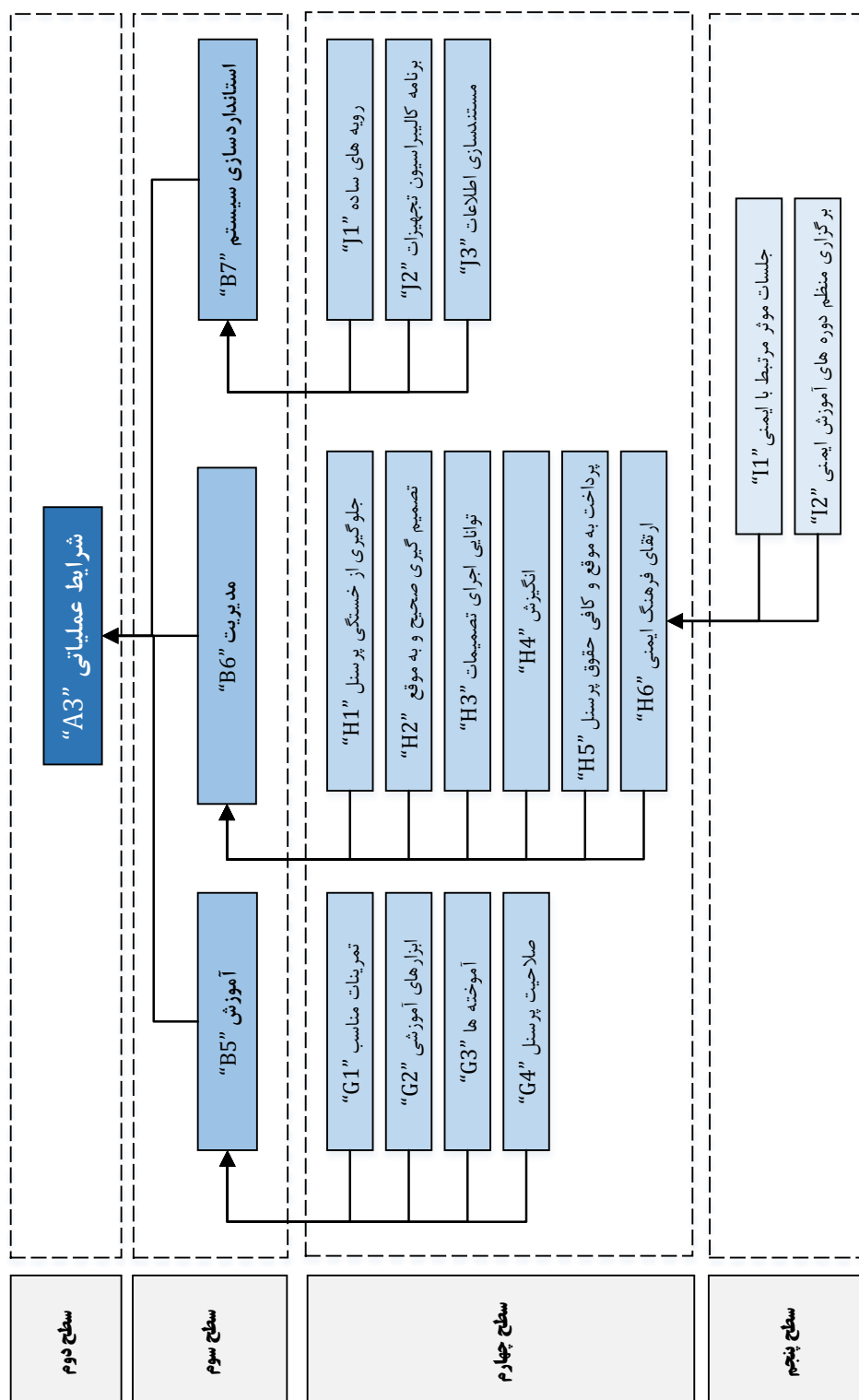
⁶ Showing respect

⁷ Recognition

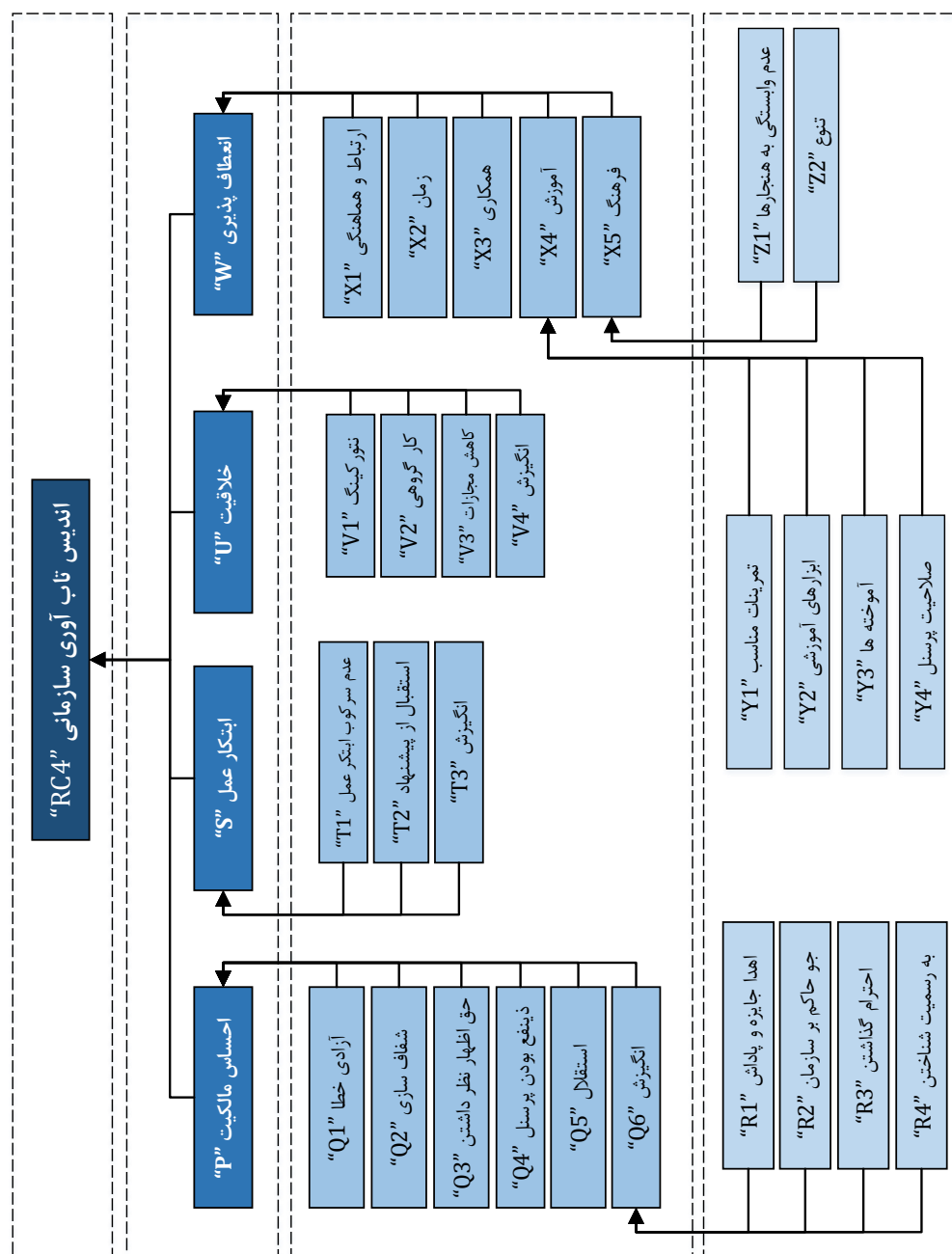
⁸ Norms

⁹ Diversity

اندیس تاب‌آوری سازمانی در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. طبق این شکل، عامل انگیزش برای شاخص‌های احساس مالکیت، خلاقیت و ابتکار عمل یکسان است و تنها نماد آن متفاوت است.



شکل ۴-۹- عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص شرایط عملیاتی مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ
پرونده طبس



شکل ۴-۱۰- عوامل تأثیرگذار بر روی اندیس تاب آوری سازمانی

۴-۳-۳- طراحی پرسشنامه برای جمع‌آوری قضاوت کارشناسان

قبل از هر چیز، نوع اختلال مدنظر برای بادبزنی اصلی می‌بایست تعریف شود. طبق مشاهدات میدانی و بررسی‌های صورت گرفته، یکی از مواردی که عملکرد عادی مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، وضعیت برینگ‌های موتورهای الکتریکی می‌باشد. خرابی برینگ می‌تواند منجر به خرابی موتور الکتریکی و مختل شدن عملکرد بادبزنی شود. بنابراین، خرابی برینگ به عنوان اختلال

برای سیستم تعریف شده است. سپس، پرسشنامه‌های مورد نیاز برای تعیین وضعیت فعلی عوامل مؤثر بر تاب‌آوری بادبزنی اصلی می‌بایست تدوین شوند. به منظور اخذ نظرات کارشناسان در مورد وضعیت فعلی عوامل تأثیرگذاری که در سطح k ام سلسله مراتب قرار دارند، سه عدد پرسشنامه می‌بایست طراحی شود. پرسشنامه شماره ۱ برای عوامل مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری، پرسشنامه شماره ۲ برای عوامل مؤثر بر اندیس تاب‌آوری سازمانی و پرسشنامه شماره ۳ برای اندیس کارایی سیستم PHM طراحی شده‌اند که توضیحات مربوط به آن‌ها در ادامه بیان می‌شوند.

الف) پرسشنامه شماره ۱

با توجه به ساختار سلسله مراتبی تشکیل شده برای اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری و تعداد عوامل تأثیرگذار بر روی آن‌ها در سطح k ام، پرسشنامه شماره ۱ طراحی شده است. پرسشنامه شماره ۱ حاوی ۳۴ سؤال می‌باشد. در این پرسشنامه از کارشناس خواسته می‌شود تا طبق درجه‌بندی ارائه شده در جدول ۱-۳ به سؤالات پاسخ دهد. سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۱ به همراه نماد عوامل مؤثر مربوط به آن‌ها در جدول ۴-۴ ارائه شده‌اند. در این جدول، منظور از زیرساخت، مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس می‌باشد. همچنین، سؤالاتی که می‌بایست متناسب با نوع اختلال در نظر گرفته شده برای سیستم پاسخ داده شوند، با علامت (*) مشخص شده‌اند.

ب) پرسشنامه شماره ۲

با توجه به ساختار سلسله مراتبی تشکیل شده برای اندیس تاب‌آوری سازمانی و تعداد عوامل تأثیرگذار در سطح k ام سلسله مراتب، پرسشنامه شماره ۲ طراحی شده است. پرسشنامه شماره ۲ حاوی ۲۳ سؤال می‌باشد. در این پرسشنامه نیز از کارشناسان خواسته می‌شود تا طبق درجه‌بندی ارائه شده در جدول ۱-۳ به سؤالات پاسخ دهند. سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۲ به همراه نماد عوامل مؤثر در جدول ۵-۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۴-۴- سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۱

نماد	سؤالات
D_1	۱ تا چه حد از امکانات پایش وضعیت در زیرساخت استفاده شده است؟*
D_2	۲ امکانات در نظر گرفته شده برای محافظت از زیرساخت تا چه حد مؤثر هستند؟*
D_3	۳ هماهنگی و ارتباط زیرساخت با سایر بخش‌های مرتبط با آن چه میزان است؟
D_4	۴ سیستم‌های پشتیبان در نظر گرفته شده برای زیرساخت تا چه حد مؤثر هستند؟*
D_5	۵ وضعیت مهارت پرسنل مرتبط با زیرساخت برای انجام وظایف محوله به چه صورت است؟
E_1	۶ اصلاحات موقتی استفاده شده در قبال زیرساخت تا چه اندازه مؤثر بوده‌اند؟*
F_1	۷ وضعیت بودجه در نظر گرفته شده برای انجام تعمیرات به چه صورت است؟*
B_4	۸ نظم و ترتیب اجرای بازرسی‌های دوره‌ای زیرساخت توسط تیم نت به چه صورت است؟
G_1	۹ به‌منظور ارتقای کیفیت پرسنل مرتبط با زیرساخت چه میزان از تمرینات مناسب استفاده می‌شود؟
G_2	۱۰ به‌منظور ارتقای کیفیت پرسنل مرتبط با زیرساخت چه میزان از ابزارهای آموزشی استفاده می‌شود؟
G_3	۱۱ پرسنل مرتبط با زیرساخت تا چه حد دانش حاصل از تجربه را به یکدیگر انتقال می‌دهند؟
G_4	۱۲ پرسنل مرتبط با زیرساخت تا چه حد برای انجام وظایف در شرایط اضطراری صلاحیت دارند؟
H_1	۱۳ مدیریت تا چه حد در کاهش فشار کاری و خستگی پرسنل مرتبط با زیرساخت موفق بوده است؟
H_2	۱۴ مدیریت تا چه حد در اتخاذ تصمیمات صحیح و به‌موقع در ارتباط با زیرساخت موفق بوده است؟
H_3	۱۵ مدیریت تا چه اندازه در اجرای تصمیمات اتخاذ شده در ارتباط با زیرساخت موفق بوده است؟
H_4	۱۶ مدیریت تا چه حد در انگیزش پرسنل مرتبط با زیرساخت موفق بوده است؟
H_5	۱۷ مدیریت تا چه اندازه در پرداخت به‌موقع و کافی حقوق پرسنل مرتبط با زیرساخت موفق بوده است؟
I_1	۱۸ مسائل ایمنی تا چه حد در جلسات و دوره‌های مربوطه ساده و قابل فهم بیان می‌شوند؟
I_2	۱۹ نظم برگزاری دوره‌های آموزشی با محوریت ایمنی به چه صورت است؟
J_1	۲۰ سهولت اجرای رویه‌های مرتبط با زیرساخت (مانند رویه نت و ...) چه میزان است؟
J_2	۲۱ نظم انجام کالیبراسیون تجهیزات مرتبط با زیرساخت (مانند حسگرها) در چه حدی است؟*
J_3	۲۲ وضعیت مستندسازی اطلاعات در زیرساخت مورد نظر به چه صورت است؟
L_2	۲۳ وضعیت امکانات مورد نیاز برای اجرای برنامه‌های نت زیرساخت به چه صورت است؟*
L_3	۲۴ در طراحی، چیدمان و تجهیزات محل کار پرسنل تا چه میزان به بحث ارگونومی توجه شده است؟
M_1	۲۵ وضعیت شناسایی قطعات یدکی مورد نیاز زیرساخت به چه صورت است؟*
M_2	۲۶ وضعیت مدیریت و دسترسی همیشگی به قطعات یدکی مورد نیاز زیرساخت به چه صورت است؟*
M_3	۲۷ وضعیت انبارداری قطعات یدکی مورد نیاز زیرساخت به چه صورت است؟*
N_1	۲۸ وضعیت نیروی کار قابل دسترس در صورت وقوع خرابی در زیرساخت به چه صورت است؟
N_2	۲۹ علل خرابی‌های ایجاد شده در زیرساخت تا چه حد به صورت صحیح تشخیص داد می‌شوند؟*
N_3	۳۰ برای تقاضای قطعات یدکی به‌صورت سریع و مطمئن چه میزان هماهنگی وجود دارد؟
N_4	۳۱ تا چه حد دستور العمل‌های اتخاذ شده برای انجام تعمیرات و تعویضات صحیح هستند؟
N_5	۳۲ سرعت انتقال قطعات یدکی و تجهیزات مورد نیاز زیرساخت به چه صورت است؟*
O_1	۳۳ چه حجم از قطعات و تجهیزات مورد نیاز زیرساخت به علت تحریم‌ها در دسترس نیستند؟*
O_2	۳۴ چه حجم از قطعات و تجهیزات مورد نیاز زیرساخت به علت کمیاب بودن در دسترس نیستند؟*

جدول ۴-۵- سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۲

نماد	سؤالات
Q_1	۱ در سازمان متبوع شما ارتکاب به اشتباه توسط پرسنل تا چه حد مجاز است؟
Q_2	۲ در سازمان متبوع شما تا چه حد بحث شفاف‌سازی فعالیت‌های سازمان رعایت می‌شود؟
Q_3	۳ در سازمان متبوع شما پرسنل تا چه حد حق اظهار نظر دارند؟
Q_4	۴ در سازمان متبوع شما پرسنل تا چه حد ذینفع هستند؟
Q_5	۵ در سازمان متبوع شما پرسنل در انجام وظایف خود تا چه اندازه استقلال دارند؟
R_1	۶ در سازمان متبوع شما تا چه حد اهداء جوایز و پاداش برای پرسنل در نظر گرفته می‌شود؟
R_2	۷ جو حاکم بر سازمان متبوع شما به چه صورت است؟
R_3	۸ در سازمان متبوع شما تا چه حد به پرسنل احترام گذاشته می‌شود؟
R_4	۹ در سازمان متبوع شما پرسنل تا چه حد به رسمیت شناخته می‌شوند؟
T_1	۱۰ در سازمان متبوع شما تا چه اندازه از ابتکار عمل داشتن پرسنل استقبال می‌شود؟
T_2	۱۱ در سازمان متبوع شما تا چه حد از پیشنهادات پرسنل استفاده می‌شود؟
V_1	۱۲ در سازمان متبوع شما تا چه حد بحث شبکه‌سازی و به‌روز بودن پرسنل رعایت می‌شود؟
V_2	۱۳ در سازمان متبوع شما تا چه حد از کار گروهی استفاده می‌شود؟
V_3	۱۴ در سازمان متبوع شما تا چه حد رویکرد غیر تنبیهی رعایت می‌شود؟
X_1	۱۵ هماهنگی و ارتباط بخش‌های مختلف در سازمان متبوع شما به چه صورت است؟
X_2	۱۶ در سازمان متبوع شما سرعت واکنش به تغییرات و رویدادهای مختلف به چه صورت است؟
X_3	۱۷ میزان همکاری برای انجام کارها در سازمان متبوع شما به چه صورت است؟
Y_1	۱۸ در سازمان متبوع شما تا چه حد از تمرینات مناسب برای ارتقا کیفیت پرسنل استفاده می‌شود؟
Y_2	۱۹ در سازمان متبوع شما تا چه حد از ابزارهای آموزشی برای ارتقا کیفیت پرسنل استفاده می‌شود؟
Y_3	۲۰ در سازمان متبوع شما تا چه حد دانش حاصل از تجربه به پرسنل جدید انتقال می‌یابد؟
Y_4	۲۱ در سازمان متبوع شما صلاحیت پرسنل برای انجام وظایف به چه صورت است؟
Z_1	۲۲ در سازمان متبوع شما تا چه حد از روش‌های جدید و مغایر با هنجارها استفاده می‌شود؟
Z_2	۲۳ در سازمان متبوع شما تا چه حد تنوع وجود دارد (تحصیلاتی، ملیتی، جنسیتی، فکری و ...)؟

ج) پرسشنامه شماره ۳

همان‌طور که در فصل سوم ذکر شد، برای تخمین اندیس کارایی سیستم PHM، روش FFTA پیشنهاد داده شده است. بر همین اساس، پرسشنامه شماره ۳ برای تعیین احتمال عدم تشخیص صحیح و احتمال عدم پیش‌آگهی صحیح نقص‌های ایجاد شده برای مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن تدوین شده است. در این پرسشنامه از کارشناسان خواسته می‌شود تا با استفاده از درجه‌بندی مورد استفاده در روش FFTA به سؤالات پاسخ دهند. سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۳ در جدول ۴-۶ ارائه شده‌اند.

جدول ۴-۶- سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۳

نماد	سؤالات
Λ_D	۱ احتمال عدم تشخیص صحیح نقص در زیرساخت به چه میزان است؟*
Λ_P	۲ احتمال عدم پیش آگهی صحیح وقوع خرابی در زیرساخت به چه میزان است؟*

۴-۳-۴- نتایج حاصل از اجرای نظرسنجی در معدن زغالسنگ پروده طبس

پرسشنامه شماره ۱ توسط اعضای بخش نت و تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس تکمیل شده است. میزان تجربه، سطح تحصیلات و نوع تخصص افراد تکمیل کننده در جدول ۴-۷ آورده شده است. همچنین، نتایج حاصل از نظرسنجی نیز در

جدول ۴-۸ ارائه شده است. اعداد نشان داده شده در این جدول معادل با شماره متغیرهای زبانی ارائه شده در جدول ۳-۱ می‌باشند. به‌منظور بررسی پایایی پرسشنامه مقادیر آلفای کرونباخ محاسبه شدند. طبق جدول ۴-۹، آلفای کرونباخ سؤالات مربوط به شاخص شرایط عملیاتی برابر با ۰/۶۹۲ است که به دلیل اختلاف ناچیز آن با مقدار ۰/۷، می‌توان آن را نادیده گرفت.

جدول ۴-۷- اطلاعات کارشناسان تکمیل کننده پرسشنامه شماره ۱

شماره کارشناس	نماد	میزان تجربه (سال)	سطح تحصیلات	رشته
۱	E_1	۱۱	کارشناسی	معدن
۲	E_2	۱۴	کارشناسی	معدن
۳	E_3	۱۵	کارشناسی	برق
۴	E_4	۱۴	کارشناسی	مکانیک
۵	E_5	۷	کارشناسی ارشد	مکانیک
۶	E_6	۱۳	کارشناسی ارشد	مکانیک
۷	E_7	۱۴	کارشناسی ارشد	معدن

جدول ۴-۸- نتایج حاصل از پرسشنامه شماره ۱

نظرات کارشناسان							نماد عوامل
E_7	E_6	E_5	E_4	E_3	E_2	E_1	
۷	۶	۶	۴	۵	۶	۷	D_1
۶	۶	۷	۵	۶	۶	۶	D_2
۷	۶	۴	۳	۶	۶	۶	D_3
۷	۶	۳	۴	۵	۶	۶	D_4
۷	۵	۵	۳	۵	۶	۷	D_5
۶	۴	۵	۴	۵	۶	۶	E_1
۷	۶	۵	۳	۲	۴	۴	F_1
۶	۵	۴	۵	۴	۶	۷	B_4
۴	۱	۳	۳	۵	۴	۴	G_1
۲	۱	۳	۳	۳	۲	۳	G_2
۴	۱	۲	۳	۴	۴	۵	G_3
۶	۳	۴	۴	۶	۶	۶	G_4
۶	۵	۵	۳	۴	۵	۵	H_1
۶	۷	۴	۵	۵	۶	۴	H_2
۴	۵	۴	۴	۴	۴	۳	H_3
۶	۶	۴	۳	۵	۳	۳	H_4
۷	۷	۶	۳	۷	۵	۴	H_5
۷	۶	۴	۳	۵	۵	۵	I_1
۵	۶	۳	۴	۳	۴	۴	I_2
۵	۵	۳	۳	۲	۴	۴	J_1
۵	۵	۱	۴	۴	۵	۵	J_2
۳	۴	۴	۳	۲	۳	۲	J_3
۵	۵	۵	۴	۴	۵	۶	L_2
۵	۶	۳	۳	۴	۴	۵	L_3
۷	۶	۶	۴	۵	۵	۶	M_1
۳	۳	۳	۳	۳	۲	۲	M_2
۳	۴	۳	۳	۳	۳	۳	M_3
۷	۶	۷	۵	۵	۶	۷	N_1
۷	۶	۶	۵	۶	۶	۶	N_2
۷	۶	۶	۵	۲	۴	۳	N_3
۶	۶	۶	۵	۶	۶	۵	N_4
۴	۳	۳	۳	۲	۲	۲	N_5
۷	۶	۷	۶	۶	۶	۶	O_1
۶	۶	۵	۶	۴	۶	۶	O_2

جدول ۴-۹- نتایج محاسبه مقادیر آلفای کرونباخ برای گروه‌های متفاوت سؤالات پرسشنامه شماره ۱

شماره گروه	گروه سؤالات	مقدار آلفای کرونباخ
۱	کل سؤالات	۰/۹۱۰
۲	سؤالات مربوط به شاخص طراحی سیستم	۰/۹۰۱
۳	سؤالات مربوط به شاخص استراتژی فعلی نت	۰/۸۲۰
۴	سؤالات مربوط به شاخص شرایط عملیاتی	۰/۶۹۲

پرسشنامه شماره ۲ نیز توسط ۳۱ نفر از پرسنل معدن زغالسنگ پروده طبس (شامل پرسنل بخش تهویه و نت) تکمیل شده است. با توجه به ماهیت سؤالات مطرح شده در پرسشنامه شماره ۲، اکثریت افراد قسمت مشخصات پرسشنامه را تکمیل نکرده‌اند. نتایج حاصل از نظرسنجی در جدول ۴-۱۰ ارائه شده است. به‌منظور بررسی پایایی پرسشنامه مقادیر آلفای کرونباخ محاسبه شدند. طبق جدول ۴-۱۱، مقادیر آلفای کرونباخ محاسبه شده برای گروه‌های مختلف سؤالات در محدوده قابل قبول قرار دارند.

جدول ۴-۱۰- نتایج حاصل از پرسشنامه شماره ۲

نماد عوامل																										کارت شماره
Z_2	Z_1	Y_4	Y_3	Y_2	Y_1	X_3	X_2	X_1	V_3	V_2	V_1	T_2	T_1	R_4	R_3	R_2	R_1	Q_5	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1				
۲	۲	۳	۵	۵	۵	۵	۵	۴	۳	۴	۳	۷	۶	۵	۵	۵	۲	۶	۴	۷	۵	۴	E_1			
۳	۴	۴	۵	۶	۲	۴	۶	۳	۴	۶	۷	۵	۶	۵	۵	۵	۵	۳	۶	۴	۳	۲	E_2			
۳	۲	۵	۲	۲	۲	۴	۵	۴	۳	۳	۲	۳	۳	۳	۴	۴	۲	۴	۲	۴	۴	۳	E_3			
۱	۴	۳	۳	۴	۴	۳	۴	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۳	۳	۳	۲	۳	۳	۵	۴	E_4			
۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	E_5			
۶	۲	۲	۲	۴	۳	۶	۶	۴	۷	۴	۱	۴	۴	۶	۶	۴	۱	۴	۵	۵	۲	۴	E_6			
۳	۵	۶	۶	۷	۶	۶	۶	۴	۱	۷	۶	۵	۶	۵	۶	۴	۵	۶	۶	۵	۶	۲	E_7			
۱	۴	۴	۶	۷	۷	۶	۲	۷	۲	۷	۷	۶	۴	۵	۷	۴	۴	۶	۴	۶	۶	۱	E_8			
۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۱	۱	۱	۱	۲	۶	E_9			
۴	۵	۳	۶	۷	۵	۵	۴	۴	۳	۵	۴	۴	۳	۵	۵	۶	۶	۵	۶	۵	۲	۴	E_{10}			
۵	۳	۵	۳	۴	۵	۵	۴	۵	۴	۵	۵	۳	۲	۴	۳	۴	۳	۴	۴	۵	۵	۲	E_{11}			
۷	۳	۶	۶	۷	۶	۵	۶	۷	۵	۵	۶	۵	۶	۶	۷	۶	۵	۵	۶	۶	۶	۲	E_{12}			
۳	۲	۳	۵	۴	۱	۴	۲	۶	۶	۵	۲	۲	۲	۳	۵	۴	۶	۲	۶	۴	۳	۴	E_{13}			
۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷	۷	۷	E_{14}			
۵	۲	۲	۱	۳	۲	۲	۱	۲	۴	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۲	E_{15}			
۲	۲	۴	۴	۳	۳	۴	۳	۴	۶	۴	۳	۳	۳	۳	۴	۴	۳	۴	۲	۳	۲	۳	E_{16}			

جدول ۴-۱۰- ادامه

کارشناس	نماد عوامل																								
	Z_2	Z_1	Y_4	Y_3	Y_2	Y_1	X_3	X_2	X_1	V_3	V_2	V_1	T_2	T_1	R_4	R_3	R_2	R_1	Q_5	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1		
E_{17}	۲	۴	۶	۶	۷	۵	۷	۵	۷	۲	۷	۵	۶	۷	۶	۶	۶	۷	۵	۶	۵	۵	۱		
E_{18}	۴	۳	۲	۲	۴	۳	۴	۲	۵	۳	۳	۴	۲	۳	۲	۲	۶	۴	۲	۲	۱	۲	۱		
E_{19}	۲	۲	۵	۵	۵	۵	۵	۴	۳	۵	۴	۳	۴	۴	۵	۶	۶	۳	۵	۵	۵	۴	۲		
E_{20}	۴	۳	۳	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۳	۵	۵	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۳		
E_{21}	۲	۶	۵	۳	۷	۷	۷	۳	۵	۶	۷	۴	۳	۴	۳	۳	۴	۵	۷	۴	۴	۵	۱		
E_{22}	۲	۴	۲	۵	۷	۶	۵	۳	۴	۵	۶	۵	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۳	۴	۲		
E_{23}	۱	۱	۴	۱	۳	۱	۱	۱	۴	۳	۱	۱	۳	۳	۴	۵	۴	۲	۴	۴	۳	۵	۶		
E_{24}	۲	۴	۶	۶	۷	۵	۶	۵	۲	۲	۷	۵	۵	۶	۶	۵	۶	۶	۵	۵	۵	۵	۱		
E_{25}	۲	۴	۷	۶	۷	۵	۷	۵	۷	۲	۷	۵	۶	۷	۶	۶	۶	۷	۵	۵	۵	۵	۱		
E_{26}	۴	۳	۴	۵	۵	۴	۴	۳	۴	۴	۵	۳	۴	۵	۴	۴	۴	۶	۴	۴	۵	۴	۳		
E_{27}	۱	۳	۴	۱	۲	۲	۵	۴	۳	۶	۴	۲	۴	۴	۶	۶	۴	۵	۴	۱	۴	۶	۱		
E_{28}	۳	۶	۶	۵	۴	۳	۶	۶	۳	۳	۶	۳	۳	۴	۵	۵	۵	۴	۴	۵	۶	۶	۲		
E_{29}	۳	۶	۷	۵	۵	۶	۷	۷	۶	۴	۷	۶	۵	۷	۷	۷	۴	۴	۴	۶	۷	۶	۳		
E_{30}	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۶	۵	۷	۱	۵	۴	۴	۴	۴	۶	۴	۴	۴	۷	۴	۴	۱		
E_{31}	۷	۶	۵	۵	۵	۴	۳	۴	۲	۲	۶	۶	۵	۳	۳	۴	۵	۳	۲	۴	۳	۴	۲		

جدول ۴-۱۱- نتایج محاسبه مقادیر آلفای کرونباخ برای گروه‌های متفاوت سؤالات پرسشنامه شماره ۲

شماره گروه	گروه سؤالات	مقدار آلفای کرونباخ
۱	کل سؤالات	۰/۹۳۰
۲	سؤالات مربوط به شاخص حس مالکیت	۰/۷۷۲
۳	سؤالات مربوط به شاخص ابتکار عمل	۰/۹۰۹
۴	سؤالات مربوط به شاخص خلاقیت	۰/۸۱۱
۵	سؤالات مربوط به شاخص انعطاف‌پذیری	۰/۸۹۳

پرسشنامه شماره ۳ نیز توسط ۴ نفر از اعضای بخش نت (نگهداری و تعمیرات) و تهویه معدن زغالسنگ پروده طبس تکمیل شده است. مشخصات کارشناسان در جدول ۴-۱۲ آورده شده است. برای اخذ نظرات کارشناسان از جدول ۴-۱۳ استفاده شده است. همچنین، نتایج حاصل از نظرسنجی در جدول ۴-۱۴ ارائه شده است. مقدار آلفای کرونباخ محاسبه شده برای پرسشنامه شماره ۳ تقریباً معادل ۰/۷ می‌باشد (جدول ۴-۱۵).

جدول ۴-۱۲- اطلاعات کارشناسان تکمیل‌کننده پرسشنامه شماره ۳

شماره کارشناس	نماد	میزان تجربه (سال)	سن (سال)	سطح تحصیلات	سمت
۱	E_1	۱۴	۳۷	کارشناسی	سرپرست تهویه
۲	E_2	۱۵	۳۶	کارشناسی	سرپرست برق
۳	E_3	۱۵	۴۵	کارشناسی	کارشناس دفتر فنی
۴	E_4	۳۱	۵۴	کارشناسی ارشد	مشاور ارشد مدیریت

جدول ۴-۱۳- اعداد فازی معادل با عبارات زبانی مورد استفاده در روش FFTA

شماره	عبارت زبانی	نماد	عدد فازی
۱	خیلی کم	VL	(0,0,0.1,0.25)
۲	کم	L	(0,0.25,0.25,0.4)
۳	متوسط	M	(0.3,0.5,0.5,0.7)
۴	زیاد	H	(0.6,0.75,0.75,0.9)
۵	خیلی زیاد	VH	(0.8,0.9,1,1)

جدول ۴-۱۴- نتایج حاصل از پرسشنامه شماره ۳

نماد عوامل	نظرات کارشناسان			
	E_1	E_2	E_3	E_4
Λ_D	۲	۳	۳	۱
Λ_P	۱	۳	۲	۱

جدول ۴-۱۵- نتایج محاسبه مقادیر آلفای کرونباخ برای گروه‌های متفاوت سؤالات پرسشنامه شماره ۳

شماره گروه	گروه سؤالات	مقدار آلفای کرونباخ
۱	کل سؤالات	۰/۶۷

۴-۴- جمع‌بندی

در این فصل به معرفی مطالعه موردی تحقیق و نحوه جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز پرداخته شد. حوزه زغال‌دار طبس غنی‌ترین و بزرگترین ناحیه زغالی ایران محسوب می‌شود. ناحیه پروده یکی از چهار ناحیه حوضه زغالی طبس و بزرگ‌ترین حوضه زغالسنگ کک شو ایران محسوب می‌شود. ناحیه پروده در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان طبس قرار گرفته است. در این معدن، ذخایر کم عمق با روش اتاق و پایه به‌صورت جبهه کار کوتاه و لایه‌های عمیق‌تر با استفاده از روش جبهه کار طولانی استخراج می‌شوند. سیستم تهویه معدن پروده طبس از نوع مکشی بوده و امکان تغییر آن به حالت دهشی نیز

وجود دارد. عملیات تهویه در این معدن توسط سه عدد بانک تهویه موازی با هم انجام می‌شود. مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن از سال ۱۳۸۵ فعالیت خود را آغاز کرده و معمولاً یک عدد از بانک‌ها عمل تهویه معدن را انجام داده و دو بانک دیگر به‌عنوان سیستم‌های پشتیبان استفاده می‌شوند. اجزای اصلی بادبزن‌های محوری شامل موتور الکتریکی، برینگ‌های سمت جلو و عقب، چرخ دوار و پره‌ها می‌شود.

برق مصرفی بادبزن اصلی از طریق پست ۶۶ کیلو ولت با جریان متناوب تأمین می‌شود. به‌منظور ایجاد سرعت‌های دوران مختلف برای بادبزن از یکسو کننده و معکوس کننده‌های جریان برق استفاده می‌شود. مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس مجهر به مولد دیزلی اضطراری بوده و در صورت قطع جریان اصلی برق، این مولد به‌عنوان منبع تغذیه وارد مدار می‌شود. در این معدن، حسگرهای مختلفی برای پایش وضعیت اجزای مهم هر کدام از بانک‌های تهویه در نظر گرفته شده‌اند. لرزش و دمای برینگ‌های جلو و عقب، دمای سیم‌پیچ موتور و فشار هوای داخل پره‌ها با استفاده از حسگرهای نصب شده پایش شده و در گزارش‌های روزانه مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن ثبت می‌شوند.

طبق بررسی‌های صورت گرفته بر روی تاریخچه فعالیت مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن مشخص شد که مشکلات عمده‌ای که بادبزن اصلی با آن‌ها دست به‌گیریان است مربوط به برینگ‌ها و یکسو کننده‌های جریان می‌شود. علاوه بر این، تحریم‌ها و عدم دسترسی به قطعات یدکی و مستندسازی ضعیف وضعیت بانک‌های تهویه را نیز باید به مشکلات فوق افزود. طبق اظهارات اعضای بخش نت، به علت ضعف گزارش‌دهی و مستندسازی ممکن است برخی از موارد پیش آمده برای بادبزن‌ها ثبت نشده باشند. این مسأله باعث می‌شود تا هر گونه تحلیل آماری بر روی اطلاعات جمع‌آوری شده از صحت و دقت کافی برخوردار نباشد.

پس از معرفی مطالعه موردی، سایر عوامل که به‌صورت بالقوه بر روی اندیس‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و تاب‌آوری سازمان مالک سیستم تأثیرگذار بودند، متناسب با مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس شناسایی شده و ساختارهای سلسله مراتبی مربوط به هر کدام از اندیس‌ها تشکیل داده شد. طبق آنچه بیان شد، از آنجا که در حال حاضر بانک تهویه شماره ۲ در حال فعالیت است، اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل تاب‌آوری براساس این بانک جمع‌آوری شدند. همان‌طور که مشاهده شد، به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات لازم برای تخمین تاب‌آوری مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن، سه عدد پرسشنامه تدوین شد. تعداد سؤالات هر کدام از پرسشنامه‌ها متناسب با تعداد عوامل مؤثر بر اندیس مربوطه در سطح k ام بودند. همچنین، نوع اختلال در نظر گرفته شده برای مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن به‌صورت خرابی برینگ تعریف شد. پرسشنامه‌های مذکور توسط کارشناسان مرتبط در معدن زغالسنگ پروده طبس تکمیل شده و نتایج حاصل از آن‌ها در این فصل ارائه شدند. همان‌طور که مشاهده شد، پایایی پرسشنامه‌های تدوین شده نیز به‌کمک محاسبه آلفای کرونباخ تأیید شدند.

فصل ۵: تحلیل تاب آوری مجموعه یادزین های اصلی معدن

۵-۱- آشنایی

در این فصل با استفاده از روش‌شناسی پیشنهاد شده در فصل سوم و اطلاعات جمع‌آوری شده به کمک پرسشنامه‌های تدوین شده در فصل قبل، اندیس تاب‌آوری کل مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس برآورد می‌شود. برای این منظور، ابتدا نتایج کیفی حاصل از نظرسنجی‌های انجام شده کمی‌سازی و ادغام می‌شوند تا امتیاز وضعیت فعلی هر کدام از عوامل مؤثر در سطح k ام تعیین شوند. همچنین، ضرایب اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی تاب‌آوری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی (FDAHP) تخمین زده شدند (پیوست شماره ۲). در نهایت، با استفاده از امتیازات و ضرایب اهمیت به‌دست آمده، اندیس تاب‌آوری کل مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن تخمین زده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، شناسایی نقاط قوت و ضعف تاب‌آوری زیرساخت یکی از مزیت‌های اندیس پیشنهاد شده برای تخمین تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی است. در نتیجه، براساس نتایجی که در ادامه فصل حاصل می‌شوند، نقاط قوت و ضعف تاب‌آوری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن شناسایی شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند. بایستی توجه داشت که شناسایی علل ریشه‌ای ضعف‌های سیستم و به بررسی‌های میدانی دقیق‌تر و گسترده‌تری نیازمند است.

۵-۲- تخمین امتیاز اندیس‌های سطح اول

در این بخش وضعیت فعلی عوامل مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، تاب‌آوری سازمانی و کارایی سیستم PHM در سطح k ام به‌صورت گام به گام تعیین شده و امتیاز نهایی هر

کدام از آن‌ها تخمین زده می‌شود. ابتدا با استفاده از قضاوت‌های کارشناسان در ارتباط با وضعیت فعلی عوامل مؤثر بر اندیس‌های مذکور کمی‌سازی شده و به اعداد فازی تبدیل شدند. نتایج کمی‌سازی نظرات حاصل از تکمیل پرسشنامه‌های شماره ۱ و ۲ در جدول ۵-۱ و جدول ۵-۲ ارائه شده است.

جدول ۵-۱- کمی‌سازی نظرات کارشناسان در پرسشنامه شماره ۱

نماد	نظرات کارشناسان					
	E_7	E_6	E_5	E_4	E_3	E_2
D_1	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)
D_2	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.9,1.0,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)
D_3	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)
D_4	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)
D_5	(0.9,1.0,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.9,1.0,1.0)
E_1	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)
F_1	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)
B_4	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.9,1.0,1.0)
G_1	(0.3,0.5,0.7)	(0.0,0.0,0.1)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)
G_2	(0.0,0.1,0.3)	(0.0,0.0,0.1)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)
G_3	(0.3,0.5,0.7)	(0.0,0.0,0.1)	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)
G_4	(0.7,0.9,1.0)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)
H_1	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)
H_2	(0.7,0.9,1.0)	(0.9,1.0,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)
H_3	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)
H_4	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)
H_5	(0.9,1.0,1.0)	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.1,0.3,0.5)	(0.9,1.0,1.0)	(0.5,0.7,0.9)
I_1	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)
I_2	(0.5,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)
J_1	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)
J_2	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.0,0.0,0.1)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)
J_3	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)
L_2	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)
L_3	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)
M_1	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)
M_2	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)
M_3	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)
N_1	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.9,1.0,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)
N_2	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)
N_3	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)
N_4	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)
N_5	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.0,0.1,0.3)
O_1	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.9,1.0,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)
O_2	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.7,0.9,1.0)

جدول ۵-۲- قسمتی از نتایج کمی‌سازی نظرات کارشناسان در پرسشنامه شماره ۲

نماد	نظرات کارشناسان						
	E_7	E_6	E_5	E_4	E_3	E_2	E_1
Q_1	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)
Q_2	(0.7,0.9,1.0)	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)
Q_3	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.9,1.0,1.0)
Q_4	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)
Q_5	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.7,0.9,1.0)
R_1	(0.5,0.7,0.9)	(0.0,0.0,0.1)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.5,0.7,0.9)	(0.0,0.1,0.3)
R_2	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)
R_3	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)
R_4	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)
T_1	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)
T_2	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.9,1.0,1.0)
V_1	(0.7,0.9,1.0)	(0.0,0.0,0.1)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.0,0.1,0.3)	(0.9,1.0,1.0)	(0.1,0.3,0.5)
V_2	(0.9,1.0,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)
V_3	(0.0,0.0,0.1)	(0.9,1.0,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)
X_1	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)
X_2	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)
X_3	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)
Y_1	(0.7,0.9,1.0)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.0,0.1,0.3)	(0.0,0.1,0.3)	(0.5,0.7,0.9)
Y_2	(0.9,1.0,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.0,0.1,0.3)	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)
Y_3	(0.7,0.9,1.0)	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)
Y_4	(0.7,0.9,1.0)	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)
Z_1	(0.5,0.7,0.9)	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.7)	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)	(0.0,0.1,0.3)
Z_2	(0.0,0.1,0.3)	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.0,0.0,0.1)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)

۵-۲-۱- تخمین امتیاز اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مجموعه بادبزن‌های اصلی

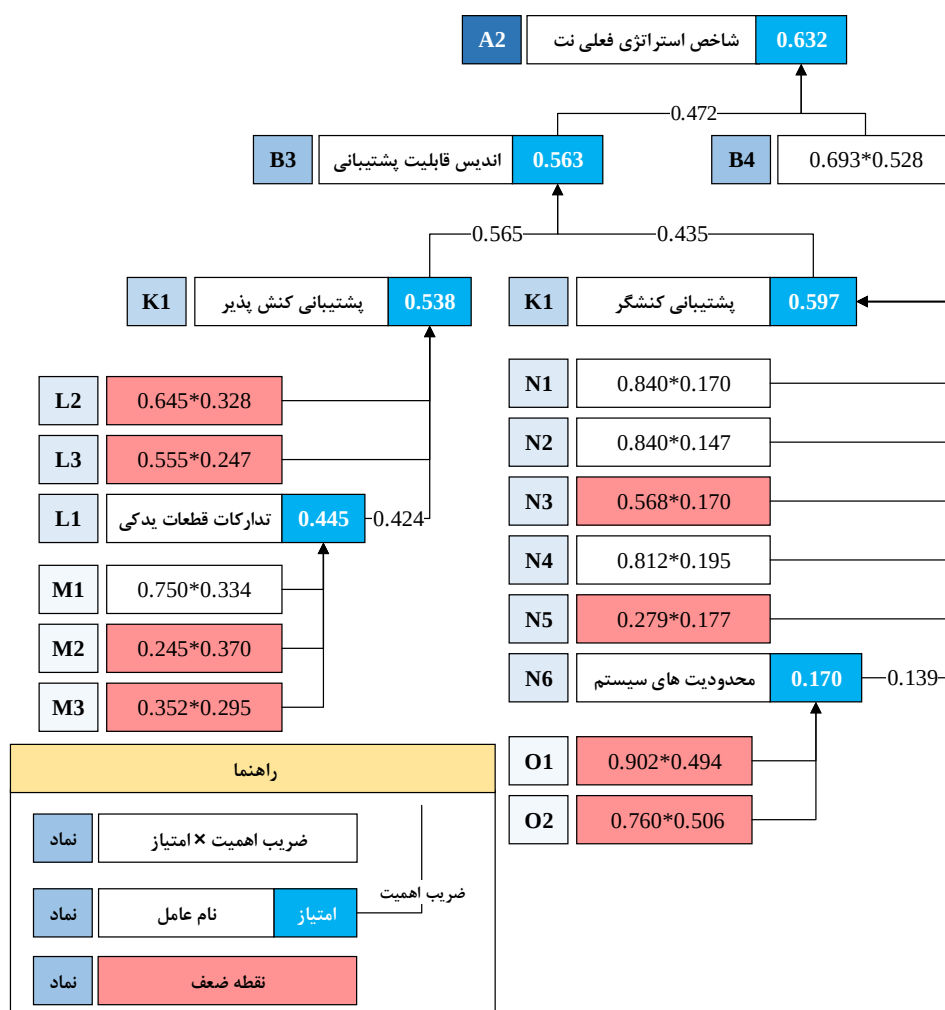
پس از کمی‌سازی نظرات کارشناسان، با استفاده از رابطه ۳-۱ اعداد فازی حاصل از قضاوت کارشناسان در مورد وضعیت فعلی هر کدام از عوامل مؤثر با یکدیگر ادغام شدند. نتایج ادغام نظرات کارشناسان در جدول ۵-۳ ارائه شده است. سپس، با استفاده از رابطه ۳-۳ اعداد فازی حاصل از ادغام نظرات به اعداد قطعی تبدیل شده و امتیازات نهایی عوامل مؤثر در سطح k ام سلسله مراتب تخمین زده شدند (جدول ۵-۳). در مرحله بعد، با استفاده از نتایج حاصل شده و به‌کارگیری رابطه ۳-۴، امتیاز شاخص‌های عمومی استراتژی فعلی نت، طراحی سیستم و شرایط عملیاتی مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری به‌ترتیب تخمین زده شدند.

جدول ۵-۳- امتیاز عوامل مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری بادبزنی اصلی در سطح k ام

عنوان عوامل	نماد عوامل	نظرات ادغام شده	امتیازات نهایی
امکانات پایش سیستم	D_1	(0.30,0.843,1.00)	0.779
امکانات حفاظت از سیستم	D_2	(0.50,0.886,1.00)	0.840
ارتباط و هماهنگی	D_3	(0.10,0.771,1.00)	0.698
سیستم‌های پشتیبان	D_4	(0.10,0.743,1.00)	0.679
پرسنل ماهر	D_5	(0.10,0.729,1.00)	0.669
اصلاحات موقتی مؤثر	E_1	(0.30,0.729,1.00)	0.702
بودجه	F_1	(0.00,0.571,1.00)	0.548
بازرسی منظم امکانات	B_4	(0.30,0.714,1.00)	0.693
تمرینات مناسب	G_1	(0.00,0.400,0.90)	0.417
ابزارهای آموزشی	G_2	(0.00,0.200,0.50)	0.217
آموخته‌ها	G_3	(0.00,0.371,0.90)	0.398
صلاحیت پرسنل	G_4	(0.10,0.700,1.00)	0.650
جلوگیری از خستگی پرسنل	H_1	(0.10,0.643,1.00)	0.612
تصمیم‌گیری صحیح و به‌موقع	H_2	(0.30,0.743,1.00)	0.712
توانایی اجرای تصمیمات	H_3	(0.10,0.500,0.90)	0.500
انگیزش	H_4	(0.10,0.557,1.00)	0.555
پرداخت به‌موقع و کافی حقوق پرسنل	H_5	(0.10,0.771,1.00)	0.698
جلسات مرتبط با ایمنی مؤثر	I_1	(0.10,0.686,1.00)	0.640
برگزاری منظم دوره‌های آموزش ایمنی	I_2	(0.10,0.571,1.00)	0.561
رویه‌های ساده	J_1	(0.00,0.443,0.90)	0.445
برنامه کالیبراسیون تجهیزات	J_2	(0.00,0.543,0.90)	0.512
مستندسازی اطلاعات	J_3	(0.00,0.300,0.70)	0.317
امکانات نت	L_2	(0.30,0.643,1.00)	0.645
ارگونومی طراحی، چیدمان و تجهیزات ایستگاه کار	L_3	(0.10,0.557,1.00)	0.555
وضعیت شناسایی قطعات یدکی	M_1	(0.30,0.800,1.00)	0.750
وضعیت مدیریت قطعات یدکی	M_2	(0.00,0.243,0.50)	0.245
وضعیت انبارداری قطعات یدکی	M_3	(0.10,0.329,0.70)	0.352
نیروی کار موجود	N_1	(0.50,0.886,1.00)	0.840
تشخیص صحیح علت خرابی	N_2	(0.50,0.886,1.00)	0.840
هماهنگی سریع و مطمئن تقاضای قطعات یدکی	N_3	(0.00,0.629,1.00)	0.568
اختصاص دستور العمل صحیح تعمیر یا تعویض	N_4	(0.50,0.843,1.00)	0.812
سرعت انتقال قطعات یدکی	N_5	(0.00,0.243,0.70)	0.279
قطعات یدکی، تجهیزات، دانش و ... تحت تحریم	O_1	(0.70,0.929,1.00)	0.902
قطعات یدکی، تجهیزات و ... کمیاب	O_2	(0.30,0.814,1.00)	0.760

الف) تخمین امتیاز شاخص استراتژی فعلی نت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

در این بخش، طبق امتیازات محاسبه شده در قسمت قبل و روش‌شناسی ارائه شده، امتیاز نهایی شاخص استراتژی فعلی نت سیستم تخمین زده شده است. با توجه به شکل ۵-۱ که در آن امتیازات عوامل مؤثر و ضرایب اهمیت آن‌ها ارائه شده است، برای ارتقای شاخص استراتژی فعلی نت، نظم و ترتیب بازرسی‌های دوره‌ای مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن توسط تیم نت می‌بایست مورد بازنگری قرار بگیرد. علاوه بر این، کیفیت استراتژی فعلی نت تحت تأثیر وضعیت پشتیبانی سیستم نیز بوده و بدون پشتیبانی مناسب، عملیات نت با کیفیت مطلوب اجرا نخواهد شد (نحوه محاسبه ضرایب اهمیت عوامل که در شکل ۵-۱ ارائه شده‌اند در پیوست شماره ۲ ارائه شده است).

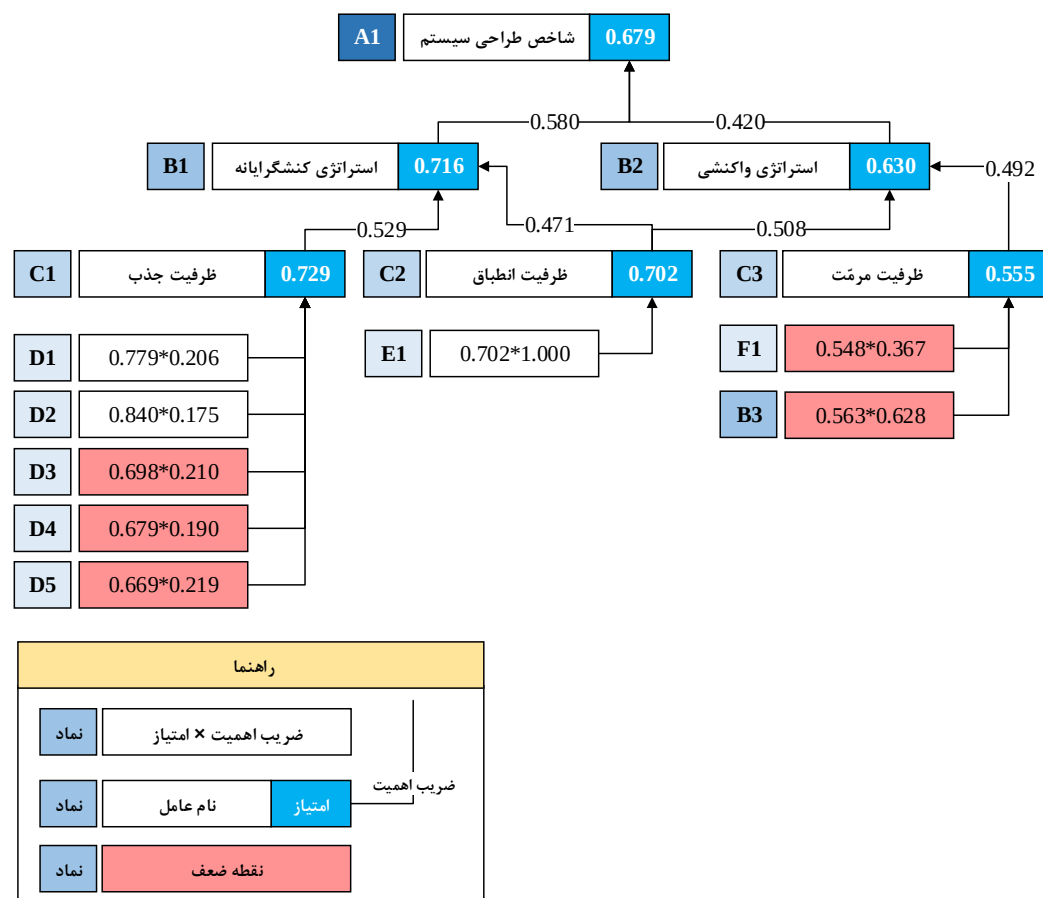


شکل ۵-۱- امتیاز نهایی شاخص استراتژی فعلی نت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن (امتیازات معیارها بر گرفته از نتایج جدول ۵-۳ هستند).

همان‌طور که مشخص است، طیف کلاس‌بندی پیشنهادی در فصل سوم، وضعیت فعلی قابلیت پشتیبانی (B3) مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن در کلاس "متوسط" قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج، در حوزه قابلیت پشتیبانی مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن، تدارکات قطعات یدکی (L1)، سرعت انتقال قطعات (N5)، محدودیت‌های سیستم (N6)، امکانات نت (L2)، رعایت اصول ارگونومی (L3) و هماهنگی برای تقاضای قطعات یدکی (N3) وضعیت ضعیف‌تری نسبت به سایر عوامل تأثیرگذار دارند. ضعف تدارکات قطعات یدکی ناشی از مدیریت (M2) و انبارداری (M3) ضعیف قطعات یدکی است. چنین عواملی بر روی دسترسی همیشگی به قطعات مورد نیاز و هزینه‌های تحمیل شده به مدیریت سیستم تأثیر مستقیم می‌گذارند. مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن شدیداً تحت تأثیر تحریم‌های اقتصادی قرار دارد. به‌طوری که علاوه بر برینگ‌ها سایر اجزای اصلی بانک‌های تهویه، مانند بادبزنی‌های محوری و سیستم‌های الکتریکی نیز به دلیل تحریم‌ها کمیاب بوده و یا قابل تأمین نیستند. همچنین، نمونه داخلی روغن مورد استفاده برای روغن‌کاری برینگ‌ها از لحاظ کیفیت با نمونه خارجی همان برند (مانند SKF Bearing Grease LGWA 2) فاصله دارد. مدیریت بادبزنی اصلی می‌بایست با تحلیل‌ها و بررسی‌های دقیق‌تر علل ایجاد چنین نقاط ضعفی را ریشه‌یابی کرده و برای رفع آن‌ها راهکارهایی ارائه کند. به‌طور کلی، ارتقای امتیاز عواملی که وضعیت ضعیف‌تری نسبت به سایرین دارند منجر به افزایش امتیاز قابلیت پشتیبانی سیستم و به‌تبع شاخص استراتژی فعلی نت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن خواهد شد. همچنین، می‌بایست به ضرایب اهمیت عوامل نیز توجه داشت. هرچه ضریب اهمیت عامل بیشتر باشد این افزایش نیز بیشتر خواهد بود. در حال حاضر، شرکت زغالسنگ پروده طبس در تلاش است تا با همکاری شرکت‌های دانش بنیان و استفاده از مهندسی معکوس تا حدی مشکلات مربوط به عدم دسترسی به تجهیزات و قطعات یدکی را برطرف کند. با توجه به این‌که زمان لغو تحریم‌ها مشخص نیست، برای رفع مشکلات ناشی از تحریم‌ها و ارتقای وضعیت تدارکات قطعات یدکی و امکانات نت راهی جز استفاده از توان فنی داخلی، تقویت ارتباط بین صنعت و دانشگاه و نیز سرمایه‌گذاری بر روی بخش تحقیق و توسعه باقی نمی‌ماند.

ب) تخمین امتیاز شاخص طراحی مجموعه بادبزنی های اصلی معدن

همان طور که در شکل ۲-۵ مشاهده می شود، طبق طبقه بندی پیشنهادی، وضعیت شاخص طراحی سیستم و نیز ظرفیت های جذب و انطباق مجموعه بادبزنی های اصلی معدن در کلاس "خوب" قرار می گیرند. اما ظرفیت مرمت سیستم در حال حاضر وضعیت مناسبی ندارد (کلاس "متوسط"). برای افزایش امتیاز شاخص طراحی سیستم می بایست ظرفیت های مذکور ارتقاء داده شوند.



شکل ۲-۵- امتیاز نهایی شاخص طراحی سیستم مجموعه بادبزنی های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس در شرایط کنونی، وضعیت ظرفیت مرمت مجموعه بادبزنی های اصلی معدن در شرایط ضعیف تری نسبت به دو ظرفیت دیگر قرار دارد. اهمیت این ظرفیت زمانی بیشتر می شود که ماهیت موقتی بودن ظرفیت انطباق سیستم به درستی درک شود. اصلاحات موقتی (E1) هر چقدر هم که مؤثر باشند، جایگزین اصلاحات دائمی نمی شوند. در حال حاضر، اگر چه کاهش سرعت دوران بادبزنی های اصلی بانک ۱ و ۳ مؤثر واقع شده و از شکست سیستم به دلیل فرسودگی برینگ ها جلوگیری می کند، اما

فرسودگی اجزای بادبزنی با گذشت زمان بیشتر شده و راهکارهای موقتی دیگر کارگشا نخواهند بود و باید به فکر راهکارهای دائمی بود. با توجه به این‌که بانک‌های تهویه مذکور حکم سیستم پشتیبان برای بانک فعال شماره ۲ را دارند، اتخاذ راهکارهای دائمی ضروری‌تر نیز می‌شود. همان‌طور که مشخص است، ضعف موجود در ظرفیت مرمت ناشی از بودجه (F1) و پشتیبانی (B3) نامناسب سیستم در بحث برینگ‌های الکتورموتورهاست. اصلاحات دائمی هزینه‌بر بوده و به بودجه کافی نیاز دارند. با توجه به حساسیت بسیار زیاد سیستمی مانند مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن، بودجه تخصیص داده شده باید به‌صورتی باشد که هزینه‌هایی غیر مترقبه‌ای همچون هزینه تأمین قطعات و تجهیزات مورد نیاز، هزینه آوردن تعمیرکاران خارجی، هزینه ارسال قطعات و تجهیزات به تعمیرگاه‌های مستقل در داخل و یا خارج از کشور را تا حدی پوشش دهد. همچنین، بودجه تخصیص داده شده به بحث مرمت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن می‌بایست با توجه به تغییر هزینه‌ها به‌صورت سالانه به‌روز رسانی شود. علاوه بر این، اگر پشتیبانی سیستم، به‌خصوص در بحث تدارکات قطعات یدکی، وضعیت مناسبی داشته باشد تا حدی از هزینه‌هایی که به‌صورت ناگهانی بر مدیریت سیستم تحمیل می‌شوند، جلوگیری به‌عمل خواهد آمد. زیرا، با توجه به بی‌ثباتی قیمت قطعات و تجهیزات مورد نیاز، تأمین سریع احتیاجات زیرساخت هزینه زیادی خواهد داشت که به‌تبع بودجه بیشتری را نیز می‌طلبد. حال اگر تأمین‌کنندگان عمده چنین احتیاجاتی در خارج از کشور حضور داشته باشند، با وجود تحریم‌ها و واسطه‌های موجود در راه واردات، هزینه‌ها چند برابر نیز خواهند شد. در نتیجه، با انجام سرمایه‌گذاری اولیه بر روی بحث پشتیبانی و تدارکات تا حدی از هزینه‌های جاری پیش‌آمده در آینده نیز جلوگیری به‌عمل می‌آید.

در ارتباط با ظرفیت جذب، وضعیت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طیس از لحاظ پرسنل ماهر (D5)، سیستم‌های پشتیبان (D4) و ارتباط و هماهنگی (D3) بحرانی‌تر از سایر عوامل است. همان‌طور که در فصل قبل عنوان شد، دو عدد از بانک‌های تهویه با فرسودگی برینگ‌ها مواجه بوده و قادر نیستند با حداکثر ظرفیت خود فعالیت کنند. علاوه بر این، اجزای بانک‌های تهویه بر روی

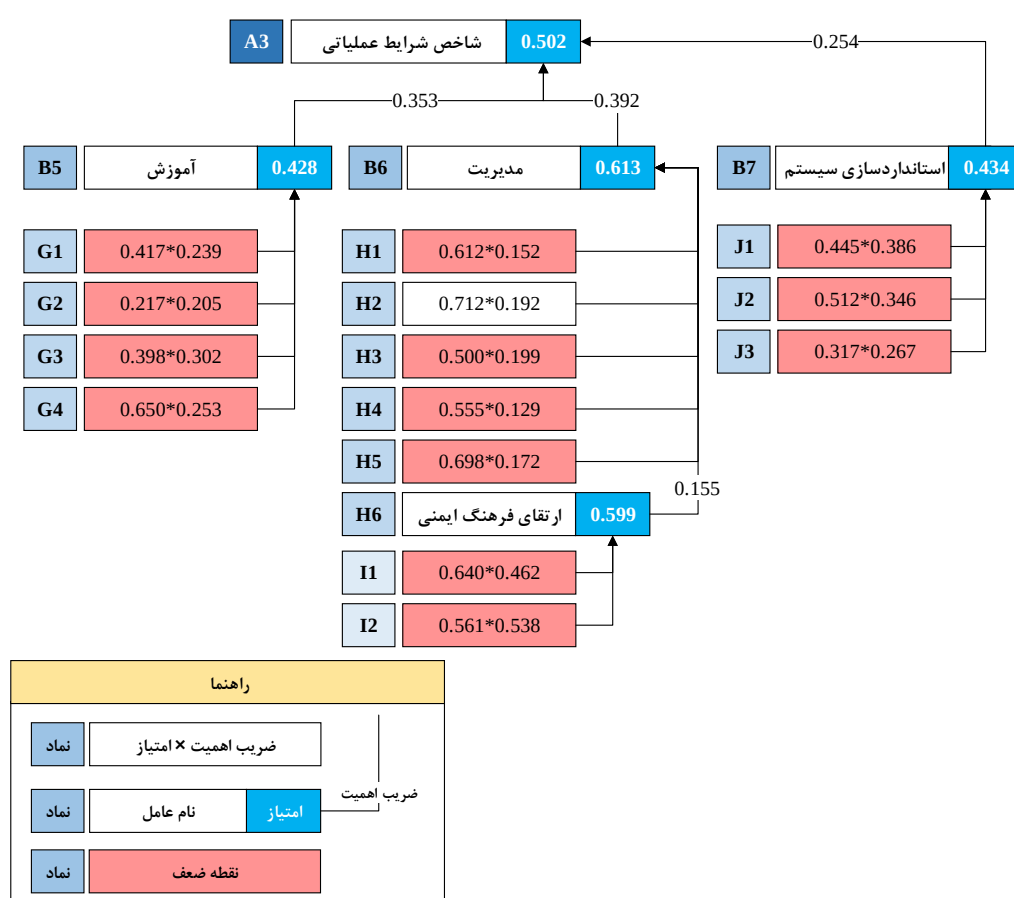
یکدیگر سوار شده و بانک تهویه‌ای که قطعه آن باز شده است از وضعیت آماده به کار خارج می‌شود. در چنین شرایطی، وضعیت سیستم به‌طور حتم از نظر سیستم‌های پشتیبان افت می‌کند. برای ارتقای ارتباط و هماهنگی میان بخش‌های مرتبط با سیستم، می‌بایست رویه‌ای برای گزارش‌دهی منظم و دقیق بخش تهویه به بخش نت ایجاد کرد. به‌منظور ارتقای عامل پرسنل ماهر نیز باید سعی شود تا از افرادی استفاده کرد که مهارت کافی برای کار با سیستم را داشته باشند و یا با برگزاری دوره‌های آموزشی سطح مهارت پرسنل فعلی را افزایش داد.

ج) تخمین امتیاز شاخص شرایط عملیاتی مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

در میان شاخص‌های عمومی مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن، وضعیت شاخص شرایط عملیاتی (A3) حساس‌تر از سایرین است. همان‌طور که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است، اکثر عوامل مؤثر بر شاخص شرایط عملیاتی نیاز به بازنگری دارند (ضرایب اهمیت عوامل مؤثر نیز در شکل ۳-۵ زیر نشان داده شده است). از بین عوامل مؤثر بر عامل آموزش (B5)، وضعیت استفاده از ابزارهای آموزشی (G2) ضعیف‌تر از سایر عوامل است. همچنین، مشخص است که در حیطه پرسنل مرتبط با مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن، توجه زیادی به حفظ و انتقال تجربه و نیز درس‌گیری از تجربیات گذشته نمی‌شود (G3). برای این منظور، بحث مدیریت دانش می‌بایست به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد. در ضمن، برای ارتقای وضعیت صلاحیت پرسنل (G4)، باید به‌دنبال عللی بود که مانع از این می‌شوند تا پرسنل مرتبط با بادبزنی اصلی از توانمندی‌های خود در شرایط اضطراری استفاده کنند. گاهی اوقات بی‌انگیزه بودن، نداشتن اعتماد به نفس یا ترس از مجازات در صورت ارتکاب به اشتباه و ... منجر به ایجاد این‌گونه مسائل می‌شوند.

در مورد عامل مدیریت (B6) نیز عواملی همچون توانایی اجرای تصمیمات (H3)، انگیزش (H4)، پرداخت به‌موقع و کافی حقوق (H5) و ارتقای فرهنگ ایمنی (H6) وضعیت ضعیف‌تری نسبت به سایر عوامل دارند. همان‌طور که مشخص است، در شرایط فعلی، مدیریت معدن زغالسنگ پروده طبس در

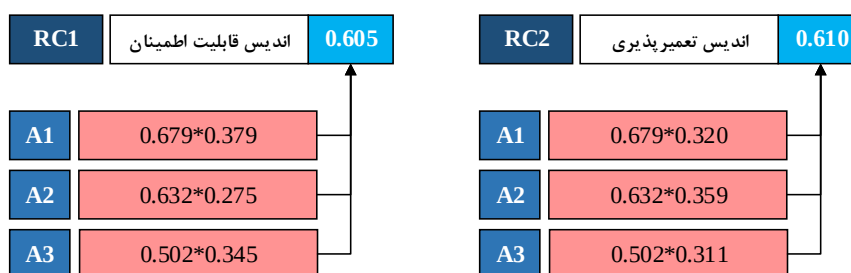
ایجاد انگیزه در بین پرسنل مرتبط با بادبزنی اصلی آن‌چنان موفق نبوده است. بی‌انگیزگی پرسنل به‌ویژه در شرایط اضطراری بسیار زیان‌آور خواهد بود. مدیریت باید تلاش کند تا با راهکارهای مختلفی مانند ایجاد جوّ دوستانه و غیر امنیتی در محیط کار و نیز اهدا پاداش به پرسنل پرتلاش، برای آن‌ها ایجاد انگیزه کند. برای عامل توانایی اجرای تصمیمات نیز می‌بایست بررسی کرد که آیا این ضعف اجرایی‌سازی ناشی از محدودیت دسترسی به منابع مورد نیاز است یا مسائل دیگری دخیل هستند. گاهی اوقات مدیریت سیستم به‌دلیل محدودیت منابع (مالی، نیروی انسانی، تجهیزات و ...) قادر به اجرای تصمیمات خود نیست. در نتیجه، برای شناسایی علل ریشه‌ای و ارتقای وضعیت این عامل به بررسی‌های میدانی دقیق‌تری نیاز خواهد بود. همچنین، برگزاری منظم‌تر دوره‌های آموزش اصول ایمنی و نیز ارائه آموزش‌ها با بیانی ساده و به‌دور از هر گونه پیچیدگی برای ارتقای فرهنگ ایمنی در میان پرسنل مرتبط با مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن ضروری هستند.



شکل ۵-۳- تخمین امتیاز نهایی شاخص شرایط عملیاتی مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

در مورد عامل استانداردسازی سیستم (B7) نیز وضعیت تمام عوامل، به‌ویژه عامل مستندسازی (B3)، نیازمند بازنگری است. در نتیجه، می‌بایست رویه‌ای استاندارد برای ثبت منظم و دقیق اطلاعات مربوط به مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن تدوین شود.

در نهایت، همان‌طور که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، امتیاز نهایی اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن با استفاده از امتیازات و ضرایب اهمیت شاخص‌های عمومی تخمین زده شدند (ضرایب اهمیت شاخص‌های عمومی نیز در شکل ۴-۵ زیر نشان داده شده است). واضح است که در شرایط فعلی اندیس‌های مذکور از وضعیت ایده‌آلی برخوردار نیستند و در کلاس "متوسط" قرار می‌گیرند. به‌منظور ارتقای وضعیت اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن می‌بایست از اصلاح شاخص‌هایی شروع کرد که تغییرات آن‌ها تأثیر بیشتری بر روی اندیس مورد نظر داشته باشند. با توجه به ضریب اهمیت بیشتر شاخص طراحی سیستم (A1) از دیدگاه اندیس قابلیت اطمینان، برای افزایش امتیاز این اندیس اولویت با ارتقای وضعیت شاخص طراحی سیستم است. به‌همین ترتیب، برای افزایش امتیاز اندیس تعمیرپذیری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن اولویت با ارتقای وضعیت شاخص استراتژی فعلی (A2) است.



شکل ۴-۵- تخمین امتیاز نهایی اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن

۵-۲-۲- تخمین امتیاز اندیس تاب‌آوری سازمانی شرکت زغالسنگ پروده طبس

به‌منظور تخمین امتیاز اندیس تاب‌آوری سازمانی ابتدا نتایج نظرسنجی از پرسنل شرکت زغالسنگ پروده طبس در مورد وضعیت عوامل مؤثر بر اندیس تاب‌آوری سازمانی در سطح k ام با استفاده از

جدول ۳-۱ فازی‌سازی شدند. سپس اعداد فازی مربوط به هر کدام از عوامل مؤثر با یکدیگر ادغام شده و به کمک رابطه ۳-۳ اعداد فازی حاصل از ادغام نظرات به اعداد قطعی تبدیل شدند. امتیازات نهایی عوامل مؤثر بر اندیس تاب‌آوری سازمانی در جدول ۵-۴ ارائه شده است. سپس، با استفاده از نتایج حاصل شده و به کارگیری رابطه ۳-۴، به ترتیب امتیاز شاخص‌های عمومی و اندیس تاب‌آوری سازمانی تخمین زده شدند. نتایج محاسبات در شکل ۵-۵ نشان داده شده است (ضرایب اهمیت عوامل مؤثر نیز در شکل ۵-۵ زیر نشان داده شده است).

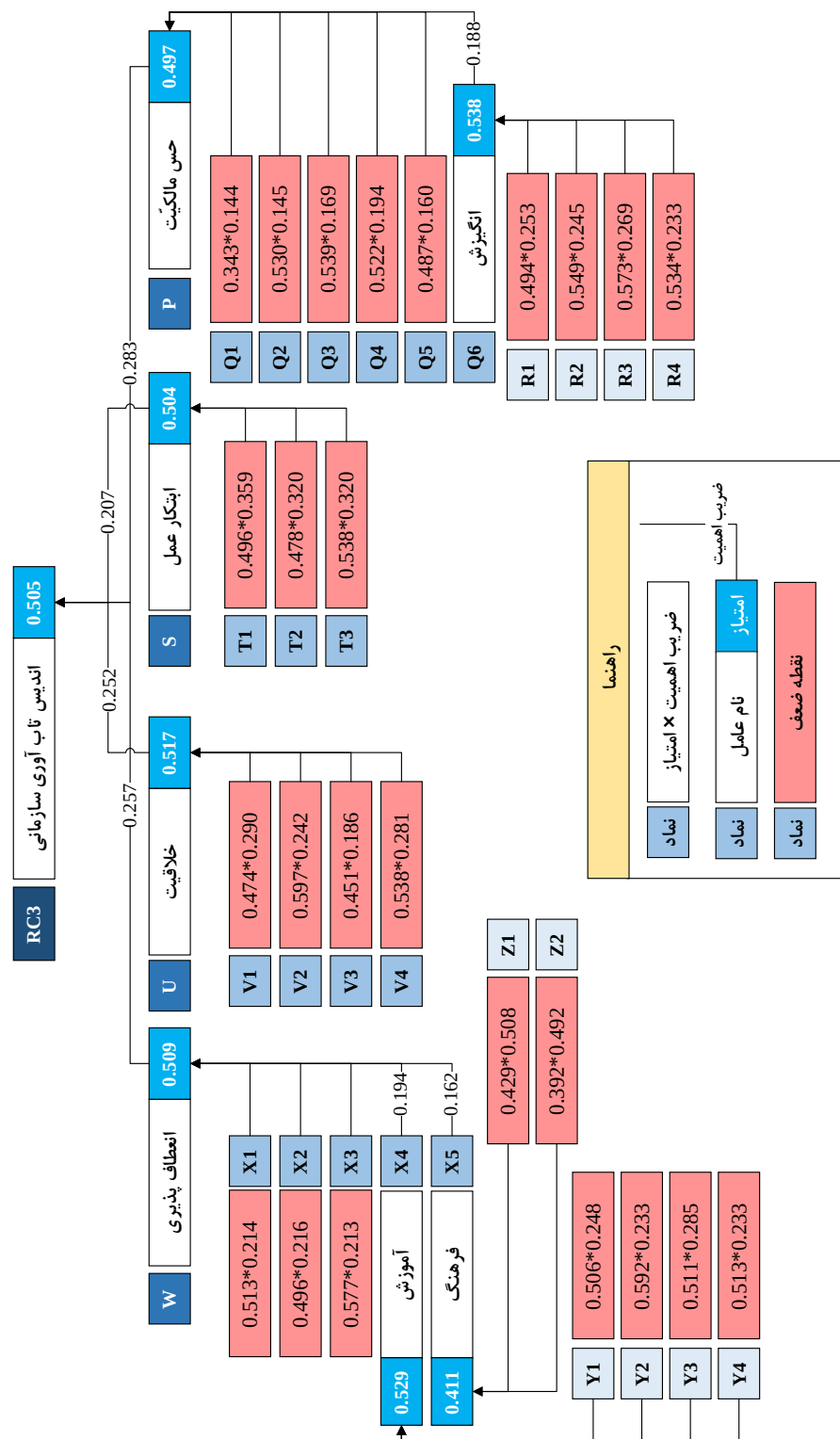
جدول ۵-۴- وضعیت فعلی عوامل مؤثر بر اندیس تاب‌آوری سازمانی معدن زغالسنگ طبس در سطح kام

عنوان عوامل	نماد عوامل	نظرات ادغام شده	امتیازات نهایی
آزادی خطا	Q_1	(0.00,0.265,1.00)	0.343
شفاف‌سازی	Q_2	(0.00,0.545,1.00)	0.530
حق اظهار نظر داشتن	Q_3	(0.00,0.558,1.00)	0.539
ذینفع بودن پرسنل	Q_4	(0.00,0.532,1.00)	0.522
استقلال	Q_5	(0.00,0.481,1.00)	0.487
اهدا جایزه و پاداش	R_1	(0.00,0.490,1.00)	0.494
جو حاکم بر سازمان	R_2	(0.00,0.574,1.00)	0.549
احترام گذاشتن	R_3	(0.00,0.610,1.00)	0.573
به رسمیت شناختن	R_4	(0.00,0.552,1.00)	0.534
عدم سرکوب ابتکار عمل	T_1	(0.00,0.494,1.00)	0.496
استقبال از پیشنهاد	T_2	(0.00,0.468,1.00)	0.478
شبکه‌سازی	V_1	(0.00,0.461,1.00)	0.474
کارگروهی	V_2	(0.00,0.645,1.00)	0.597
رویکرد غیرتنبیهی	V_3	(0.00,0.426,1.00)	0.451
ارتباط و هماهنگی	X_1	(0.00,0.519,1.00)	0.513
زمان	X_2	(0.00,0.494,1.00)	0.496
همکاری	X_3	(0.00,0.616,1.00)	0.577
تمرینات مناسب	Y_1	(0.00,0.510,1.00)	0.506
ابزارهای آموزش	Y_2	(0.00,0.639,1.00)	0.592
آموخته‌ها	Y_3	(0.00,0.516,1.00)	0.511
صلاحیت پرسنل	Y_4	(0.00,0.519,1.00)	0.513
عدم وابستگی به هنجارها	Z_1	(0.00,0.394,1.00)	0.429
تنوع	Z_2	(0.00,0.339,1.00)	0.392

طبق نتایج بدست آمده، در شرایط فعلی، امتیاز اندیس تاب‌آوری سازمانی شرکت زغالسنگ پروده طبس امتیازی در کلاس "متوسط" قرار می‌گیرد. هر کدام از چهار شاخص عمومی تأثیرگذار بر روی اندیس تاب‌آوری سازمانی در وضعیت متوسطی قرار داشته و وضعیت شاخص احساس مالکیت (P) بحرانی‌تر از سایر شاخص‌ها است. واضح است که مدیریت شرکت در ایجاد سازوکارهایی که پرسنل را به اهداف والاتر از کارهای مرسوم می‌دهد، متصل کنند، موفق نبوده است. با توجه به وضعیتی که عوامل مؤثر بر شاخص‌های عمومی اندیس تاب‌آوری در حال حاضر دارند، عملکرد مناسب آن‌ها در شرایط اضطراری دور از انتظار خواهد بود. تعلق خاطر نداشتن پرسنل به سازمان به دلیل نارضایتی از وضعیت جاری، به‌ویژه آن‌هایی که در خط مقدم ارتباط با مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن هستند، احتمال اجرای به‌موقع و کارآمد تصمیمات صادر شده از سوی مدیریت را کاهش می‌دهد.

به‌منظور ارتقاء سطح احساس مالکیت در پرسنل، مدیریت معدن باید به ایجاد انگیزه و ذینفع کردن پرسنل توجه ویژه‌ای داشته باشد. از آنجا که عوامل مذکور ضریب اهمیت بیشتری دارند، اولویت با آن‌ها خواهد بود. طبق نتایج، در شرایط کنونی، پرسنل به‌خاطر اشتباهات مورد سرزنش قرار می‌گیرند و مشخص است که در سازمان به بحث تحلیل علل ریشه‌ای اهمیتی داده نمی‌شود. در نتیجه، مدیریت باید تلاش کند تا علل ریشه‌ای اشتباهات را پیدا کرده و اصلاح کند. همچنین، مدیریت باید سعی کند تا شرایطی فراهم شود که پرسنل حق اظهار نظر داشته باشند. در حال حاضر، به‌دلایلی که حتماً باید شناسایی شوند، پرسنل یا حق برای بیان نظرات خود ندارند یا این‌که مسأله‌ای مانع بیان آن‌ها می‌شود. مدیریت باید سعی کند تا دور از دسترس نباشد و همواره با اعضای مجموعه خود درباره اهداف و چشم‌اندازهای آن صحبت کند. این موارد به پرسنل حس دیده شدن را القا خواهد کرد و موجب افزایش تعلق خاطر آن‌ها نسبت به سازمان می‌شود. همچنین می‌بایست تقدیر از خدمات و تلاش‌های پرسنل فعال افزایش یابد. برای پرسنلی که برآیند کاری آن‌ها منافی برای مجموعه به همراه داشته است می‌بایست پاداش در نظر گرفته شود. این کار باعث ایجاد انگیزه در بین سایرین نیز

شده و به آن ها این پیام را می رساند که زحماتشان توسط مدیریت معدن دیده می شود. انگیزش عامل بسیار مهمی است که هم زمان باعث افزایش ابتکار عمل و خلاقیت پرسنل نیز می شود.



شکل ۵-۵- تخمین امتیاز نهایی اندیس تاب آوری سازمانی معدن زغالسنگ پروده طبس

علاوه بر موارد فوق الذکر، ساختار مدیریتی عمودی یا سلسله‌مراتبی که در بیشتر سازمان‌های کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد، یکی از موانع شکل‌گیری حس مالکیت در پرسنل به‌شمار می‌آید. این موضوع که هر فرد می‌بایست به یک فرد بالادستی در ساختار مجموعه گزارش دهد و تنها می‌تواند مسائل خود را با وی مطرح نماید، باعث می‌شود تا تفکر مالکیت در میان کارشناسان متناسب با تعداد لایه‌های مدیریتی موجود کاهش یابد. جدا کردن افراد از یکدیگر به واسطه اتاق‌های مدیریتی و سمت‌های واسطه، یک ویژگی به‌جامانده از کسب و کارهای سنتی است که در دنیای امروز دیگر نمی‌توان از دستاوردهای آن‌ها مطمئن بود. در حال حاضر، ساختارهای افقی سازمانی بیشترین کاربرد را در سازمان‌های نوین و بزرگ جهان دارند. از جمله مزایای این نوع ساختار سازمانی، حذف اتاق‌های مدیریتی غیرقابل دسترس و همچنین سمت‌های مدیریتی میانی ناکارآمد است. این کار باعث می‌شود تا پرسنل احساس کنند می‌توانند در صورت نیاز به راحتی با افراد عالی‌رتبه مجموعه، مسائل خود را مطرح کنند و به واسطه سلسله‌مراتب و چارت سازمانی نادیده گرفته نمی‌شوند. احساس برابری مثبت نیز از جمله نتایج اصلاح ساختار مدیریتی سنتی است که باعث افزایش راندمان پرسنل خواهد شد.

توجه به انتقال تجربه و بحث آموزش و ارتقاء سطح علمی و تخصصی پرسنل معدن باعث افزایش انعطاف‌پذیری آن‌ها در شرایط اضطراری می‌شود. باید توجه داشت تجربیات افراد باسابقه سرمایه معدن به‌شمار می‌آید و مدیران باید تلاش کنند تا اشتراک دانش و تخصصی که افراد با سابقه دارند با افراد تازه‌کار جزئی از فرهنگ سازمانی مجموعه شود. افزایش برگزاری دوره‌های آموزشی در داخل مجموعه و یا فراهم کردن امکان حضور کارشناسان در دوره‌های آموزشی آزاد (مانند اهدا کمک هزینه) به بهبود وضعیت آموزشی کمک می‌کند. ارتقای سطح دانش و توانایی پرسنل از جمله خط‌مشی‌های شرکت زغالسنگ پروده طبس به‌شمار می‌آید و توجه به امر آموزش یکی از راهکارهای رسیدن به آن است. در بحث ابتکار عمل، عدم سرکوب ایده‌های جدید اهمیت زیادی دارد. مدیریت باید به دنبال ایده‌های نو باشد زیرا رشد و شکوفایی در قبال ایده‌های خلاق و بدیع شکل می‌گیرد. در صورتی که ابتکارات پرسنل با سرکوب مواجه شود، به تدریج سرچشمه چنین ایده‌هایی خشک

می‌شود. علاوه بر این، ساختار سازمانی مجموعه باید به گونه‌ای تغییر یابد تا ایده‌های جدید در سطح ابتدائی سازمان باقی نمانده و تا سطوح عالی بالا بروند. احتمال سرکوب و نادیده گرفته شدن ابتکارات و ایده‌ها توسط مدیران میانی در ساختار سلسله مراتبی بسیار زیاد است.

۵-۲-۳- تخمین امتیاز اندیس کارایی سیستم PHM

همان‌طور که در فصل سوم بیان شد، کارایی سیستم PHM وابسته به رویدادهای تشخیص و پیش‌آگهی صحیح نقص در مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن است. با توجه به این‌که برخی از زیرساخت‌ها از سیستم PHM استفاده نمی‌کنند، در این بخش، برای تخمین مقدار رویدادهای فوق از روش FFTA استفاده خواهد شد. در روش FFTA که روشی جزء به کل است، احتمال شکست رویداد بالایی^۱ با استفاده از احتمال شکست رویدادهای پایه^۲ و ترکیب آن‌ها با درگاه‌های "آیا"^۳ و "و"^۴ تخمین زده می‌شود. در این بخش نیز هدف تخمین احتمال شکست کارایی سیستم PHM با استفاده از احتمال شکست رویدادهای پایه است (شکل ۵-۶). به‌منظور تخمین احتمال شکست رویدادهای پایه از نتایج ارائه شده جدول ۴-۱۴ استفاده شده است. پس از کمی‌سازی نظرات کارشناسان با استفاده از جدول ۴-۱۳، نظرات به‌دست آمده با استفاده از رابطه ۵-۱ با یکدیگر ادغام شدند. در این رابطه، w_j وزن هر کارشناس است که با توجه به ویژگی‌های تحصیلاتی، شغلی و ... محاسبه شده و A_{ij} نظر کارشناس j ام در مورد رویداد پایه i ام است. پس از ادغام نظرات، با استفاده از رابطه ۵-۲ اعداد فازی حاصل از ادغام نظرات، قطعی‌سازی شده و امکان شکست^۵ (FP) هر کدام از رویدادهای پایه تخمین زده شدند. با توجه به این‌که نتایج سایر اندیس‌های محاسبه شده (اندیس قابلیت اطمینان و ...) نیز حاصل از

¹ Top event

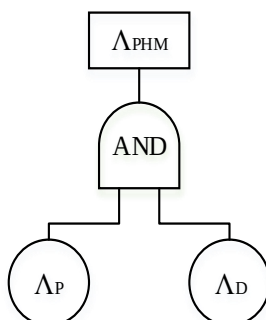
² Basic events

³ OR

⁴ AND

⁵ Failure possibility (FP)

قطعی سازی اعداد فازی هستند و ماهیتی امکانی دارند، برای هماهنگ بودن، به جای احتمال شکست از امکان شکست استفاده شده است. امکان شکست هر کدام از رویدادهای پایه در جدول ۵-۵ ارائه شده است.



شکل ۵-۶- ساختار درخت خطا

$$M_i = \sum_{j=1}^4 w_j A_{ij} \quad ; \quad M_i = (a_i, b_i, c_i, d_i) \quad (۱-۵)$$

$$FP = \frac{1}{3} \frac{(a_4 + a_3)^2 - a_4 a_3 - (a_1 + a_2)^2 + a_1 a_2}{(a_4 + a_3 - a_2 - a_1)}, \quad \tilde{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4) \quad (۲-۵)$$

جدول ۵-۵- نتایج امکان شکست رویدادهای پایه

امکان شکست	نظرات ادغام شده	نظرات کارشناسان (E) و وزن های آن ها (W)				رویداد پایه
		E4 (W ₄ =0.33)	E3 (W ₃ =0.24)	E2 (W ₂ =0.22)	E1 (W ₁ =0.22)	
0.309	(0.159, 0.283, 0.315, 0.472)	(0, 0, 0.1, 0.25)	(0.3, 0.5, 0.5, 0.7)	(0.3, 0.5, 0.5, 0.7)	(0, 0.25, 0.25, 0.4)	Λ_D
0.212	(0.089, 0.168, 0.223, 0.357)	(0, 0, 0.1, 0.25)	(0, 0.25, 0.25, 0.4)	(0.3, 0.5, 0.5, 0.7)	(0, 0, 0.1, 0.25)	Λ_P

با توجه به شکل ۵-۶ امکان شکست کارایی سیستم PHM حاصل درگاه "و" است، در نتیجه امکان شکست آن با استفاده از رابطه ۲-۵ تخمین زده می شود. در این رابطه، $FP(BE_i)$ برابر با امکان شکست رویداد پایه i ام بوده و m برابر با تعداد رویدادهای پایه است. با توجه به این که پیشامدهای کارا بودن و نبودن سیستم PHM هر دو مربوط به یک فضای نمونه هستند، امکان کارا بودن سیستم PHM $(P(\Lambda_{PHM}))$ و یا همان اندیس کارایی سیستم PHM برابر با متمم امکان شکست کارایی این سیستم، به صورت رابطه ۳-۵ به دست می آید.

$$FP(\Lambda_{PHM}) = \prod_{i=1}^m FP(BE_i) \quad (3-5)$$

$$P(\Lambda_{PHM}) = 1 - FP(\Lambda_{PHM}) \quad (4-5)$$

با توجه به نتایج، امکان شکست کارایی سیستم PHM برابر ۰/۰۶۶ بوده و از این رو اندیس کارایی سیستم PHM بادبزن اصلی معادل با ۰/۹۳۴ تخمین زده شد.

۴-۲-۵- تخمین اندیس تاب‌آوری کل (TRI) مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن

در نهایت، بر اساس مقادیر برآورد شده برای اندیس‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، تاب‌آوری سازمانی و کارایی سیستم PHM (جدول ۵-۶) و با استفاده از رابطه ۳-۵ اندیس تاب‌آوری کل مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس به‌صورت زیر برآورد شده است:

$$TRI = \sum_{i=1}^4 W_{RCi} S_{RCi} = 0.664 \quad (5-5)$$

همان‌طور که در جدول ۵-۶ نشان داده شده است، در این رساله، میزان تأثیر اندیس‌های سطح اول سلسله مراتب بر روی اندیس تاب‌آوری کل مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن، یکسان فرض شده است. کلاس‌های نهایی هر کدام از مفاهیم تاب‌آوری با استفاده از کلاس‌بندی پیشنهادی در فصل سوم در جدول ۵-۶ ارائه شده است. همچنین، به‌منظور تعیین کلاس امتیاز اندیس تاب‌آوری کل نیز از این طبقه‌بندی استفاده شده است. طبق محاسبات صورت گرفته، بردار درجات عضویت اندیس تاب‌آوری کل محاسبه شده در کلاس‌های پنجگانه به‌صورت زیر می‌باشد:

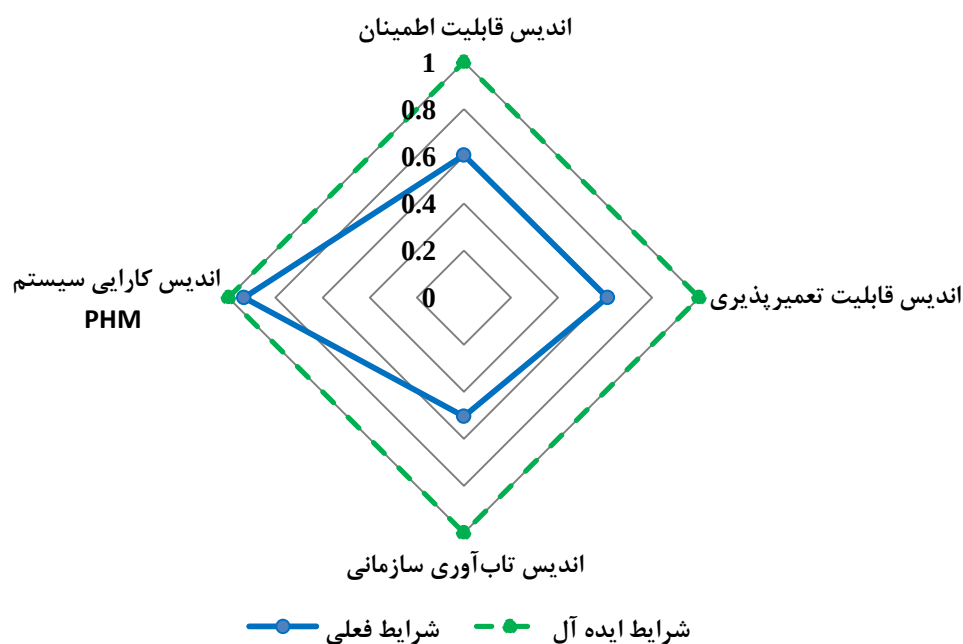
$$\mu(S) = [0.0, 0.36, 0.64, 0] \quad (6-5)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان عضویت امتیاز اندیس تاب‌آوری کل به کلاس "متوسط" و "خوب" به‌ترتیب برابر با ۰/۳۶ و ۰/۶۴ می‌باشد. در نتیجه، طبق رابطه ۳-۱۲، امتیاز اندیس تاب‌آوری

کل تا حدی خوب است. طبق شکل ۵-۷، به‌منظور ارتقای وضعیت تاب‌آوری مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن، ارتقای اندیس‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری و تاب‌آوری سازمانی می‌بایست در اولویت قرار بگیرند. در بخش‌های گذشته نقاط ضعف هر کدام از اندیس‌ها شناسایی گردید و تا حدی سعی شد راهکارهای مناسب برای ارتقای وضعیت آن‌ها ارائه شود. با این حال، ارائه راه‌حل‌های دقیق‌تر و مفیدتر نیازمند شناسایی علل ریشه‌ای مشکلات به‌وسیله بررسی‌های میدانی گسترده‌تر می‌باشد.

جدول ۵-۶- نتایج تخمین مفاهیم تاب‌آوری در سطح اول سلسله مراتب

مفهوم تاب‌آوری	نماد	امتیاز	ضریب اهمیت	کلاس نهایی
اندیس قابلیت اطمینان	RC_1	۰/۶۰۵	۰/۲۵	متوسط (M)
اندیس قابلیت تعمیرپذیری	RC_2	۰/۶۱۰	۰/۲۵	متوسط (M)
اندیس تاب‌آوری سازمانی	RC_3	۰/۵۰۵	۰/۲۵	متوسط (M)
اندیس کارایی سیستم PHM	RC_4	۰/۹۳۴	۰/۲۵	خیلی خوب (VH)



شکل ۵-۷- مقایسه شرایط فعلی مفاهیم تاب‌آوری نسبت به شرایط ایده‌آل

۵-۲-۵- جمع‌بندی

در این فصل با استفاده از روش‌شناسی پیشنهاد شده و اطلاعات جمع‌آوری شده، تاب‌آوری مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس تحلیل شد. همان‌طور که مشاهده شد، ابتدا نتایج

کيفی حاصل از نظرسنجی‌های انجام شده کمی‌سازی و ادغام شدند تا امتیاز وضعیت فعلی هر کدام از عوامل مؤثر تعیین شوند. در نهایت، با استفاده از امتیازات و ضرایب اهمیت به‌دست آمده، اندیس تاب‌آوری بادبزنهاي اصلی تخمین زده شد. نتایج به‌دست آمده باعث شناسایی نقاط قوت و ضعف تاب‌آوری مجموعه بادبزنهاي اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس شد. طبق نتایج حاصل شده، در حوزه اندیس قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری، وضعیت ظرفیت‌های جذب، مرمت و انطباق زیرساخت در حد متوسط رو به بالاست. در حال حاضر وضعیت ظرفیت مرمت مجموعه بادبزنهاي اصلی معدن در وضعیت ضعیف‌تری نسبت به دو ظرفیت دیگر قرار دارد. اهمیت این ظرفیت زمانی بیشتر می‌شود که ماهیت موقتی بودن ظرفیت انطباق سیستم به‌درستی درک شود. اصلاحات موقتی هر چقدر هم که مؤثر باشند، جایگزین اصلاحات دائمی نمی‌شوند. در شرایط کنونی، اگر چه کاهش سرعت دوران بادبزنهاي بانک‌های شماره ۱ و ۳ مؤثر واقع شده و از شکست عملیات آن‌ها جلوگیری می‌کند، اما فرسودگی اجزای بادبزنهاي با گذشت زمان بیشتر شده و راهکارهای موقتی دیگر کارگشا نخواهند بود و باید به فکر راهکارهای دائمی بود. در میان شاخص‌های عمومی مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مجموعه بادبزنهاي اصلی معدن نیز وضعیت شاخص شرایط عملیاتی حساس‌تر از سایرین است. وضعیت تمام عوامل مؤثر بر شاخص شرایط عملیاتی نیازمند بازنگری هستند. از بین عوامل مؤثر بر عامل آموزش، وضعیت استفاده از ابزارهای آموزشی ضعیف‌تر از سایر عوامل است. همچنین، مشخص شد که در حیطه پرسنل مرتبط با مجموعه بادبزنهاي اصلی معدن توجه زیادی به حفظ و انتقال تجربه و نیز درس‌گیری از تجربیات گذشته نمی‌شود.

در حوزه اندیس تاب‌آوری سازمانی، نتایج نشان داد که در شرایط فعلی، اندیس تاب‌آوری سازمانی شرکت زغالسنگ پروده طبس امتیازی در حد متوسط کسب می‌کند. هر کدام از چهار شاخص عمومی تأثیرگذار بر روی اندیس تاب‌آوری سازمانی در وضعیت ضعیفی قرار داشته و وضعیت شاخص حس مالکیت بحرانی‌تر از سایر شاخص‌ها است. واضح است که مدیریت شرکت در ایجاد سازوکارهایی که پرسنل را به اهداف والاتر از کارهای مرسوم که در سازمان انجام می‌دهند، متصل کنند، موفق نبوده

است. تعلق خاطر نداشتن پرسنل به سازمان به‌دلیل نارضایتی از وضعیت جاری، به‌ویژه آن‌هایی که در خط مقدم ارتباط با مجموعه بادبزنهاي اصلی معدن هستند، احتمال اجرای به‌موقع و کارآمد تصمیمات صادر شده از سوی مدیریت را کاهش می‌دهد. با این‌حال در حوزه اندیس کارایی سیستم PHM وضعیت بادبزنهاي اصلی بهتر از سایر اندیس‌ها است. واضح است که اندیس‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی و تاب‌آوری سازمانی در شرایط مناسبی قرار ندارند. ارتقای اندیس‌های مذکور نیازمند اقدامات جدی بوده و ارائه راه‌حل‌های مناسب نیازمند بررسی‌های میدانی گسترده و شناسایی علل ریشه‌ای مشکلات است.

فصل ۷: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در سال‌های گذشته، مدیریت ریسک به‌عنوان تنها رویکردی که از آن می‌توان برای ارتقای ایمنی زیرساخت‌های حیاتی در برابر اختلالات استفاده کرد، شناخته می‌شد. هدف این رویکرد کاهش احتمال وقوع مخاطره و عواقب ناشی از آن با استفاده از برنامه‌های پیشگیرانه و حفاظتی است. اما جلوگیری از وقوع اختلالات الزاماً در تمام موارد امکان‌پذیر نیست. بر همین اساس، اخیراً توجهات به سمت مفهوم تاب‌آوری معطوف شده است. مفهوم تاب‌آوری به مدیران کمک می‌کند تا ایمنی و عملکرد مداوم زیرساخت‌های حیاتی را تضمین کنند. تاب‌آوری به‌صورت توانایی زیرساخت حیاتی برای مقاومت، جذب، انطباق و بازیابی به‌موقع و کارآمد از اثرات مخاطره به‌منظور حفظ و مرمت خدمات ضروری تعریف می‌شود.

در حوزه معدن‌کاری نیز همانند جامعه زیرساخت‌های متعددی در حال ارائه خدمات هستند. در این حوزه عبارت "زیرساخت" به دارایی‌های نصب شده در محل معادن سطحی و زیرزمینی گفته می‌شود. در میان تمام زیرساخت‌های موجود در معادن، سیستم تهویه مهم‌ترین زیرساختی است که ماهیت عملکرد آن با تعریف ارائه شده برای زیرساخت‌های حیاتی انطباق دارد. در نتیجه، سیستم تهویه زیرساختی حیاتی برای معادن به‌شمار می‌آید. سیستم تهویه معدن با ترقیق گازها و ذرات سمی و قابل انفجار به‌طور مستقیم بر روی سلامتی و ایمنی پرسنل معدن زیرزمینی تأثیرگذار است و در

صورت خاموش شدن آن به علت شرایط اضطراری می‌بایست تمام فعالیت‌ها قطع شده و معدن تخلیه شود. سیستم تهویه به‌عنوان مهمترین زیرساخت حیاتی در معادن زیرزمینی شناخته می‌شود. با توجه به نقش حیاتی سیستم تهویه، وقوع اختلال در این زیرساخت از آن دست حوادثی خواهد بود که علاوه بر خسارات جانی و مالی شدیدی که برای شرکت‌های معدنی در پی خواهد داشت، متعاقباً تأثیر روحی و روانی بسیار زیادی نیز بر روی جامعه خواهد گذاشت. در نتیجه، به‌کارگیری مفهوم تاب‌آوری در این حوزه از این منظر که باعث کاهش خسارات جانی و مالی شده و از حاکم شدن جوّی منفی نسبت به معدن و معدن‌کاری در جامعه جلوگیری می‌کند، بسیار اهمیت دارد.

تحلیل تاب‌آوری اولین و شاید مهمترین گام در مدیریت مؤثر تاب‌آوری سیستم‌های فنی است. اما مهمترین چالشی که در طی این گام پیش‌روی تحلیل‌گران قرار دارد، فقدان داده‌های از جنس تاب‌آوری است. زیرا اکثر سیستم‌های جمع‌آوری اطلاعات با هدف تحلیل تاب‌آوری طراحی نشده‌اند. عدم دسترسی به چنین اطلاعاتی باعث می‌شود تا تحلیل تاب‌آوری با استفاده از ابزارهای مرسوم غیر ممکن شود. بر همین اساس، در این رساله، به‌منظور غلبه بر چنین چالش‌هایی و نیز تسهیل روند تحلیل تاب‌آوری اندیس تاب‌آوری کل ارائه شد. در اندیس تاب‌آوری کل به‌صورت هم‌زمان به مراحل آماده‌سازی و بازیابی سیستم توجه شده است. این اندیس برآمده از ساختاری سلسله‌مراتبی است که در سطح اول آن چهار مفهوم اساسی تاب‌آوری شامل اندیس‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، کارایی سیستم PHM و تاب‌آوری سازمان مالک سیستم قرار دارند. هر کدام از مفاهیم مذکور متأثر از برخی شاخص‌های عمومی و عوامل تأثیرگذار در سطوح پایین‌تر سلسله‌مراتب بوده که دارای ضرایب اهمیت متفاوتی نیز هستند. برخی از عوامل تأثیرگذار در سطوح پایین‌تر سلسله‌مراتب وابسته به سیستم مورد مطالعه هستند و می‌بایست متناسب با آن برای تحلیل تاب‌آوری انتخاب شوند. همچنین، به‌منظور غلبه بر محدودیت دسترسی به اطلاعاتی از جنس تاب‌آوری، رویکردی مبتنی بر قضاوت کارشناسان برای تعیین وضعیت هر کدام از عوامل مؤثر که در پایین‌ترین سطح سلسله‌مراتب قرار دارند، ارائه شد. برای برآورد اندیس تاب‌آوری کل، اندازه‌گیری‌های انجام شده در مورد وضعیت فعلی

عوامل تأثیرگذار از پایین‌ترین سطح به سمت سطوح بالاتر با استفاده از روش میانگین وزنی ادغام می‌شوند. به‌طور کلی، اندیس تاب‌آوری کل روشی کاربردی بوده و به سادگی منجر به شناسایی نقاط قوت و ضعف تاب‌آوری سیستم می‌شود.

در کنار توجه به مقدار اندیس تاب‌آوری کل که بیانگر وضعیت کلی سیستم از لحاظ تاب‌آوری است، می‌بایست به وضعیت عواملی که باعث حاصل شدن این اندیس شده‌اند نیز توجه ویژه‌ای داشت. گاهی اوقات، توجه محض به اندیس تاب‌آوری کل باعث می‌شود تا مدیران سیستم از اطلاعات مربوط به عواملی که در حال حاضر وضعیت مناسبی ندارند، غافل شوند. بنابراین، توجه به وضعیت فعلی عوامل تأثیرگذار بر روی اندیس تاب‌آوری کل سیستم منجر به شناسایی نقاط قوت و ضعف تاب‌آوری سیستم در

زمینه‌های فنی (تاب‌آوری سخت) یا سازمانی (تاب‌آوری نرم) خواهد شد. این مسأله به مدیران سیستم کمک می‌کند تا بخش‌هایی از سیستم که حساس‌تر بوده و نیاز به توجه بیشتری دارند را تشخیص دهند. از این رو، امکان اجرای ارزیابی‌های دقیق‌تر برای بخش‌های شناسایی شده و نیز اتخاذ استراتژی‌های بهبود دهنده فراهم خواهد شد. اندیس تاب‌آوری کل نیز در موقعیت‌های خاصی قابل استفاده است. به‌عنوان مثال، برخی از اوقات مدیران ارشد سیستم نیازی به اطلاعات جزئی و دقیق ندارد و فقط ارائه یک اندیس واحد برای اطلاع آن‌ها کفایت می‌کند. همچنین، زمانی که مدیران به دنبال یک راه‌حل مؤثر هستند، استفاده از اندیس واحد به مقایسه راه‌حل‌های مختلف کمک می‌کند. علاوه بر این، هنگام گزارش تأثیری که تغییرات ایجاد شده در سیستم بر روی تاب‌آوری کل گذاشته‌اند (به‌عنوان مثال، اثر اصلاح سیستم PHM بر تاب‌آوری کل سیستم)، استفاده از اندیسی واحد سودمند خواهد بود.

در این رساله، معدن زغالسنگ پروده طبس به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. حوزه زغال‌دار طبس غنی‌ترین و بزرگترین ناحیه زغالی ایران محسوب می‌شود. ناحیه پروده در ۷۵ کیلومتری جنوب

شهرستان طبس قرار گرفته است. در این معدن، ذخایر کم عمق با روش اتاق و پایه و لایه‌های عمیق‌تر با استفاده از روش جبهه‌کار طولانی استخراج می‌شوند. سیستم تهویه این معدن از نوع مکشی بوده و امکان تغییر آن به حالت دهشی نیز وجود دارد. عملیات تهویه در این معدن توسط سه عدد بانک تهویه موازی با هم انجام می‌شود. بادبزن‌های محوری بانک‌های تهویه ساخت شرکت Zitron کشور اسپانیا هستند. مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن از سال ۱۳۸۵ فعالیت خود را آغاز کرده و معمولاً یک عدد از بانک‌ها عمل تهویه معدن را انجام داده و دو بانک دیگر به‌عنوان سیستم‌های پشتیبان استفاده می‌شوند. اجزای اصلی بادبزن‌های محوری شامل موتور الکتریکی، برینگ‌های سمت جلو و عقب، چرخ دوار و پره‌ها می‌شود. برق مصرفی بادبزن اصلی از طریق پست ۶۶ کیلو ولت با جریان متناوب تأمین می‌شود. مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس مجهر به مولد دیزلی اضطراری بوده و در صورت قطع جریان اصلی برق، این مولد به‌عنوان منبع تغذیه وارد مدار می‌شود. در این معدن، حسگرهای مختلفی برای پایش وضعیت اجزای مهم هر کدام از بانک‌های تهویه در نظر گرفته شده‌اند. لرزش و دمای برینگ‌های جلو و عقب، دمای سیم‌پیچ موتور و فشار هوای داخل پره‌ها با استفاده از حسگرهای نصب شده پایش شده و در گزارش‌های روزانه مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن ثبت می‌شوند. طبق بررسی‌های صورت گرفته بر روی تاریخچه فعالیت مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن مشخص شد که مشکلات عمده‌ای که بادبزن اصلی با آن‌ها دست به‌گریبان است مربوط به برینگ‌ها و یکسو کننده‌های جریان می‌شود. علاوه بر این، تحریم‌ها و عدم دسترسی به قطعات یدکی و مستندسازی ضعیف وضعیت بانک‌های تهویه را نیز باید به مشکلات فوق افزود. طبق اظهارات اعضای بخش نت، به علت ضعف گزارش‌دهی و مستندسازی ممکن است برخی از موارد پایش آمده برای بادبزن اصلی ثبت نشده باشند. این مسأله باعث می‌شود تا هر گونه تحلیل آماری بر روی اطلاعات جمع‌آوری شده از صحت و دقت کافی برخوردار نباشد. به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات لازم برای تخمین تاب‌آوری مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن، سه عدد پرسشنامه تدوین شد. تعداد سؤالات هر کدام از پرسشنامه‌ها متناسب با تعداد عوامل مؤثر بر اندیس مربوطه در سطح k ام بودند. همچنین،

نوع اختلال در نظر گرفته شده برای مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن به صورت خرابی برینگ تعریف شد. پرسشنامه‌های مذکور توسط کارشناسان مرتبط در معدن زغالسنگ پروده طبس تکمیل شدند. همان‌طور که مشاهده شد، پایایی پرسشنامه‌های تدوین شده نیز به کمک محاسبه آلفای کرونباخ تأیید شدند.

در نهایت، با استفاده از روش‌شناسی پیشنهاد شده و اطلاعات جمع‌آوری شده، تاب‌آوری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس تحلیل شد. همان‌طور که مشاهده شد، ابتدا نتایج کیفی حاصل از نظرسنجی‌های انجام شده کمی‌سازی و ادغام شدند تا امتیاز وضعیت فعلی هر کدام از عوامل مؤثر در سطح k ام سلسله مراتب تعیین شوند. در نهایت، با استفاده از امتیازات و ضرایب اهمیت به دست آمده، اندیس تاب‌آوری بادبزنی اصلی تخمین زده شد. نتایج به دست آمده باعث شناسایی نقاط قوت و ضعف تاب‌آوری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس شد. طبق نتایج حاصل شده، در حوزه اندیس قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری، وضعیت ظرفیت‌های جذب، مرمت و انطباق زیرساخت در حد متوسط رو به بالاست. در شرایط فعلی، وضعیت ظرفیت مرمت مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن در شرایط ضعیف‌تری نسبت به دو ظرفیت دیگر قرار دارد. اهمیت این ظرفیت زمانی بیشتر می‌شود که ماهیت موقتی بودن ظرفیت انطباق زیرساخت به درستی درک شود. اصلاحات موقتی هر چقدر هم که مؤثر باشند، جایگزین اصلاحات دائمی نمی‌شوند. در حال حاضر، اگرچه کاهش سرعت دوران بادبزنی برای بانک‌های شماره ۱ و ۳ مؤثر واقع شده و از شکست عملیات آن‌ها جلوگیری می‌کند، اما فرسودگی اجزای بادبزنی با گذشت زمان بیشتر شده و راهکارهای موقتی دیگر کارگشا نخواهند بود و باید به فکر راهکارهای دائمی بود. در میان شاخص‌های عمومی مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری مجموعه بادبزنی‌های اصلی معدن نیز وضعیت شاخص شرایط عملیاتی حساس‌تر از سایرین است. وضعیت تمام عوامل مؤثر بر شاخص شرایط عملیاتی نیازمند بازنگری هستند. از بین عوامل مؤثر بر عامل آموزش، وضعیت استفاده از ابزارهای آموزشی ضعیف‌تر از سایر عوامل است. همچنین، مشخص شد که در حیطه پرسنل مرتبط با مجموعه

بادبزن‌های اصلی معدن توجه زیادی به حفظ و انتقال تجربه و نیز درس‌گیری از تجربیات گذشته نمی‌شود.

در حوزه اندیس تاب‌آوری سازمانی، نتایج نشان داد که در شرایط فعلی، اندیس تاب‌آوری سازمانی شرکت زغالسنگ پروده طبس امتیازی در حد متوسط کسب می‌کند. هر کدام از چهار شاخص عمومی تأثیرگذار بر روی اندیس تاب‌آوری سازمانی در وضعیت ضعیفی قرار داشته و وضعیت شاخص حس مالکیت بحرانی‌تر از سایر شاخص‌ها است. واضح است که مدیریت شرکت در ایجاد سازوکارهایی که پرسنل را به اهداف والاتر از کارهای مرسوم که در سازمان انجام می‌دهند، متصل کنند، موفق نبوده است. تعلق خاطر نداشتن پرسنل به سازمان به دلیل نارضایتی از وضعیت جاری، به‌ویژه آن‌هایی که در خط مقدم ارتباط با مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن هستند، احتمال اجرای به‌موقع و کارآمد تصمیمات صادر شده از سوی مدیریت را کاهش می‌دهد. با این حال، در حوزه اندیس کارایی سیستم PHM وضعیت بادبزن اصلی بهتر از سایر اندیس‌ها است. واضح است که اندیس‌های قابلیت اطمینان، تعمیرپذیری، قابلیت پشتیبانی و تاب‌آوری سازمانی در شرایط مناسبی قرار ندارند. ارتقای اندیس‌های مذکور نیازمند اقدامات جدی بوده و ارائه راه‌حل‌های مناسب نیازمند بررسی‌های میدانی گسترده و شناسایی علل ریشه‌ای مشکلات است.

۶-۲- پیشنهادات

پیشنهادهای رساله به شرح زیر هستند:

- به‌کارگیری هرچه مؤثرتر مفهوم تاب‌آوری در حوزه سیستم‌های فنی، نیازمند دستیابی به درکی مناسب و صحیح از این مفهوم می‌باشد. در حال حاضر، در مورد عوامل مؤثر بر تاب‌آوری سیستم‌ها و نیز تعریف و رویکرد مناسب برای تحلیل این مفهوم ابهاماتی وجود دارد که رفع آن‌ها نیازمند مطالعات بیشتری در این زمینه است.

- وابستگی متقابل اجزای سیستم تهویه و امکان وقوع اختلالات دومینووار موضوع بسیار مهمی است که می‌توان در مطالعات آتی تاب‌آوری سیستم تهویه مورد توجه قرار گیرد.
- برخی از اختلالات احتمال وقوع بسیار کمی داشته و در مقابل عواقب بسیار شدیدی دارند و به‌طور معمول کسی انتظار وقوع آن‌ها را ندارد. به چنین اختلالاتی "black swan events" گفته می‌شود (مانند حمله تروریستی به برج‌های دوقلو شهر نیویورک در سال ۲۰۰۱). بنابراین، مدل‌سازی چنین پدیده‌هایی برای تحلیل تاب‌آوری سیستم تهویه و یا هر زیرساخت حیاتی دیگری می‌بایست در تحقیقات آتی مدنظر قرار بگیرد.
- شناسایی دلایل دقیق نقاط ضعف تاب‌آوری مجموعه بادبزن‌های اصلی معدن زغالسنگ پروده طبس با اجرای روش تحلیل علل ریشه‌ای (RCA) و ارائه راهکارهای اصلاحی برای آن‌ها.
- تحلیل تاب‌آوری شبکه تهویه و تأسیسات آن (مانند درها، هوابندها، سدها، دریچه‌ها) با در نظر گرفتن اختلالاتی همچون وقوع آتش‌سوزی و یا انفجار گاز در معدن.
- در این رساله سعی شد تا برخی از عواملی که به‌صورت بالقوه بر روی تاب‌آوری سیستم‌های فنی تأثیر می‌گذارند، شناسایی شوند. با این حال، برای افزایش دقت تحلیل تاب‌آوری در این زمینه، به مطالعات بیشتری در آینده نیاز است.

مراج

- عطایی، م.، (۱۳۹۴)، "تصمیم‌گیری چند معیاره فازی"، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، چاپ دوم.
- علیرضایی، ا.، تولایی، ر.ا.، (۱۳۸۷)، "ترغیب خلاقیت و نوآوری در میان کارکنان سازمان"، دوماهنامه توسعه انسانی پلیس، سال پنجم، شماره ۱۶.
- طیبی، س.ج.، گوهری، م.ر.، غلامی، ا.، (۱۳۹۴)، "رابطه‌ی انعطاف‌پذیری منابع انسانی و شاخص‌های عملکردی در بیمارستان‌های دانشگاه آزاد اسلامی"، مجله دانشکده پیراپزشکی دانشگاه علوم پزشکی تهران، دوره ۹، شماره ۵، ص ۴۱۵-۴۲۴.
- Abimbola, M., and Khan, F. (2019). "Resilience modeling of engineering systems using dynamic object-oriented Bayesian network approach," *Computers & Industrial Engineering*, 130, 108–118. doi:10.1016/j.cie.2019.02.022
- Adjetey-Bahun, K., Birregah, B., Châtelet, E., and Planchet, J. L. (2016). "A model to quantify the resilience of mass railway transportation systems," *Reliability Engineering & System Safety*, 153, 1–14. doi:10.1016/j.ress.2016.03.015
- Afgan, N., and Veziroglu, A. (2012). "Sustainable resilience of hydrogen energy system," *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 5461–5467. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.04.201
- Afrin, T., and Yodo, N. (2019). "Resilience-Based Recovery Assessments of Networked Infrastructure Systems under Localized Attacks," *Infrastructures*, 4, 11. doi:10.3390/infrastructures4010011
- Afrin, T., and Yodo, N. (2020). "A Survey of Road Traffic Congestion Measures towards a Sustainable and Resilient Transportation System," *Sustainability*, 12, 4660. doi:10.3390/su12114660
- Ahmadian, N., Lim, G. J., Cho, J., and Bora, S. (2020). "A quantitative approach for assessment and improvement of network resilience," *Reliability Engineering & System Safety*, 200, 106977. doi:10.1016/j.ress.2020.106977
- Ahmed, S., Dey, K., and Fries, R. (2019). "Evaluation of Transportation System Resilience in the Presence of Connected and Automated Vehicles," *Transportation Research Record*, 2673, 562–574. doi:10.1177/0361198119848702
- Amirioun, M. H., Aminifar, F., Lesani, H., and Shahidehpour, M. (2019). "Metrics and quantitative framework for assessing microgrid resilience against windstorms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104, 716–723. doi:10.1016/j.ijepes.2018.07.025
- Assad, A., Moselhi, O., and Zayed, T. (2019). "A New Metric for Assessing Resilience of Water Distribution Networks," *Water*, 11, 1701. doi:10.3390/w11081701
- Aydin, N. Y., Duzgun, H. S., Heinemann, H. R., Wenzel, F., and Gnyawali, K. R. (2018a). "Framework for improving the resilience and recovery of transportation networks under geohazard risks," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 832–843. doi:10.1016/j.ijdrr.2018.07.022
- Aydin, N. Y., Duzgun, H. S., Wenzel, F., and Heinemann, H. R. (2018b). "Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards," *Natural Hazards*, 91, 37–68. doi:10.1007/s11069-017-3112-z

- Ayyub, B. M. (2014). "Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making," *Risk Anal*, 34, 340–355.
- Azadeh, A., Siadatian, R., Rezaei-Malek, M., and Rouhollah, F. (2017). "Optimization of supplier selection problem by combined customer trust and resilience engineering under uncertainty," *Int J Syst Assur Eng Manag*, 8, 1553–1566. doi:10.1007/s13198-017-0628-2
- Bao, M., Ding, Y., Sang, M., Li, D., Shao, C., and Yan, J. (2020). "Modeling and evaluating nodal resilience of multi-energy systems under windstorms," *Applied Energy*, 270, 115136. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115136
- Barabadi, A., and Ayele, Y. Z. (2018a). "Post-disaster infrastructure recovery: Prediction of recovery rate using historical data," *Reliability Engineering & System Safety*, 169, 209–223. doi:10.1016/j.ress.2017.08.018
- Barabadi, A., and Ayele, Y. Z. (2018b). "Post-disaster infrastructure recovery: Prediction of recovery rate using historical data," *Reliability Engineering & System Safety*, 169, 209–223. doi:10.1016/j.ress.2017.08.018
- Barabadi, A., Ghiasi, M. H., Nouri Qarahasanlou, A., and Mottahedi, A. (2020). "A Holistic View of Health Infrastructure Resilience Before and After COVID-19," *The Archives of Bone & Joint Surgery*. doi:10.22038/abjs.2020.47817.2360
- Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E., and Rocco, C. M. (2013). "Resilience-based network component importance measures," *Reliability Engineering & System Safety*, 117, 89–97. doi:10.1016/j.ress.2013.03.012
- Baroud, H., and Barker, K. (2018). "A Bayesian kernel approach to modeling resilience-based network component importance," *Reliability Engineering & System Safety*, 170, 10–19. doi:10.1016/j.ress.2017.09.022
- Baroud, H., Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E., and Rocco S., C. M. (2014a). "Importance measures for inland waterway network resilience," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 55–67. doi:10.1016/j.tre.2013.11.010
- Baroud, H., Ramirez-Marquez, J. E., Barker, K., and Rocco, C. M. (2014b). "Stochastic Measures of Network Resilience: Applications to Waterway Commodity Flows: Stochastic Measures of Network Resilience," *Risk Analysis*, 34, 1317–1335. doi:10.1111/risa.12175
- Baziuk, P. A., Rivera, S. S., and Núñez Mc Leod, J. (2016). "Fuzzy Human Reliability Analysis: Applications and Contributions Review," *Advances in Fuzzy Systems*, 2016, 1–9. doi:10.1155/2016/4612086
- Bea, R. G. (2005). "Design for Reliability: Human and Organisational Factors," *Handbook of Offshore Engineering*, Elsevier, pp. 939–999. doi:10.1016/B978-0-08-044381-2.50019-9
- Behzadian, K., Kapelan, Z., and Morley, M. S. (2014). "Resilience-based Performance Assessment of Water-recycling Schemes in Urban Water Systems," *Procedia Engineering*, 89, 719–726. doi:10.1016/j.proeng.2014.11.499

- Binder, C., Mühlemeier, S., and Wyss, R. (2017). "An Indicator-Based Approach for Analyzing the Resilience of Transitions for Energy Regions. Part I: Theoretical and Conceptual Considerations," *Energies*, 10, 36. doi:10.3390/en10010036
- Bragatto, T., Cresta, M., Cortesi, F., Gatta, F., Geri, A., Maccioni, M., and Paulucci, M. (2019). "Assessment and Possible Solution to Increase Resilience: Flooding Threats in Terni Distribution Grid," *Energies*, 12, 744. doi:10.3390/en12040744
- Brown, C., Seville, E., and Vargo, J. (2017). "Measuring the organizational resilience of critical infrastructure providers: A New Zealand case study," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 18, 37–49. doi:10.1016/j.ijcip.2017.05.002
- Brugnetti, E., Coletta, G., De Caro, F., Vaccaro, A., and Villacci, D. (2020). "Enabling Methodologies for Predictive Power System Resilience Analysis in the Presence of Extreme Wind Gusts," *Energies*, 13, 3501. doi:10.3390/en13133501
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A., Shinozuka, M., et al. (2003). "A framework to Quantitatively assess and enhance the science the seismic resilience of communities," *Earthquake Spectra*, 19, 733–752.
- Buchanan, R., Goerger, S., Rinaudo, C., Parnell, G., Ross, A., and Sitterle, V. (2018). "Resilience in engineered resilient systems," *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*. doi:10.1177/1548512918777901
- Cai, B., Xie, M., Liu, Y., Liu, Y., and Feng, Q. (2018). "Availability-based engineering resilience metric and its corresponding evaluation methodology," *Reliability Engineering & System Safety*, 172, 216–224. doi:10.1016/j.ress.2017.12.021
- Cai, B., Zhang, Y., Wang, H., Liu, Y., Ji, R., Gao, C., Kong, X., et al. (2021). "Resilience evaluation methodology of engineering systems with dynamic-Bayesian-network-based degradation and maintenance," *Reliability Engineering & System Safety*, 209, 107464. doi:10.1016/j.ress.2021.107464
- Carlsson, C., and Fullér, R. (2001). "On possibilistic mean value and variance of fuzzy numbers," *Fuzzy Sets and Systems*, 122, 315–326. doi:10.1016/S0165-0114(00)00043-9
- Carroll, P., Chesser, M., and Lyons, P. (2020). "Air Source Heat Pumps field studies: A systematic literature review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110275. doi:10.1016/j.rser.2020.110275
- Cassottana, B., Shen, L., and Tang, L. C. (2019). "Modeling the recovery process: A key dimension of resilience," *Reliability Engineering & System Safety*, 190, 106528. doi:10.1016/j.ress.2019.106528
- Cerè, G., Rezugui, Y., and Zhao, W. (2019). "Urban-scale framework for assessing the resilience of buildings informed by a delphi expert consultation," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 101079. doi:10.1016/j.ijdrr.2019.101079
- Chacón-Luna, A. E., Gutiérrez, A. M., Galindo, J. A., and Benavides, D. (2020). "Empirical software product line engineering: A systematic literature review," *Information and Software Technology*, 128, 106389. doi:10.1016/j.infsof.2020.106389
- Chalishazar, V. H., Brekken, T. K. A., Johnson, D., Yu, K., Newell, J., Chin, K., Weik, R., et al. (2020). "Connecting Risk and Resilience for a Power System Using the Portland Hills Fault Case Study," *Processes*, 8, 1200. doi:10.3390/pr8101200

- Charani Shandiz, S., Foliente, G., Rismanchi, B., Wachtel, A., and Jeffers, R. F. (2020). "Resilience framework and metrics for energy master planning of communities," *Energy*, 203, 117856. doi:10.1016/j.energy.2020.117856
- Chen, C., Xu, L., Zhao, D., Xu, T., and Lei, P. (2020a). "A new model for describing the urban resilience considering adaptability, resistance and recovery," *Safety Science*, 128, 104756. doi:10.1016/j.ssci.2020.104756
- Chen, C. T., Lin, C. T., and Huang, S. F. (2006). "A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management," *International Journal of Production Economics*, 102, 289–301. doi:10.1016/j.ijpe.2005.03.009
- Chen, H., Cullinane, K., and Liu, N. (2017). "Developing a model for measuring the resilience of a port-hinterland container transportation network," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97, 282–301. doi:10.1016/j.tre.2016.10.008
- Chen, Z., Zhao, T., Jiao, J., and Chu, J. (2020b). "Performance-threshold-based resilience analysis of system of systems by considering dynamic reconfiguration," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, doi:10.1177/0954405420937528
- Cheng, C., Bai, G., Zhang, Y. A., and Tao, J. (2020). "Improved integrated metric for quantitative assessment of resilience," *Advances in Mechanical Engineering*, 12, doi:10.1177/1687814020906065
- Cheng, J., Zhou, F., and Yang, S. (2014). "A reliability allocation model and application in designing a mine ventilation system," *Iranian Journal of Science and Technology*, 38, 61–73. doi:10.22099/IJSTC.2014.1844
- Ciapessoni, E., Cirio, D., Pitto, A., and Sforna, M. (2020). "Quantification of the Benefits for Power System of Resilience Boosting Measures," *Applied Sciences*, 10, 5402. doi:10.3390/app10165402
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., and Bruneau, M. (2010a). "Framework for analytical quantification of disaster resilience," *Engineering Structures*, 32, 3639–3649. doi:10.1016/j.engstruct.2010.08.008
- Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., and Bruneau, M. (2010b). "Seismic resilience of a hospital system," *Structure and Infrastructure Engineering*, 6, 127–177.
- Cimino, A., Longo, F., and Mirabelli, G. (2009). "A multimeasure-based methodology for the ergonomic effective design of manufacturing system workstations," *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 447–455. doi:10.1016/j.ergon.2008.12.004
- Cox, A., Prager, F., and Rose, A. (2011). "Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics," *Transport Policy*, 18, 307–317. doi:10.1016/j.tranpol.2010.09.004
- Croope, S. V., and McNeil, S. (2011). "Improving Resilience of Critical Infrastructure Systems Postdisaster: Recovery and Mitigation," *Transportation Research Record*, 2234, 3–13. doi:10.3141/2234-01
- Cutini, V., and Pezzica, C. (2020). "Street Network Resilience Put to the Test: The Dramatic Crash of Genoa and Bologna Bridges," *Sustainability*, 12, 4706. doi:10.3390/su12114706

- Cutter, S. L., Burton, C. G., and Emrich, C. T. (2010). "Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions," *Journal of Homeland Security and Emergency Management*. doi:10.2202/1547-7355.1732
- Das, B., and Sengupta, A. K. (1996). "Industrial workstation design: A systematic ergonomics approach," *Applied Ergonomics*, 27, 157–163. doi:10.1016/0003-6870(96)00008-7
- Das, R. (2020). "Approach for measuring transportation network resiliency: A case study on Dhaka, Bangladesh," *Case Studies on Transport Policy*, 8, 586–592. doi:10.1016/j.cstp.2020.04.001
- Deci, E. L., Olafsen, A. H., and Ryan, R. M. (2017). "Self-Determination Theory in Work Organizations: The State of a Science," *Annu. Rev. Organ. Psychol. Organ. Behav.*, 4, 19–43. doi:10.1146/annurev-orgpsych-032516-113108
- Deighton, M. G. (2016). "Facility integrity management: effective principles and practices for the oil, gas and petrochemical industries," Gulf Professional Publishing, Cambridge, MA, 236 pages.
- Denyer, D. (2017). "Organizational Resilience: A summary of academic evidence," business insights and new thinking BSI and Cranfield School of Management.
- Diallo, C., Ait-Kadi, D., and Chelbi, A. (2012). "An integrated approach for spare parts provisioning," *Frontiers in Science and Engineering*, 1-14.
- Diao, K., Sweetapple, C., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., and Butler, D. (2016). "Global resilience analysis of water distribution systems," *Water Research*, 106, 383–393. doi:10.1016/j.watres.2016.10.011
- Dinh, L. T. T., Pasman, H., Gao, X., and Mannan, M. S. (2012). "Resilience engineering of industrial processes: Principles and contributing factors," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 233–241. doi:10.1016/j.jlp.2011.09.003
- D'Lima, M., and Medda, F. (2015). "A new measure of resilience: An application to the London Underground," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 35–46. doi:10.1016/j.tra.2015.05.017
- Ebrahimabadi, A., Azimipour, M., and Bahreini, A. (2015). "Prediction of roadheaders' performance using artificial neural network approaches (MLP and KOSFM)," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7, 573–583. doi:10.1016/j.jrmge.2015.06.008
- Eljaoued, W., Yahia, N. B., and Ben Saoud, N. B. (2020). "A Qualitative-Quantitative Resilience Assessment Approach for Socio-technical Systems," *Procedia Computer Science*, 176, 2625–2634. doi:10.1016/j.procs.2020.09.305
- Engler, E., Baldauf, M., Banyś, P., Heymann, F., Gucma, M., and Sill Torres, F. (2019). "Situation Assessment—An Essential Functionality for Resilient Navigation Systems," *JMSE*, 8, 17. doi:10.3390/jmse8010017
- Enjalbert, E., Vanderhaegen, F., Pichon, M., Ouedraogo, K. A., and Millot, P. (2011). "Assessment of Transportation System Resilience," In P. Cacciabue, M. Hjalmdahl, A. Luedtke, and C. Riccioli (Eds.), *Human Modelling in Assisted Transportation*, Springer, Millan, pp. 335–341.

- Espinoza, S., Panteli, M., Mancarella, P., and Rudnick, H. (2016). "Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards," *Electric Power Systems Research*, 136, 352–361. doi:10.1016/j.epsr.2016.03.019
- Faber, M. H., Qin, J., Miraglia, S., and Thöns, S. (2017). "On the Probabilistic Characterization of Robustness and Resilience," *Procedia Engineering*, 198, 1070–1083. doi:10.1016/j.proeng.2017.07.151
- Fang, Y., Pedroni, N., and Zio, E. (2015). "Optimization of Cascade-Resilient Electrical Infrastructures and its Validation by Power Flow Modeling: Optimization and Validation of Cascade-Resilient Electrical Infrastructures," *Risk Analysis*, 35, 594–607. doi:10.1111/risa.12396
- Faturechi, R., Levenberg, E., and Miller-Hooks, E. (2014). "Evaluating and optimizing resilience of airport pavement networks," *Computers & Operations Research*, 43, 335–348.
- Feofilovs, M., and Romagnoli, F. (2017). "Resilience of critical infrastructures: probabilistic case study of a district heating pipeline network in municipality of Latvia," *Energy Procedia*, 128, 17–23. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.007
- Filippone, E., Gargiulo, F., Errico, A., Di Vito, V., and Pascarella, D. (2016). "Resilience management problem in ATM systems as a shortest path problem," *Journal of Air Transport Management*, 56, 57–65. doi:10.1016/j.jairtraman.2016.03.014
- Fock, H., Chiang, F., Au, K. Y., and Hui, M. K. (2011). "The moderating effect of collectivistic orientation in psychological empowerment and job satisfaction relationship," *International Journal of Hospitality Management*, 30, 319–328. doi:10.1016/j.ijhm.2010.08.002
- Fotouhi, H., Moryadee, S., and Miller-Hooks, E. (2017). "Quantifying the resilience of an urban traffic-electric power coupled system," *Reliability Engineering & System Safety*, 163, 79–94. doi:10.1016/j.res.2017.01.026
- Francis, R., and Bekera, B. (2014). "A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems," *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 90–103. doi:10.1016/j.res.2013.07.004
- Frohman, A. L. (1997). "Igniting organizational change from below: The power of personal initiative," *Organizational Dynamics*, 25, 39–53. doi:10.1016/S0090-2616(97)90046-2
- Galbusera, L., Giannopoulos, G., Argyroudis, S., and Kakderi, K. (2018). "A Boolean Networks Approach to Modeling and Resilience Analysis of Interdependent Critical Infrastructures: A Boolean networks approach to critical infrastructure modeling," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33, 1041–1055. doi:10.1111/mice.12371
- Gama Dessavre, D., Ramirez-Marquez, J. E., and Barker, K. (2016). "Multidimensional approach to complex system resilience analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, 149, 34–43. doi:10.1016/j.res.2015.12.009
- Garg, H., Rani, M., and Sharma, S. P. (2013). "Preventive maintenance scheduling of the pulping unit in a paper plant," *Japan J. Indust. Appl. Math*, 30, 397–414.

- Gautam, P., Piya, P., and Karki, R. (2020). "Resilience Assessment of Distribution Systems Integrated with Distributed Energy Resources," *IEEE Trans. Sustain. Energy*. doi:10.1109/TSTE.2020.2994174
- Ghodrati, B. (2005). "Reliability and operating environment based spare parts planning," Ph.D Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 201 pages.
- Ghodrati, B., Banjevic, D., and Jardine, A. K. S. (2010). "Developing effective spare parts estimations results in improved system availability," 2010 Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), IEEE, San Jose, CA, USA, 1–6. Presented at the 2010 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). doi:10.1109/RAMS.2010.5447985
- Goldbeck, N., Angeloudis, P., and Ochieng, W. Y. (2019). "Resilience assessment for interdependent urban infrastructure systems using dynamic network flow models," *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 62–79. doi:10.1016/j.res.2019.03.007
- Gong, J., and You, F. (2018). "Resilient design and operations of process systems: Nonlinear adaptive robust optimization model and algorithm for resilience analysis and enhancement," *Computers & Chemical Engineering*, 116, 231–252. doi:10.1016/j.compchemeng.2017.11.002
- Goyal, M., Lu, J., and Zhang, G. (2008). "Decision Making in Multi-Issue e-Market Auction Using Fuzzy Techniques and Negotiable Attitudes," *J. theor. appl. electron. commer. res.* doi:10.4067/S0718-18762008000100009
- Guo, Q., Amin, S., Hao, Q., and Haas, O. (2020). "Resilience assessment of safety system at subway construction sites applying analytic network process and extension cloud models," *Reliability Engineering & System Safety*, 201, 106956. doi:10.1016/j.res.2020.106956
- Han, F., and Zhang, S. (2020). "Evaluation of Spatial Resilience of Highway Networks in Response to Adverse Weather Conditions," *IJGI*, 9, 480. doi:10.3390/ijgi9080480
- Haque, M. A., De Teyou, G. K., Shetty, S., and Krishnappa, B. (2018). "Cyber Resilience Framework for Industrial Control Systems: Concepts, Metrics, and Insights," 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI), IEEE, Miami, FL, 25–30. Presented at the 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI). doi:10.1109/ISI.2018.8587398
- Harrison, D. A., Newman, D. A., and Roth, P. L. (2006). "How Important are Job Attitudes? Meta-Analytic Comparisons of Integrative Behavioral Outcomes and Time Sequences," *AMJ*, 49, 305–325. doi:10.5465/amj.2006.20786077
- Harwell, M. A., Cropper, W. P., and Ragsdale, H. L. (1981). "Analyses of transient characteristics of a nutrient cycling model," *Ecological Modelling*, 12, 105–131. doi:10.1016/0304-3800(81)90027-2
- Heeks, R., and Ospina, A. V. (2019). "Conceptualising the link between information systems and resilience: A developing country field study," *Info Systems J*, 29, 70–96. doi:10.1111/isj.12177
- Henry, D., and Emmanuel Ramirez-Marquez, J. (2012). "Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time," *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 114–122. doi:10.1016/j.res.2011.09.002

- Herrera, E. K., Flannery, A., and Krimmer, M. (2017). "Risk and Resilience Analysis for Highway Assets," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. doi:dx.doi.org/10.3141/2604-01
- Holling, C. S. (1973). "Resilience and stability of ecological systems," *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23.
- Hollins, L., Eisenberg, D., and Seager, T. (2018). "Risk and Resilience at the Oroville Dam," *Infrastructures*, 3, 49. doi:10.3390/infrastructures3040049
- Hollnagel, E., Woods, D. D., and Leveson, N. (2006). *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*, Ashgate, Aldershot, UK.
- Hoseinie, S. H., Heydari, S., Ghodrati, B., and Kumar, U. (2020). "Resilience measurement of longwall machinery," *MGPB*, 35, 39–44. doi:10.17794/rgn.2020.3.4
- Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., and Kumar, U. (2012a). "Reliability analysis of the cable system of drum shearer using the power law process model," *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 26, 309–323. doi:10.1080/17480930.2011.622477
- Hoseinie, S. H., Ataei, M., Khalokakaie, R., Ghodrati, B., and Kumar, U. (2012b). "Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18, 98–119. doi:10.1108/13552511211226210
- Hossain, N. U. I., Jaradat, R., Hosseini, S., Marufuzzaman, M., and Buchanan, R. K. (2019a). "A framework for modeling and assessing system resilience using a Bayesian network: A case study of an interdependent electrical infrastructure system," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 25, 62–83. doi:10.1016/j.ijcip.2019.02.002
- Hossain, N. U. I., Nur, F., Hosseini, S., Jaradat, R., Marufuzzaman, M., and Puryear, S. M. (2019b). "A Bayesian network based approach for modeling and assessing resilience: A case study of a full service deep water port," *Reliability Engineering & System Safety*, 189, 378–396. doi:10.1016/j.ress.2019.04.037
- Hosseini, S., and Barker, K. (2016). "Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: A case study of inland waterway ports," *Computers & Industrial Engineering*, 93, 252–266. doi:10.1016/j.cie.2016.01.007
- Hosseini, S., Barker, K., and Ramirez-Marquez, J. E. (2016). "A review of definitions and measures of system resilience," *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47–61. doi:10.1016/j.ress.2015.08.006
- Hosseini, S., and Ivanov, D. (2019). "A new resilience measure for supply networks with the ripple effect considerations: a Bayesian network approach," *Ann Oper Res*, , doi: 10.1007/s10479-019-03350-8. doi:10.1007/s10479-019-03350-8
- Hsieh, C. H., and Feng, C. M. (2018). "The highway resilience and vulnerability in Taiwan," *Transport Policy*, , doi: 10.1016/j.tranpol.2018.08.010. doi:10.1016/j.tranpol.2018.08.010
- Hu, Z., and Mahadevan, S. (2016). "Resilience Assessment Based on Time-Dependent System Reliability Analysis," *Journal of Mechanical Design*, , doi: 10.1115/1.4034109. doi:10.1115/1.4034109

- Huang, H., and Zhang, D. (2016). "Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51, 301–312. doi:10.1016/j.tust.2015.10.044
- Ibrahim, M., and Alkhraibat, A. (2020). "Resiliency Assessment of Microgrid Systems," *Applied Sciences*, 10, 1824. doi:10.3390/app10051824
- Izadi, A., Yazdandoost, F., and Ranjbar, R. (2020). "Asset-Based Assessment of Resiliency in Water Distribution Networks," *Water Resour Manage*, 34, 1407–1422. doi:10.1007/s11269-020-02508-5
- Jain, P., Pasman, H. J., Waldram, S., Pistikopoulos, E. N., and Mannan, M. S. (2018). "Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 61–73. doi:10.1016/j.jlp.2017.08.006
- Jain, P., Pistikopoulos, E. N., and Mannan, M. S. (2019). "Process resilience analysis based data-driven maintenance optimization: Application to cooling tower operations," *Computers & Chemical Engineering*, 121, 27–45. doi:10.1016/j.compchemeng.2018.10.019
- Javed, K., Gouriveau, R., Zerhouni, N., and Nectoux, P. (2015). "Enabling Health Monitoring Approach Based on Vibration Data for Accurate Prognostics," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 62, 647–656. doi:10.1109/TIE.2014.2327917
- Jin, J. G., Tang, L. C., Sun, L., and Lee, D. H. (2014). "Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 63, 17–30. doi:10.1016/j.tre.2014.01.002
- Jin, X., and Gu, X. (2016). "Option-Based Design for Resilient Manufacturing Systems," *IFAC-PapersOnLine*, 49, 1602–1607. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.809
- Kammouh, O., and Cimellaro, G. P. (2018). "PEOPLES: A Tool to Measure Community Resilience," *Structures Conference 2018*, American Society of Civil Engineers, Fort Worth, Texas, 161–171. Presented at the Structures Conference 2018. doi:10.1061/9780784481349.015
- Kammouh, O., Dervishaj, G., and Cimellaro, G. P. (2017). "A New Resilience Rating System for Countries and States," *Procedia Engineering*, 198, 985–998. doi:10.1016/j.proeng.2017.07.144
- Kammouh, O., Gardoni, P., and 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. doi:10.1016/j.ress.2020.106813
- Kammouh, O., Noori, A. Z., Taurino, V., Mahin, S. A., and Cimellaro, G. P. (2018). "Deterministic and fuzzy-based methods to evaluate community resilience," *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 17, 261–275. doi:10.1007/s11803-018-0440-2
- Kammouh, O., Zamani Noori, A., Cimellaro, G. P., and Mahin, S. A. (2019). "Resilience Assessment of Urban Communities," *ASCE-ASME J. Risk Uncertainty Eng. Syst., Part A: Civ. Eng.*, 5, 04019002. doi:10.1061/AJRUA6.0001004

- Kandaperumal, G., and Srivastava, A. K. (2020). "Resilience of the electric distribution systems: concepts, classification, assessment, challenges, and research needs," *IET Smart Grid*, 3, 133–143. doi:10.1049/iet-stg.2019.0176
- Kanfer, R., and Chen, G. (2016). "Motivation in organizational behavior: History, advances and prospects," *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 136, 6–19. doi:10.1016/j.obhdp.2016.06.002
- Karangelos, E., Perkin, S., and Wehenkel, L. (2020). "Probabilistic Resilience Analysis of the Icelandic Power System under Extreme Weather," *Applied Sciences*, 10, 5089. doi:10.3390/app10155089
- Kelly, A. (2006). "Maintenance systems and documentation," 1st ed, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam.
- Khaghani, F., and Jazizadeh, F. (2020). "mD-Resilience: A Multi-Dimensional Approach for Resilience-Based Performance Assessment in Urban Transportation," *Sustainability*, 12, 4879. doi:10.3390/su12124879
- Kim, D. H., Eisenberg, D. A., Chun, Y. H., and Park, J. (2017). "Network topology and resilience analysis of South Korean power grid," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 465, 13–24. doi:10.1016/j.physa.2016.08.002
- Kitchenham, B. (2004). "Procedures for performing systematic reviews (Joint Technical Report No. TR/SE-0401)," United Kingdom: Software Engineering Group, Keele University.
- Kitchenham, B., Brereton, O., Budgen, D., Turner, M., and Bailey, J. (2009). "Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review," *Information and Software Technology*, 51, 7–15
- Kitchenham, B., and Charters, S. (2007). "Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (Technical report No. EBSE-2007-01)," Keele University and University of Durham
- Klise, K. A., Bynum, M., Moriarty, D., and Murray, R. (2017). "A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study," *Environmental Modelling & Software*, 95, 420–431. doi:10.1016/j.envsoft.2017.06.022
- Koc, E., Cetiner, B., Rose, A., Soibelman, L., Taciroglu, E., and Wei, D. (2020). "CRAFT: Comprehensive Resilience Assessment Framework for Transportation Systems in Urban Areas," *Advanced Engineering Informatics*, 46, 101159. doi:10.1016/j.aei.2020.101159
- Komljenovic, D., Stojanovic, L., Malbasic, V., and Lukic, A. (2020). "A resilience-based approach in managing the closure and abandonment of large mine tailing ponds," *International Journal of Mining Science and Technology*, 30, 737–746. doi:10.1016/j.ijmst.2020.05.007
- Kong, J., and Simonovic, S. P. (2019). "Probabilistic Multiple Hazard Resilience Model of an Interdependent Infrastructure System," *Risk Analysis*, 39, 1843–1863. doi:10.1111/risa.13305

- Kong, J., Simonovic, S. P., and Zhang, C. (2019a). "Sequential Hazards Resilience of Interdependent Infrastructure System: A Case Study of Greater Toronto Area Energy Infrastructure System," *Risk Analysis*, 39, 1141–1168. doi:10.1111/risa.13222
- Kong, J., Zhang, C., and Simonovic, S. P. (2019b). "A Two-Stage Restoration Resource Allocation Model for Enhancing the Resilience of Interdependent Infrastructure Systems," *Sustainability*, 11, 5143. doi:10.3390/su11195143
- Kong, Simonovic, and Zhang (2019c). "Resilience Assessment of Interdependent Infrastructure Systems: A Case Study Based on Different Response Strategies," *Sustainability*, 11, 6552. doi:10.3390/su11236552
- Kumar, S. A., Subathra, M. S. P., Kumar, N. M., Malvoni, M., Sairamya, N. J., George, S. T., Suviseshamuthu, E. S., et al. (2020). "A Novel Islanding Detection Technique for a Resilient Photovoltaic-Based Distributed Power Generation System Using a Tunable-Q Wavelet Transform and an Artificial Neural Network," *Energies*, 13, 4238. doi:10.3390/en13164238
- Kumar, U., Knights, P., and Kuruppu, M. (2011). "Mine infrastructure maintenance," In P. Darling (Ed.), *SME Mining engineering handbook*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, USA, 3rd ed.
- Kumari, P., and Kaur, P. (2018). "A survey of fault tolerance in cloud computing," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. doi:10.1016/j.jksuci.2018.09.021
- Labaka, L., Hernantes, J., and Sarriegi, J. M. (2015). "Resilience framework for critical infrastructures: An empirical study in a nuclear plant," *Reliability Engineering & System Safety*, 141, 92–105. doi:10.1016/j.ress.2015.03.009
- Landegren, F., Höst, M., and Möller, P. (2018). "Simulation based assessment of resilience of two large-scale socio-technical IT networks," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 23, 112–125. doi:10.1016/j.ijcip.2018.08.003
- Lau, E., Chai, K., Chen, Y., and Loo, J. (2018). "Efficient Economic and Resilience-Based Optimization for Disaster Recovery Management of Critical Infrastructures," *Energies*, 11, 3418. doi:10.3390/en11123418
- Lavissière, A., Sohier, R., and Lavissière, M. C. (2020). "Transportation systems in the Arctic: A systematic literature review using textometry," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 130–146. doi:10.1016/j.tra.2020.09.003
- Lee, M. T., and Raschke, R. L. (2016). "Understanding employee motivation and organizational performance: Arguments for a set-theoretic approach," *Journal of Innovation & Knowledge*, 1, 162–169. doi:10.1016/j.jik.2016.01.004
- Lengnick-Hall, C. A., Beck, T. E., and Lengnick-Hall, M. L. (2011). "Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management," *Human Resource Management Review*, 21, 243–255. doi:10.1016/j.hrmr.2010.07.001
- Lengnick-Hall, M. L., and Bereman, N. A. (1994). "A conceptual framework for the study of employee benefits," *Human Resource Management Review*, 4, 101–115. doi:10.1016/1053-4822(94)90023-X

- Leobons, C. M., Gouvêa Campos, V. B., and Mello Bandeira, R. A. de (2019). "Assessing Urban Transportation Systems Resilience: A Proposal of Indicators," *Transportation Research Procedia*, 37, 322–329. doi:10.1016/j.trpro.2018.12.199
- Li, C., Fang, Q., Ding, L., Cho, Y. K., and Chen, K. (2020). "Time-dependent resilience analysis of a road network in an extreme environment," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85, 102395. doi:10.1016/j.trd.2020.102395
- Li, R., Dong, Q., Jin, C., and Kang, R. (2017). "A New Resilience Measure for Supply Chain Networks," *Sustainability*, 9, 144. doi:10.3390/su9010144
- Li, X. Y., Fan, Z. B., Lu, T., Xiao, T., and Zhang, L. M. (2018). "A Resilience Model for Engineered Slopes Subject to Anchor Corrosion," *KSCE J Civ Eng*, 22, 887–895. doi:10.1007/s12205-018-1041-3
- Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W., Lambert, J. H., et al. (2014). "Changing the resilience paradigm," *Nature Clim Change*, 4, 407–409. doi:10.1038/nclimate2227
- Liu, W., Song, Z., and Ouyang, M. (2020a). "Lifecycle operational resilience assessment of urban water distribution networks," *Reliability Engineering & System Safety*, 198, 106859. doi:10.1016/j.ress.2020.106859
- Liu, X., Ferrario, E., and Zio, E. (2019a). "Identifying resilient-important elements in interdependent critical infrastructures by sensitivity analysis," *Reliability Engineering & System Safety*. doi:10.1016/j.ress.2019.04.017
- Liu, X., Hou, K., Jia, H., Mu, Y., Ma, S., Wang, F., and Lei, Y. (2019b). "The Impact-increment State Enumeration Method Based Component Level Resilience Indices of Transmission System," *Energy Procedia*, 158, 4099–4103. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.825
- Liu, X., Hou, K., Jia, H., Zhao, J., Mili, L., Mu, Y., Rim, J., et al. (2020b). "A resilience assessment approach for power system from perspectives of system and component levels," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105837. doi:10.1016/j.ijepes.2020.105837
- Liu, X., Liu, J., Zhao, S., and Tang, L. C. (2013). "Modeling and Simulation on a Resilient Water Supply System Under Disruptions," In Y. K. Lin, Y. C. Tsao, and S. W. Lin (Eds.), *Proceedings of the Institute of Industrial Engineers Asian Conference 2013*, Springer Singapore, Singapore, pp. 1385–1393. doi:10.1007/978-981-4451-98-7_163
- Liu, Y., Li, X., and Xiao, L. (2018). "Service Oriented Resilience Strategy for Cloud Data Center," *2018 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)*, IEEE, Lisbon, Portugal, 269–274. Presented at the 2018 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C). doi:10.1109/QRS-C.2018.00056
- Lu, Q. C. (2018). "Modeling network resilience of rail transit under operational incidents," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 117, 227–237. doi:10.1016/j.tra.2018.08.015
- Luthans, F., Youssef, C. M., and Avolio, B. J. (2015). *Psychological capital and beyond*, Oxford University Press, Oxford ; New York, 318 pages

- Lv, W. D., Tian, D., Wei, Y., and Xi, R. X. (2018). "Innovation Resilience: A New Approach for Managing Uncertainties Concerned with Sustainable Innovation," *Sustainability*, 10, 3641. doi:10.3390/su10103641
- Ma, S., Carrington, N., Arif, A., and Wang, Z. (2019). "Resilience Assessment of Self-healing Distribution Systems Under Extreme Weather Event, , 2019, pp. 1-5, doi: .," 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), IEEE, Atlanta, GA, USA, 1–5. doi:10.1109/PESGM40551.2019.8974122
- MacKenzie, C. A., and Hu, C. (2018). "Decision making under uncertainty for design of resilient engineered systems," *Reliability Engineering & System Safety*. doi:10.1016/j.res.2018.05.020
- MacKenzie, C. A., and Zobel, C. W. (2016). "Allocating Resources to Enhance Resilience, with Application to Superstorm Sandy and an Electric Utility: Allocating Resources to Enhance Resilience," *Risk Analysis*, 36, 847–862. doi:10.1111/risa.12479
- Maheshwari, Z., and Ramakumar, R. (2020). "An Approach for Resilience Assessment of Smart Integrated Renewable Energy System (SIRES)," 2020 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC), IEEE, Manhattan, KS, USA, 1–6. Presented at the 2020 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC). doi:10.1109/KPEC47870.2020.9167559
- Malandri, C., Mantecchini, L., and Postorino, M. N. (2017). "Airport Ground Access Reliability and Resilience of Transit Networks: a Case Study," *Transportation Research Procedia*, 27, 1129–1136. doi:10.1016/j.trpro.2017.12.022
- Manikas, K., and Hansen, K. M. (2013). "Software ecosystems – A systematic literature review," *Journal of Systems and Software*, 86, 1294–1306. doi:10.1016/j.jss.2012.12.026
- Mao, Q., and Li, N. (2018). "Assessment of the impact of interdependencies on the resilience of networked critical infrastructure systems," *Nat Hazards*, 93, 315–337. doi:10.1007/s11069-018-3302-3
- Matelli, J. A., and Goebel, K. (2018). "Conceptual design of cogeneration plants under a resilient design perspective: Resilience metrics and case study," *Applied Energy*, 215, 736–750. doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.081
- Mathias, J. D., Clark, S., Onat, N., and Seager, T. (2018). "An Integrated Dynamical Modeling Perspective for Infrastructure Resilience," *Infrastructures*, 3, 11. doi:10.3390/infrastructures3020011
- Mebarki, A. (2017a). "Safety of atmospheric industrial tanks: Fragility, resilience and recovery functions," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 590–602. doi:10.1016/j.jlp.2017.06.007
- Mebarki, A. (2017b). "Resilience: Theory and metrics-a metal structure as demonstrator," *Engineering Structures*, 138, 425–433. doi:10.1016/j.engstruct.2017.02.026
- Meng, F., Fu, G., Farmani, R., Sweetapple, C., and Butler, D. (2018). "Topological attributes of network resilience: A study in water distribution systems," *Water Research*, 143, 376–386. doi:10.1016/j.watres.2018.06.048

- Miles, S. B., and Chang, S. E. (2011). "ResilUS: A Community Based Disaster Resilience Model," *Cartography and Geographic Information Science*, 38, 36–51. doi:10.1559/1523040638136
- Moslehi, S., and Reddy, T. A. (2018). "Sustainability of integrated energy systems: A performance-based resilience assessment methodology," *Applied Energy*, 228, 487–498. doi:10.1016/j.apenergy.2018.06.075
- Mostafavi, A. (2017). "A System-of-Systems Approach for Integrated Resilience Assessment in Highway Transportation Infrastructure Investment," *Infrastructures*, 2, 22. doi:10.3390/infrastructures2040022
- Muller, G. (2012). "Fuzzy Architecture Assessment for Critical Infrastructure Resilience," *Procedia Computer Science*, 12, 367–372. doi:10.1016/j.procs.2012.09.086
- Mumford, M. D., Hester, K. S., and Robledo, I. C. (2012). "Creativity in Organizations," *Handbook of Organizational Creativity*, Elsevier, pp. 3–16. doi:10.1016/B978-0-12-374714-3.00001-X
- Murdock, H., de Bruijn, K., and Gersonius, B. (2018). "Assessment of Critical Infrastructure Resilience to Flooding Using a Response Curve Approach," *Sustainability*, 10, 3470. doi:10.3390/su10103470
- Najafabadi, M., and Mahrin, M. (2016). "A systematic literature review on the state of research and practice of collaborative filtering technique and implicit feedback," *Artif Intell Rev*, 45, 167–201. doi:10.1007/s10462-015-9443-9
- Najarian, M., and Lim, G. J. (2019). "Design and Assessment Methodology for System Resilience Metrics," *Risk Analysis*, 39, 1885–1898. doi:10.1111/risa.13274
- Najarian, M., and Lim, G. J. (2020). "Optimizing infrastructure resilience under budgetary constraint," *Reliability Engineering & System Safety*, 198, 106801. doi:10.1016/j.ress.2020.106801
- Nan, C., and Sansavini, G. (2017). "A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures," *Reliability Engineering & System Safety*, 157, 35–53. doi:10.1016/j.ress.2016.08.013
- Nan, C., Sansavini, G., and Kröger, W. (2016). "Building an Integrated Metric for Quantifying the Resilience of Interdependent Infrastructure Systems," In C. G. Panayiotou, G. Ellinas, E. Kyriakides, and M. M. Polycarpou (Eds.), *Critical Information Infrastructures Security*, Springer International Publishing, Cham, Vol. 8985, pp. 159–171. doi:10.1007/978-3-319-31664-2_17
- Nogal, M., and O'Connor, A. (2018). "Resilience assessment of transportation networks," *Routledge Handbook of Sustainable and Resilient Infrastructure*, Routledge, 1st ed.
- Nogal, M., O'Connor, A., Caulfield, B., and Martinez-Pastor, B. (2016). "Resilience of traffic networks: From perturbation to recovery via a dynamic restricted equilibrium model," *Reliability Engineering & System Safety*, 156, 84–96. doi:10.1016/j.ress.2016.07.020
- Omer, M., Mostashari, A., and Lindemann, U. (2014). "Resilience Analysis of Soft Infrastructure Systems," *Procedia Computer Science*, 28, 873–882. doi:10.1016/j.procs.2014.03.104

- Ongkowijoyo, C. S., and Doloi, H. (2018). "Risk-based Resilience Assessment Model Focusing on Urban Infrastructure System Restoration," *Procedia Engineering*, 212, 1115–1122. doi:10.1016/j.proeng.2018.01.144
- Ottenburger, S. S., Çakmak, H. K., Jakob, W., Blattmann, A., Trybushnyi, D., Raskob, W., Kühnapfel, U., et al. (2020). "A novel optimization method for urban resilient and fair power distribution preventing critical network states," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 29, 100354. doi:10.1016/j.ijcip.2020.100354
- Ouyang, M., and Dueñas-Osorio, L. (2014). "Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems," *Structural Safety*, 48, 15–24. doi:10.1016/j.strusafe.2014.01.001
- Ouyang, M., Dueñas-Osorio, L., and Min, X. (2012). "A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems," *Structural Safety*, 36–37, 23–31. doi:10.1016/j.strusafe.2011.12.004
- Ouyang, M., and Fang, Y. (2017). "A Mathematical Framework to Optimize Critical Infrastructure Resilience against Intentional Attacks," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, , doi: 10.1111/mice.12252. doi:10.1111/mice.12252
- Ouyang, M., and Wang, Z. (2015). "Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: With a focus on joint restoration modeling and analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, 141, 74–82. doi:10.1016/j.ress.2015.03.011
- Pagano, A., Sweetapple, C., Farmani, R., Giordano, R., and Butler, D. (2019). "Water Distribution Networks Resilience Analysis: a Comparison between Graph Theory-Based Approaches and Global Resilience Analysis," *Water Resour Manage*, 33, 2925–2940. doi:10.1007/s11269-019-02276-x
- Pant, R., Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E., and Rocco, C. M. (2014a). "Stochastic measures of resilience and their application to container terminals," *Computers & Industrial Engineering*, 70, 183–194. doi:10.1016/j.cie.2014.01.017
- Pant, R., Barker, K., and Zobel, C. W. (2014b). "Static and dynamic metrics of economic resilience for interdependent infrastructure and industry sectors," *Reliability Engineering & System Safety*, 125, 92–102. doi:10.1016/j.ress.2013.09.007
- Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., and Hatziargyriou, N. D. (2017). "Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies," *Proc. IEEE*, 105, 1202–1213. doi:10.1109/JPROC.2017.2691357
- Papic, M., Ekisheva, S., and Cotilla-Sanchez, E. (2020). "A Risk-Based Approach to Assess the Operational Resilience of Transmission Grids," *Applied Sciences*, 10, 4761. doi:10.3390/app10144761
- Paschou, T., Rapaccini, M., Adrodegari, F., and Saccani, N. (2020). "Digital servitization in manufacturing: A systematic literature review and research agenda," *Industrial Marketing Management*, 89, 278–292. doi:10.1016/j.indmarman.2020.02.012
- Petersen, L., Lundin, E., Fallou, L., Sjöström, J., Lange, D., Teixeira, R., and Bonavita, A. (2020). "Resilience for whom? The general public's tolerance levels as CI resilience criteria," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 28, 100340. doi:10.1016/j.ijcip.2020.100340

- Pfefferbaum, R. L., Pfefferbaum, B., Van Horn, R. L., Klomp, R. W., Norris, F. H., and Reissman, D. B. (2013). "The Communities Advancing Resilience Toolkit (CART): An Intervention to Build Community Resilience to Disasters," *Journal of Public Health Management and Practice*, 19, 250–258. doi:10.1097/PHH.0b013e318268aed8
- Pilpola, S., Arabzadeh, V., Mikkola, J., and Lund, P. (2019). "Analyzing National and Local Pathways to Carbon-Neutrality from Technology, Emissions, and Resilience Perspectives—Case of Finland," *Energies*, 12, 949. doi:10.3390/en12050949
- Preidel, M., Wang, W. M., Exner, K., and Stark, R. (2018). "Knowledge in Engineering Design: A Systematic Literature Review On Artifacts and It Systems," 881–892. Presented at the 15th International Design Conference. doi:10.21278/idc.2018.0220
- Provan, D. J., Woods, D. D., Dekker, S. W. A., and Rae, A. J. (2020). "Safety II professionals: How resilience engineering can transform safety practice," *Reliability Engineering & System Safety*, 195, 106740. doi:10.1016/j.ress.2019.106740
- Pursiainen, C., Rød, B., Baker, G., Honfı, D., and Lange, D. (2017). "Critical infrastructure resilience index," *Proceedings of the 26th European Safety and Reliability Conference*, CRC Press, Glasgow, Scotland, 2183–2190
- Qin, J., and Faber, M. H. (2019). "Resilience Informed Integrity Management of Wind Turbine Parks," *Energies*, 12, 2729. doi:10.3390/en12142729
- Ramirez-Marquez, J. E., Rocco, C. M., Barker, K., and Moronta, J. (2018). "Quantifying the resilience of community structures in networks," *Reliability Engineering & System Safety*, 169, 466–474. doi:10.1016/j.ress.2017.09.019
- Rehak, D. (2020). "Assessing and strengthening organisational resilience in a critical infrastructure system: Case study of the Slovak Republic," *Safety Science*, 123, 104573. doi:10.1016/j.ssci.2019.104573
- Rehak, D., Senovsky, P., Hromada, M., and Lovecek, T. (2019). "Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 25, 125–138. doi:10.1016/j.ijcip.2019.03.003
- Rehak, D., Senovsky, P., and Slivkova, S. (2018). "Resilience of Critical Infrastructure Elements and Its Main Factors," *Systems*, 6, 21. doi:10.3390/systems6020021
- Renschler, C. S., Frazier, A. E., Arendt, L. A., Cimellaro, G. P., Reinhorn, A. M., and Bruneau, M. (2010). "A Framework for Defining and Measuring Resilience at the Community Scale: The PEOPLES Resilience Framework MCEER".
- Rinaudo, P., Paya-Zaforteza, I., and Calderón, P. A. (2016). "Improving tunnel resilience against fires: A new methodology based on temperature monitoring," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 52, 71–84.
- Rocchetta, R., Zio, E., and Patelli, E. (2018). "A power-flow emulator approach for resilience assessment of repairable power grids subject to weather-induced failures and data deficiency," *Applied Energy*, 210, 339–350. doi:10.1016/j.apenergy.2017.10.126
- Rød, B. (2020). "Operationalising Critical Infrastructure Resilience, From Assessment to Management," Ph.D Thesis, UiT The Arctic University of Norway, Norway.
- Rød, B., Barabadi, A., and Gudmestad, O. (2016). "Characteristics of Arctic Infrastructure Resilience: Application of Expert Judgement," *International Society of*

- Offshore and Polar Engineers, Rhodes, Greece. Presented at the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, 26 June-2 July.
- Rose, A. (2007). "Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions," *Environmental Hazards*, 7, 383–398. doi:10.1016/j.envhaz.2007.10.001
- Sabouhi, H., Doroudi, A., Fotuhi-Firuzabad, M., and Bashiri, M. (2020). "Electrical Power System Resilience Assessment: A Comprehensive Approach," *IEEE Systems Journal*, 14, 2643–2652. doi:10.1109/JSYST.2019.2934421
- Santos, T., Silva, M. A., Fernandes, V. A., and Marsden, G. (2020). "Resilience and Vulnerability of Public Transportation Fare Systems: The Case of the City of Rio De Janeiro, Brazil," *Sustainability*, 12, 647. doi:10.3390/su12020647
- Sarwar, A., Khan, F., Abimbola, M., and James, L. (2018). "Resilience Analysis of a Remote Offshore Oil and Gas Facility for a Potential Hydrocarbon Release," *Risk Analysis*. doi:10.1111/risa.12974
- Sayed, A. R., Wang, C., and Bi, T. (2019). "Resilient operational strategies for power systems considering the interactions with natural gas systems," *Applied Energy*, 241, 548–566. doi:10.1016/j.apenergy.2019.03.053
- Scherzer, S., Lujala, P., and Rød, J. K. (2019). "A community resilience index for Norway: An adaptation of the Baseline Resilience Indicators for Communities (BRIC)," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 101107. doi:10.1016/j.ijdrr.2019.101107
- Schnackenberg, A. K., and Tomlinson, E. C. (2016). "Organizational Transparency: A New Perspective on Managing Trust in Organization-Stakeholder Relationships," *Journal of Management*, 42, 1784–1810. doi:10.1177/0149206314525202
- Shafieezadeh, A., and Ivey Burden, L. (2014). "Scenario-based resilience assessment framework for critical infrastructure systems: Case study for seismic resilience of seaports," *Reliability Engineering & System Safety*, 132, 207–219. doi:10.1016/j.ress.2014.07.021
- Sharifi, A., and Yamagata, Y. (2015). "A Conceptual Framework for Assessment of Urban Energy Resilience," *Energy Procedia*, 75, 2904–2909. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.586
- Shirali, G. H. A., Motamedzade, M., Mohammadfam, I., Ebrahimipour, V., and Moghimbeigi, A. (2012). "Challenges in building resilience engineering (RE) and adaptive capacity: A field study in a chemical plant," *Process Safety and Environmental Protection*, 90, 83–90.
- Sikula, N. R., Mancillas, J. W., Linkov, I., and McDonagh, J. A. (2015). "Risk management is not enough: a conceptual model for resilience and adaptation-based vulnerability assessments," *Environment Systems and Decisions*, 35, 219–228. doi:10.1007/s10669-015-9552-7
- Silva, P. B., Andrade, M., and Ferreira, S. (2020). "Machine learning applied to road safety modeling: A systematic literature review," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. doi:10.1016/j.jtte.2020.07.004

- Smith, C. H., and Schaefer, M. K. (1985). "Optimal inventories for repairable redundant systems with aging components," *Journal of Operations Management*, 5, 339–349. doi:10.1016/0272-6963(85)90018-X
- Specking, E., Cottam, B., Parnell, G., Pohl, E., Cilli, M., Buchanan, R., Wade, Z., et al. (2019). "Assessing Engineering Resilience for Systems with Multiple Performance Measures," *Risk Analysis*, 39, 1899–1912. doi:10.1111/risa.13395
- Storesund, K., Reitan, K. N., Sjöström, J., Rød, B., Guay, F., Almeida, R., and Theocharidou, M. (2018). "Novel methodologies for analysing critical infrastructure resilience," Norway. Presented at the 28th International European Safety and Reliability Conference
- Szwed, P. S. (2016). "Expert judgment in project management: narrowing the theory-practice gap," Project Management Institute, Inc, Newtown Square, Pennsylvania.
- Taghi-Molla, A., Rabbani, M., Karimi Gavareshki, M. H., and Dehghani, E. (2020). "Safety improvement in a gas refinery based on resilience engineering and macro-ergonomics indicators: a Bayesian network–artificial neural network approach," *Int J Syst Assur Eng Manag*, 11, 641–654. doi:10.1007/s13198-020-00968-x
- Tang, J., Wan, L., Nochta, T., Schooling, J., and Yang, T. (2020). "Exploring Resilient Observability in Traffic-Monitoring Sensor Networks: A Study of Spatial–Temporal Vehicle Patterns," *IJGI*, 9, 247. doi:10.3390/ijgi9040247
- Taşan-Kok, T., Stead, D., and Lu, P. (2013). "Conceptual Overview of Resilience: History and Context," In A. Eraydin and T. Taşan-Kok (Eds.), *Resilience Thinking in Urban Planning*, GeoJournal Library, Springer, Dordrecht, Vol. 106, pp. 39–51.
- Teodorescu, H. N. L. (2015). "Defining resilience using probabilistic event trees," *Environment Systems and Decisions*, 35, 279–290. doi:10.1007/s10669-015-9550-9
- Tepes, A., and Neumann, M. B. (2020). "Multiple perspectives of resilience: A holistic approach to resilience assessment using cognitive maps in practitioner engagement," *Water Research*, 178, 115780. doi:10.1016/j.watres.2020.115780
- Testa, A. C., Furtado, M. N., and Alipour, A. (2015). "Resilience of Coastal Transportation Networks Faced with Extreme Climatic Events," *Transportation Research Record*, 2532, 29–36. doi:10.3141/2532-04
- The Council of the European Union (2008). "On the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection," Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008,.
- Tokgoz, B. E., and Gheorghe, A. V. (2013). "Resilience quantification and its application to a residential building subject to hurricane winds," *International Journal of Disaster Risk Science*, 4, 105–114. doi:10.1007/s13753-013-0012-z
- Tong, Q., Yang, M., and Zinetullina, A. (2020). "A Dynamic Bayesian Network-based approach to Resilience Assessment of Engineered Systems," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 65, 104152. doi:10.1016/j.jlp.2020.104152
- Toroghi, S. S. H., and Thomas, V. M. (2020). "A framework for the resilience analysis of electric infrastructure systems including temporary generation systems," *Reliability Engineering & System Safety*, 202, 107013. doi:10.1016/j.ress.2020.107013

- Tortorella, M. (2015). "Reliability, Maintainability, and Supportability: Best Practices for Systems Engineers," Wiley, 1st ed. doi:10.1002/9781119058823
- Tran, H. T., Balchanos, M., Domerçant, J. C., and Mavris, D. N. (2017). "A framework for the quantitative assessment of performance-based system resilience," *Reliability Engineering & System Safety*, 158, 73–84. doi:10.1016/j.ress.2016.10.014
- Trucco, P., Minato, N., and Careri, N. (2013). "Resilience of transport systems under disaster: Simulation-based analysis of 2011 tsunami in Japan," 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEE, Bangkok, Thailand, 487–491. Presented at the 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). doi:10.1109/IEEM.2013.6962459
- Walker, B., Nilakant, V., and Baird, R. (2014). "Promoting Organisational Resilience through Sustaining Engagement in a Disruptive Environment: What are the implications for HRM?," *Research Forum*.
- Wang, J., Zheng, X., Tai, N., Wei, W., and Li, L. (2019a). "Resilience-Oriented Optimal Operation Strategy of Active Distribution Network," *Energies*, 12, 3380. doi:10.3390/en12173380
- Wang, X., Miao, S., and Tang, J. (2020). "Vulnerability and Resilience Analysis of the Air Traffic Control Sector Network in China," *Sustainability*, 12, 3749. doi:10.3390/su12093749
- Wang, Y., Zhan, J., Xu, X., Li, L., Chen, P., and Hansen, M. (2019b). "Measuring the resilience of an airport network," *Chinese Journal of Aeronautics*, 32, 2694–2705. doi:10.1016/j.cja.2019.08.023
- Wang, Y., Zio, E., Wei, X., Zhang, D., and Wu, B. (2019c). "A resilience perspective on water transport systems: The case of Eastern Star," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33, 343–354. doi:10.1016/j.ijdrr.2018.10.019
- Wyss, R., Mühlemeier, S., and Binder, C. (2018). "An Indicator-Based Approach for Analysing the Resilience of Transitions for Energy Regions. Part II: Empirical Application to the Case of Weiz-Gleisdorf, Austria," *Energies*, 11, 2263. doi:10.3390/en11092263
- Xu, M., Ouyang, M., Mao, Z., and Xu, X. (2019). "Improving repair sequence scheduling methods for postdisaster critical infrastructure systems," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 34, 506–522. doi:10.1111/mice.12435
- Yang, Y., Ng, S. T., Zhou, S., Xu, F. J., and Li, H. (2019). "A physics-based framework for analyzing the resilience of interdependent civil infrastructure systems: A climatic extreme event case in Hong Kong," *Sustainable Cities and Society*, 47, 101485. doi:10.1016/j.scs.2019.101485
- Yang, Y., Ng, S. T., Zhou, S., Xu, F. J., and Li, H. (2020). "Physics-based resilience assessment of interdependent civil infrastructure systems with condition-varying components: A case with stormwater drainage system and road transport system," *Sustainable Cities and Society*, 54, 101886. doi:10.1016/j.scs.2019.101886
- Yarveisy, R., Gao, C., and Khan, F. (2020). "A simple yet robust resilience assessment metrics," *Reliability Engineering & System Safety*, 197, 106810. doi:10.1016/j.ress.2020.106810

- Yazdani, A., Otoo, R. A., and Jeffrey, P. (2011). "Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach," *Environmental Modelling & Software*, 26, 1574–1582. doi:10.1016/j.envsoft.2011.07.016
- Yodo, N., and Wang, P. (2016). "Resilience Modeling and Quantification for Engineered Systems Using Bayesian Networks," *Journal of Mechanical Design*, 138, 1–13. doi:10.1115/1.4032399
- Yodo, N., and Wang, P. (2018). "A control-guided failure restoration framework for the design of resilient engineering systems," *Reliability Engineering & System Safety*, 178, 179–190. doi:10.1016/j.ress.2018.05.018
- Yoon, J. T., Youn, B. D., Yoo, M., and Kim, Y. (2017). "A newly formulated resilience measure that considers false alarms," *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 417–427. doi:10.1016/j.ress.2017.06.013
- Youn, B. D., Hu, C., and Wang, P. F. (2011). "Resilience-driven system design of complex engineered systems," *Journal of Mechanical Design*, 133, 1–15.
- Younesi, A., Shayeghi, H., Safari, A., and Siano, P. (2020). "Assessing the resilience of multi microgrid based widespread power systems against natural disasters using Monte Carlo Simulation," *Energy*, 207, 118220. doi:10.1016/j.energy.2020.118220
- Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets," *Information and Control*, 8, 338–353. doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- Zhang, H., Li, G., and Yuan, H. (2018a). "Collaborative Optimization of Post-Disaster Damage Repair and Power System Operation," *Energies*, 11, 2611. doi:10.3390/en11102611
- Zhang, H., Yuan, H., Li, G., and Lin, Y. (2018b). "Quantitative Resilience Assessment under a Tri-Stage Framework for Power Systems," *Energies*, 11, 1427. doi:10.3390/en11061427
- Zhang, X., Mahadevan, S., Sankararaman, S., and Goebel, K. (2018c). "Resilience-based network design under uncertainty," *Reliability Engineering & System Safety*, 169, 364–379. doi:10.1016/j.ress.2017.09.009
- Zhang, X., Miller-Hooks, E., and Denny, K. (2015). "Assessing the role of network topology in transportation network resilience," *Journal of Transport Geography*, 46, 35–45. doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.05.006
- Zhao, S., Liu, X., and Zhuo, Y. (2017). "Hybrid Hidden Markov Models for resilience metrics in a dynamic infrastructure system," *Reliability Engineering & System Safety*, 164, 84–97. doi:10.1016/j.ress.2017.02.009
- Zhou, L., and Chen, Z. (2020). "Measuring the performance of airport resilience to severe weather events," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83, 102362. doi:10.1016/j.trd.2020.102362
- Zhou, Y., Panteli, M., Wang, B., and Mancarella, P. (2020). "Quantifying the System-Level Resilience of Thermal Power Generation to Extreme Temperatures and Water Scarcity," *IEEE Systems Journal*, 14, 749–759. doi:10.1109/JSYST.2019.2938332
- Zhu, J., Manandhar, B., Truong, J., Ganapati, N. E., Pradhananga, N., Davidson, R. A., and Mostafavi, A. (2017). "Assessment of Infrastructure Resilience in the 2015 Gorkha, Nepal, Earthquake," *Earthquake Spectra*, 33, 147–165. doi:10.1193/121116eqs231m

- Zinetullina, A., Yang, M., Khakzad, N., and Golman, B. (2020). "Dynamic resilience assessment for process units operating in Arctic environments," *Saf. Extreme Environ.*, 2, 113–125. doi:10.1007/s42797-019-00008-3
- Zobel, C. W. (2011). "Representing perceived tradeoffs in defining disaster resilience," *Decision Support Systems*, 50, 394–403. doi:10.1016/j.dss.2010.10.001
- Zobel, C. W., and Khansa, L. (2014). "Characterizing multi-event disaster resilience," *Computers & Operations Research*, 42, 83–94. doi:10.1016/j.cor.2011.09.024
- Zou, Q., and Chen, S. (2019). "Enhancing resilience of interdependent traffic-electric power system," *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106557. doi:10.1016/j.ress.2019.106557

پوست

پیوست شماره ۱: تحقیقات اولیه شناسایی شده

موضوع تحقیق	نویسندگان
Quantifying urban infrastructure resilience	(Bruneau et al., 2003)
The resilience of water distribution systems	(Yazdani et al., 2011)
The resilience of transportation systems	(Enjalbert et al., 2011)
The resilience of transportation systems	(Cox et al., 2011)
The resilience of industrial processes	(Dinh et al., 2012)
Resilience assessment	(Shirali et al., 2012)
The resilience of critical infrastructures	(Muller, 2012)
Quantifying system resilience	(Tokgoz and Gheorghe, 2013)
The resilience of water systems	(Liu et al., 2013)
Quantifying infrastructure resilience	(Francis and Bekera, 2014)
Characterizing disaster resilience	(Zobel and Khansa, 2014)
The resilience of transportation systems	(Shafieezadeh and Ivey Burden, 2014)
The resilience of power systems	(Ouyang and Dueñas-Osorio, 2014)
Systems resilience assessment	(Ayyub, 2014)
Resilience of networks	(Baroud et al., 2014b)
The resilience of urban infrastructure	(Sharifi and Yamagata, 2015)
The resilience of coastal transportation	(Testa et al., 2015)
The resilience of nuclear plant	(Labaka et al., 2015)
The resilience of transportation systems	(D'Lima and Medda, 2015)
Resilience concept evaluation	(Teodorescu, 2015)
The resilience of electrical infrastructures	(Fang et al., 2015)
The resilience of the water system	(Diao et al., 2016)
The resilience of transportation systems	(Hosseini and Barker, 2016)
Underground space resilience	(Rinaudo et al., 2016)
Complex system resilience analysis	(Gama Dessavre et al., 2016)
The resilience of transportation systems	(Filippone et al., 2016)
Engineered systems resilience assessment	(Hu and Mahadevan, 2016)
Engineered systems resilience assessment	(Yodo and Wang, 2016)
Resilience of infrastructures	(Nan and Sansavini, 2017)
Resilience assessment	(Yoon et al., 2017)
Modeling resilience of infrastructures	(Zhao et al., 2017)
Assessment of infrastructure resilience	(Zhu et al., 2017)
The resilience of the water supply system	(Klise et al., 2017)
The resilience of transportation systems	(Malandri et al., 2017)
The resilience of transportation systems	(Chen et al., 2017)
The resilience of industrial tanks	(Mebarki, 2017a)
Quantifying critical infrastructure resilience	(Pursiainen et al., 2017)
Resilience strategy for cloud data	(Liu et al., 2018)
Cyber resilience framework	(Haque et al., 2018)
The resilience of transportation systems	(Hsieh and Feng, 2018)
Resilience assessment	(Moslehi and Reddy, 2018)
The resilience of the power system	(Cai et al., 2018)
The resilience of transportation systems	(Lu, 2018)
The resilience of industrial processes	(Jain et al., 2018)
The Resilience of IT networks	(Landegren et al., 2018)
The resilience of engineering systems	(MacKenzie and Hu, 2018)
Resilience of networks	(Mao and Li, 2018)
The resilience of critical infrastructure systems	(Galbusera et al., 2018)
Critical infrastructure resilience	(Kong et al., 2019a)
The resilience of water systems	(Pagano et al., 2019)
The resilience of the transportation system	(Ahmed et al., 2019)
The resilience of the power system	(Amirioun et al., 2019)
The resilience of the transmission system	(Liu et al., 2019b)
The resilience of traffic-electric power system	(Zou and Chen, 2019)

موضوع تحقیق	نویسندگان
The resilience of the electric power system	(Hossain et al., 2019a)
Resilience assessment of waterport	(Hossain et al., 2019b)
The resilience of the natural gas system	(Sayed et al., 2019)
The resilience of transportation systems	(Leobons et al., 2019)
Engineered systems resilience assessment	(Specking et al., 2019)
Critical infrastructure resilience	(Xu et al., 2019)
The resilience of urban infrastructures	(Goldbeck et al., 2019)
The resilience of energy systems	(Maheshwari and Ramakumar, 2020)
The resilience of distribution systems	(Gautam et al., 2020)
Resilience assessment of electric power	(Sabouhi et al., 2020)
The resilience of thermal power generation	(Zhou et al., 2020)
The resilience of the electric distribution systems	(Kandaperumal and Srivastava, 2020)
Resilience analysis of the system of systems	(Chen et al., 2020b)
Quantitative assessment of resilience	(Cheng et al., 2020)
The resilience of the urban water system	(Liu et al., 2020a)
Urban Resilience	(Chen et al., 2020a)
The resilience of water systems	(Izadi et al., 2020)
The resilience of longwall machinery	(Hoseini et al., 2020)
The resilience of energy systems	(Charani Shandiz et al., 2020)
Resilience assessment of safety system	(Guo et al., 2020)
The resilience of socio-technical systems	(Eljaoued et al., 2020)
Resilience in managing mine tailing ponds	(Komljenovic et al., 2020)
The resilience of power systems	(Toroghi and Thomas, 2020)
The resilience of energy systems	(Bao et al., 2020)
The resilience of an airport	(Zhou and Chen, 2020)
The resilience of water distribution network	(Assad et al., 2019)
The resilience of critical infrastructures	(Rehak et al., 2018)
The resilience of the transportation system	(Khaghani and Jazizadeh, 2020)
The resilience of street networks	(Cutini and Pezzica, 2020)
The resilience of the transportation system	(Afrin and Yodo, 2020)
The resilience of air traffic network	(Wang et al., 2020)
The resilience of the transportation system	(Santos et al., 2020)
The resilience of electric power generation system	(Mathias et al., 2018)
The resilience of critical infrastructures	(Kong et al., 2019b)
Resilience of transportation system	(Murdock et al., 2018)
The resilience of supply chains	(Li et al., 2017)
The resilience of power systems	(Chalishazar et al., 2020)
The resilience of navigation systems	(Engler et al., 2019)
Resilience of networks	(Afrin and Yodo, 2019)
Resilience of dams	(Hollins et al., 2018)
The resilience of power systems	(Pilpola et al., 2019)
The resilience of power systems	(Lau et al., 2018)
Quantifying system resilience	(Cimellaro et al., 2010a)
Quantifying system resilience	(Zobel, 2011)
Engineered systems resilience assessment	(Youn et al., 2011)
The resilience of critical infrastructure systems	(Croope and McNeil, 2011)
Resilience assessment	(Henry and Emmanuel Ramirez-Marquez, 2012)
The resilience of the energy system	(Afgan and Veziroglu, 2012)
The resilience of urban infrastructure systems	(Ouyang et al., 2012)
The resilience of transport systems	(Trucco et al., 2013)
The resilience of networks	(Barker et al., 2013)
The resilience of transportation systems	(Jin et al., 2014)
The resilience of transportation systems	(Baroud et al., 2014a)
The resilience of transportation systems	(Pant et al., 2014a)
The resilience of critical infrastructures	(Omer et al., 2014)
The resilience of the urban water system	(Behzadian et al., 2014)
Quantifying urban infrastructure resilience	(Faturechi et al., 2014)

موضوع تحقیق	نویسندگان
Resilience of infrastructures	(Ouyang and Wang, 2015)
The resilience of transportation systems	(Zhang et al., 2015)
Proposing a conceptual model for resilience	(Sikula et al., 2015)
The resilience of Arctic infrastructure	(Rød et al., 2016)
The resilience of the engineered system	(Jin and Gu, 2016)
Quantifying system resilience	(Nan et al., 2016)
The resilience of traffic networks	(Nogal et al., 2016)
Resilience analysis of tunnel lining	(Huang and Zhang, 2016)
The resilience of power systems	(Espinoza et al., 2016)
The resilience of transportation systems	(Adjetej-Bahun et al., 2016)
The resilience of power systems	(MacKenzie and Zobel, 2016)
The resilience of critical infrastructures	(Feofilovs and Romagnoli, 2017)
The resilience of the power system	(Kim et al., 2017)
Resilience theory and metrics	(Mebarki, 2017b)
Power systems resilience assessment	(Panteli et al., 2017)
Resilience characteristics	(Faber et al., 2017)
The resilience of the transportation system	(Herrera et al., 2017)
Quantifying system resilience	(Tran et al., 2017)
Optimizing critical infrastructure resilience	(Ouyang and Fang, 2017)
The resilience of urban traffic-electric power	(Fotouhi et al., 2017)
The resilience of engineered systems	(Yodo and Wang, 2018)
Resilience of networks	(Meng et al., 2018)
Resilience assessment	(Gong and You, 2018)
The resilience of engineered systems	(Buchanan et al., 2018)
Resilience of networks	(Baroud and Barker, 2018)
Resilience of networks	(Ramirez-Marquez et al., 2018)
Resilience of networks	(Zhang et al., 2018c)
The resilience of urban infrastructure	(Ongkowitzjoyo and Doloi, 2018)
The resilience of remote offshore oil and gas	(Sarwar et al., 2018)
Quantifying critical infrastructure resilience	(Storesund et al., 2018)
The resilience of energy systems	(Matelli and Goebel, 2018)
The resilience of power systems	(Rocchetta et al., 2018)
Prediction of recovery rate	(Barabadi and Ayele, 2018a)
The resilience of transportation systems	(Aydin et al., 2018a)
The resilience of engineered slope	(Li et al., 2018)
The resilience of transportation systems	(Aydin et al., 2018b)
The resilience of self-healing distribution	(Ma et al., 2019)
The resilience of transportation systems	(Wang et al., 2019c)
The resilience of industrial processes	(Jain et al., 2019)
The resilience of an airport network	(Wang et al., 2019b)
Modeling the recovery process	(Cassottana et al., 2019)
Identifying resilient-important elements	(Liu et al., 2019a)
The resilience of critical infrastructure	(Rehak et al., 2019)
The resilience of engineering systems	(Abimbola and Khan, 2019)
Engineered systems resilience assessment	(Najarian and Lim, 2019)
The resilience of infrastructure systems	(Kong and Simonovic, 2019)
The resilience of supply networks	(Hosseini and Ivanov, 2019)
Resilience assessment of power system	(Liu et al., 2020b)
Resilience assessment	(Yarveysy et al., 2020)
Resilience assessment of power system	(Younesi et al., 2020)
Optimizing infrastructure resilience	(Najarian and Lim, 2020)
Resilience analysis of a road network	(Li et al., 2020)
Resilience assessment of power system	(Ottenburger et al., 2020)
Network resilience	(Ahmadian et al., 2020)
The resilience of transportation systems	(Koc et al., 2020)
The resilience of health infrastructure systems	(Barabadi et al., 2020)
The resilience of critical infrastructures	(Petersen et al., 2020)

موضوع تحقیق	نویسندگان
The resilience of water supply systems	(Tepes and Neumann, 2020)
The resilience of critical infrastructures	(Yang et al., 2020)
The resilience of a separator system	(Zinetullina et al., 2020)
The resilience of engineering systems	(Kammouh et al., 2020)
The resilience of transportation systems	(Das, 2020)
The resilience of infrastructures	(Tong et al., 2020)
The resilience of power systems	(Ciapessoni et al., 2020)
The resilience of power systems	(Karangelos et al., 2020)
The resilience of transmission grids	(Papic et al., 2020)
Resilience of microgrids	(Ibrahim and Alkhraibat, 2020)
Resilience of infrastructures	(Kong et al., 2019c)
The resilience of highway transportation system	(Mostafavi, 2017)
The resilience of highway networks	(Han and Zhang, 2020)
The resilience of traffic network	(Tang et al., 2020)
The resilience of electric power generation system	(Kumar et al., 2020)
The resilience of power systems	(Brugnetti et al., 2020)
The resilience of power systems	(Wang et al., 2019a)
The resilience of wind turbines	(Qin and Faber, 2019)
The resilience of energy systems' transition	(Wyss et al., 2018)
The resilience of power systems	(Zhang et al., 2018b)
The resilience of energy systems' transition	(Binder et al., 2017)
The resilience of power systems	(Zhang et al., 2018a)
The resilience of electric power distribution grids	(Bragatto et al., 2019)

پیوست شماره ۲: نحوه تخمین ضرایب اهمیت

الف) معرفی روش FDAHP

روش FDAHP از پنج مرحله شامل نظرسنجی از کارشناس، محاسبه اعداد فازی، تشکیل ماتریس معکوس فازی، محاسبه ضرایب اهمیت فازی نسبی پارامترها و غیرفازی کردن ضرایب اهمیت آنها تشکیل می‌شود. این مراحل به شرح زیر هستند (عطائی، ۱۳۹۴):

۱) نظرسنجی از کارشناسان

در این مرحله، ابتدا از کارشناسان مرتبط با موضوع در مورد پارامترهای مؤثر بر یک پدیده به صورت کیفی نظرسنجی به عمل می‌آید. برای این منظور می‌توان از جدول پ ۱-۲ استفاده کرد.

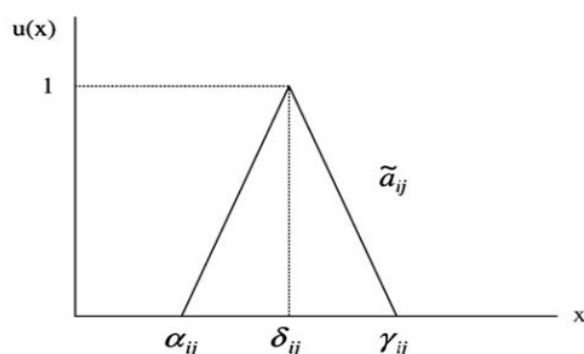
جدول پ ۱-۲- عبارات زبانی برای اخذ نظرات کارشناسان	
عبارت زبانی	امتیاز معادل با عبارت زبانی
بدون اهمیت	۱
کم اهمیت	۳
اهمیت متوسط	۵
با اهمیت	۷
بسیار با اهمیت	۹

۲) محاسبه اعداد فازی

اعداد فازی ($\tilde{a}_{ij}$) حاصل از اجماع نظرات کارشناسان با استفاده از رابطه پ ۱-۲ به دست می‌آیند. در این بخش، با توجه به سهولت و کاربرد زیاد اعداد فازی مثلثی از این نوع اعداد استفاده می‌شود. براساس منطق اعداد فازی مثلثی، مقادیر بیشینه و کمینه نظرات کارشناسان به عنوان نقاط مرزی و میانگین هندسی به عنوان حد وسط در نظر گرفته می‌شوند. محاسبه اعداد فازی مثلثی در شکل پ ۲-۱ نشان داده شده است. در رابطه پ ۱-۲، β_{ij} نشان دهنده اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از

دیدگاه کارشناس k ام، γ_{ij} و α_{ij} به ترتیب، حد بالا و پایین نظرهای کارشناسان و δ_{ij} میانگین هندسی نظرهای آنها است. مقادیر مؤلفه‌های مذکور در بازه $(9, 1/9)$ تغییر می‌کنند. همچنین K برابر با تعداد کارشناسان است.

$$\tilde{a}_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) = \left(\min_K \{\beta_{ijk}\}, \sqrt[K]{\prod_{k=1}^K \beta_{ijk}}, \max_K \{\beta_{ijk}\} \right) \quad \text{پ ۱-۲}$$



شکل پ ۱-۲- تابع عضویت اعداد فازی مثلثی در روش فازی دلفی

۳) تشکیل ماتریس معکوس فازی

در این مرحله با توجه به اعداد فازی به دست آمده در مرحله قبل، ماتریس مقایسه زوجی فازی برای n پارامتر مختلف به شرح زیر تشکیل می‌شود:

$$A = [\tilde{a}_{ij}] \quad \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} = 1 \quad \forall \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{پ ۲-۲}$$

۴) محاسبه ضرایب اهمیت فازی نسبی پارامترها

ضریب اهمیت یا وزن فازی نسبی پارامترها از روابط پ ۲-۳ و پ ۲-۴ محاسبه می‌شود. در این روابط $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2$ معادل $(\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ ، نماد ضرب اعداد فازی و $\oplus$ نماد جمع اعداد فازی هستند. $\tilde{W}_i$ نیز برداری سطری و نشان دهنده ضریب اهمیت فازی نسبی پارامتر i ام است. در واقع رابطه پ ۲-۴ وزنهای فازی را نرمالایز می‌کند.

$$\tilde{Z}_i = \sqrt[n]{(\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{ij})} \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{پ ۲-۳}$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{پ ۲-۴}$$

۵) غیرفازی کردن ضرایب اهمیت پارامترها

در این مرحله با استفاده از رابطه پ ۲-۵ میانگین هندسی مؤلفه‌های $\tilde{W}_i$ به دست می‌آید و بدین ترتیب ضریب اهمیت نهایی پارامترها به صورت یک عدد قطعی تخمین زده می‌شود.

$$W_i = \sqrt[3]{\prod_{j=1}^3 w_{ij}} \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{پ ۲-۵}$$

ب) تخمین وزن عوامل مؤثر بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری

ابتدا طبق ساختارهای سلسله مراتبی نمایش داده شده در شکل ۴-۶ الی شکل ۴-۸ پرسشنامه‌ای برای تعیین میزان اهمیت شاخص‌های عمومی و عوامل تأثیرگذار بر اندیس‌های قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری سیستم طراحی شد. سپس، پرسشنامه تدوین شده برای افرادی که سابقه فعالیت در زمینه‌های مرتبط با موضوع پرسشنامه را داشتند، ارسال شد. در مجموع ۱۱ نفر به پرسشنامه ارسال شده پاسخ دادند که مشخصات آن‌ها در جدول پ ۲-۲ نمایش داده شده است. همچنین نتایج نظرسنجی در جدول پ ۲-۳ ارائه شده است.

جدول پ ۲-۲- مشخصات کارشناسان شرکت کننده در نظرسنجی

نماد	تحصیلات	رشته	سمت	تجربه	نماد	تحصیلات	رشته	سمت	تجربه
E_1	دکتری	معدن	هیأت علمی	۴	E_7	کارشناسی ارشد	معدن	-	-
E_2	دکتری	معدن	محقق	۲	E_8	کارشناسی ارشد	معدن	-	-
E_3	دکتری	معدن	هیأت علمی	۶	E_9	کارشناسی ارشد	معدن	-	-
E_4	دانشجوی دکتری	معدن	محقق	-	E_{10}	دانشجوی دکتری	معدن	مدیر	۲۰
E_5	کارشناسی ارشد	معدن	-	-	E_{11}	دانشجوی دکتری	معدن	محقق	-
E_6	دکتری	معدن	هیأت علمی	۱۴					

جدول پ ۲-۳- نتایج نظرسنجی از کارشناسان

اهمیت هر کدام از شاخص‌های عمومی از دیدگاه اندیس قابلیت اطمینان											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
A1	۷	۹	۷	۹	۹	۹	۹	۷	۹	۹	۷
A2	۷	۹	۵	۷	۵	۵	۷	۵	۷	۷	۷
A3	۷	۹	۷	۹	۵	۷	۹	۹	۹	۷	۹
اهمیت هر کدام از شاخص‌های عمومی از دیدگاه اندیس تعمیرپذیری											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
A1	۹	۹	۹	۹	۵	۹	۷	۹	۹	۹	۷
A2	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۷	۹	۹	۷	۷
A3	۵	۷	۷	۹	۹	۷	۷	۷	۹	۹	۹
اهمیت استراتژی‌های کنشگرایانه و واکنشی از دیدگاه شاخص طراحی سیستم											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
B1	۷	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۵	۹	۹	۹
B2	۵	۹	۹	۹	۷	۷	۳	۷	۷	۹	۷
اهمیت ظرفیت‌های جذب و انطباق از دیدگاه استراتژی‌های کنشگرایانه											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
C1	۵	۹	۷	۷	۹	۷	۷	۷	۹	۷	۷
C2	۷	۹	۵	۷	۵	۹	۵	۷	۵	۷	۷
اهمیت ظرفیت‌های انطباق و مرمت از دیدگاه استراتژی‌های واکنشی											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
C2	۷	۹	۷	۷	۵	۹	۵	۹	۹	۷	۷
C3	۵	۷	۷	۵	۹	۷	۷	۵	۹	۷	۷
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی ظرفیت جذب											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
D1	۷	۷	۹	۹	۷	۷	۹	۹	۵	۷	۷
D2	۵	۹	۵	۷	۹	۵	۷	۵	۵	۷	۷
D3	۹	۷	۵	۷	۷	۷	۷	۹	۹	۹	۹
D4	۵	۹	۷	۷	۵	۹	۹	۹	۵	۹	۷
D5	۹	۹	۷	۹	۹	۷	۷	۷	۷	۷	۷
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی ظرفیت انطباق											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
F1	۱	۹	۷	۵	۹	۷	۹	۵	۹	۹	۹
B3	۵	۹	۷	۹	۹	۹	۹	۵	۹	۷	۷

جدول پ ۲-۳- ادامه

اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص استراتژی فعلی نت (نگهداری و تعمیرات)											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
B4	۷	۹	۹	۹	۷	۷	۷	۷	۹	۷	۵
B3	۷	۷	۷	۹	۹	۵	۵	۷	۵	۹	۷
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص شرایط عملیاتی از دیدگاه اندیس قابلیت اطمینان و تعمیرپذیری											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
B5	۷	۹	۷	۹	۷	۷	۹	۹	۹	۷	۵
B6	۹	۹	۷	۹	۷	۹	۷	۹	۷	۹	۹
B7	۷	۷	۵	۹	۹	۷	۷	۳	۳	۷	۵
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی عامل آموزش											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
G1	۵	۹	۷	۹	۹	۵	۵	۵	۹	۷	۹
G2	۵	۹	۵	۹	۵	۵	۳	۵	۹	۹	۵
G3	۷	۹	۹	۹	۹	۷	۹	۹	۹	۷	۹
G4	۹	۷	۹	۵	۷	۹	۷	۹	۹	۹	۷
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی عامل مدیریت											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
H1	۵	۵	۷	۵	۷	۵	۹	۷	۹	۵	۵
H2	۷	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۹	۹	۹	۹
H3	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۹	۹	۹	۹
H4	۷	۷	۹	۳	۳	۵	۹	۵	۷	۷	۷
H5	۷	۷	۹	۷	۹	۵	۹	۷	۹	۷	۵
H6	۹	۷	۵	۵	۷	۷	۹	۹	۵	۷	۵
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی عامل ارتقای فرهنگ ایمنی											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
I1	۷	۷	۹	۹	۵	۷	۵	۱	۹	۷	۵
I2	۹	۹	۷	۷	۹	۹	۷	۱	۹	۷	۵
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی عامل استانداردسازی سیستم											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
J1	۷	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۷	۵	۷
J2	۹	۹	۵	۹	۷	۵	۹	۵	۹	۷	۹
J3	۷	۷	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۹	۷	۹
اهمیت پشتیبانی کنش گر و کنش پذیر از دیدگاه عامل قابلیت پشتیبانی											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
K1	۷	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۷
K2	۷	۷	۷	۹	۷	۵	۷	۹	۷	۷	۵

جدول پ ۲-۳- ادامه

اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی پشتیبانی کنش پذیر از دیدگاه عامل قابلیت پشتیبانی											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
L1	۷	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۹
L2	۵	۷	۹	۹	۹	۷	۷	۷	۷	۷	۵
L3	۳	۹	۵	۷	۵	۵	۵	۹	۳	۷	۵
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی عامل تدارکات قطعات یدکی											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
M1	۵	۹	۷	۹	۹	۹	۷	۵	۷	۷	۷
M2	۹	۹	۹	۹	۵	۷	۹	۷	۹	۹	۹
M3	۳	۷	۷	۵	۹	۵	۷	۹	۵	۷	۵
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی پشتیبانی کنش گر از دیدگاه عامل قابلیت پشتیبانی											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
N1	۵	۹	۷	۹	۹	۵	۷	۹	۷	۷	۵
N2	۷	۷	۳	۵	۷	۹	۷	۹	۳	۷	۵
N3	۹	۷	۵	۷	۷	۵	۷	۷	۷	۹	۷
N4	۷	۹	۹	۹	۹	۷	۹	۷	۹	۹	۷
N5	۷	۹	۹	۹	۵	۵	۹	۵	۹	۷	۹
N6	۷	۷	۵	۹	۵	۵	۵	۵	۳	۷	۹
اهمیت عوامل تأثیرگذار بر روی عامل محدودیت های سیستم											
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	E_{11}
O1	۳	۹	۹	۹	۹	۹	۷	۵	۹	۹	۹
O2	۵	۹	۹	۹	۹	۵	۹	۹	۷	۹	۹

پس از اخذ نظرات کارشناسان، مراحل بعدی روش FDAHP اجرا شده و ضریب اهمیت نهایی عوامل مؤثر تخمین زده شدند. به عنوان نمونه، ماتریس های مقایسه زوجی تشکیل شده برای شاخص های عمومی تأثیرگذار بر روی اندیس قابلیت اطمینان در جدول پ ۲-۴ ارائه شده اند. همچنین، ماتریس معکوس فازی و ضرایب اهمیت نهایی شاخص های عمومی از دیدگاه اندیس قابلیت اطمینان در جدول پ ۲-۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، از منظر کارشناسانی که در نظرسنجی مشارکت کرده بودند، شاخص عمومی طراحی سیستم اهمیت بیشتری نسبت به دو شاخص دیگر داشته است.

جدول پ ۲-۴- ماتریس‌های مقایسه زوجی شاخص‌های عمومی از دیدگاه اندیس قابلیت اطمینان

E1	A1	A2	A3
A1	۱	۱	۱
A2	۱	۱	۱
A3	۱	۱	۱

E2	A1	A2	A3
A1	۱	۱	۱
A2	۱	۱	۱
A3	۱	۱	۱

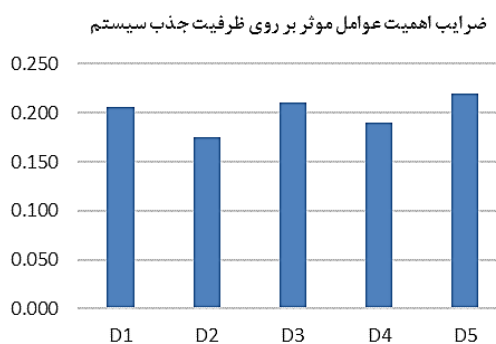
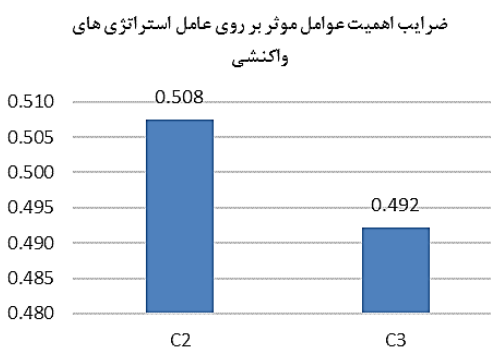
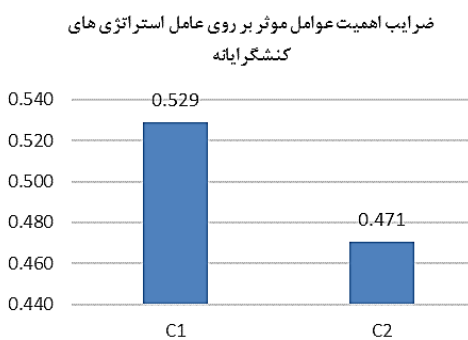
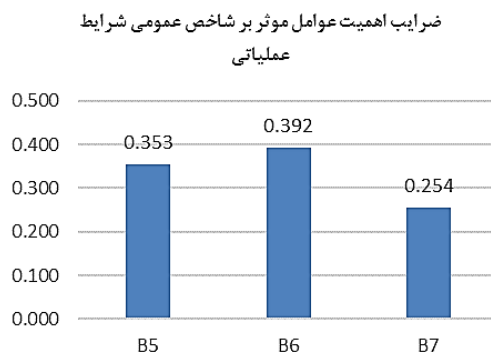
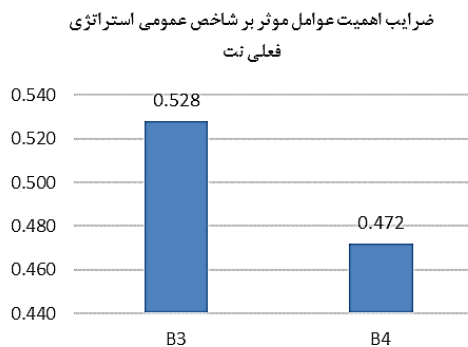
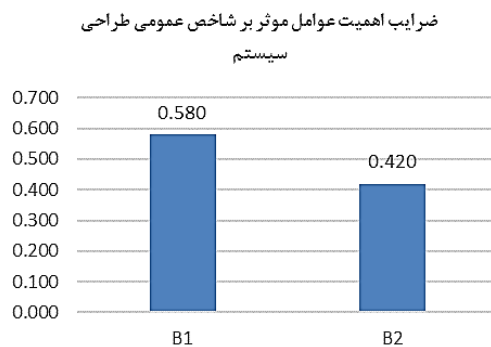
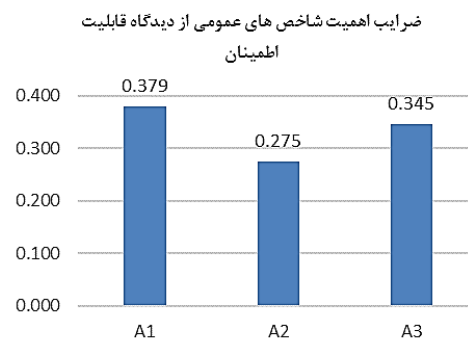
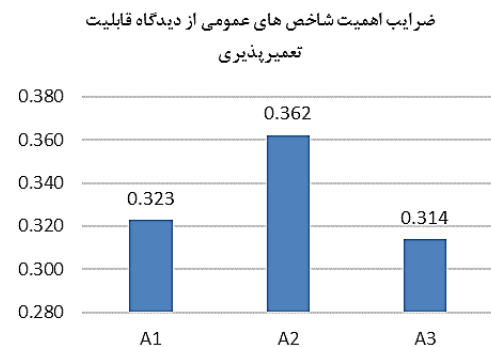
E3	A1	A2	A3
A1	۱	۱,۴۰	۱
A2	۰,۷۱	۱	۰,۷۱
A3	۱	۱,۴۰	۱

E4	A1	A2	A3
A1	۱	۱,۲۹	۱
A2	۰,۷۸	۱	۰,۷۸
A3	۱	۱,۲۹	۱
E5	A1	A2	A3
A1	۱	۱,۸۰	۱,۸۰
A2	۰,۵۶	۱	۱
A3	۰,۵۶	۱	۱
E6	A1	A2	A3
A1	۱	۱,۸۰	۱,۲۹
A2	۰,۵۶	۱	۰,۷۱
A3	۰,۷۸	۱,۴۰	۱
E7	A1	A2	A3
A1	۱	۱,۲۹	۱
A2	۰,۷۸	۱	۰,۷۸
A3	۱	۱,۲۹	۱
E8	A1	A2	A3
A1	۱	۱,۴۰	۰,۷۸
A2	۰,۷۱	۱	۰,۵۶
A3	۱,۲۹	۱,۸۰	۱
E9	A1	A2	A3
A1	۱	۱,۲۹	۱
A2	۰,۷۸	۱	۰,۷۸
A3	۱	۱,۲۹	۱
E10	A1	A2	A3
A1	۱	۱,۲۹	۱,۲۹
A2	۰,۷۸	۱	۱
A3	۰,۷۸	۱	۱
E11	A1	A2	A3
A1	۱	۱	۰,۷۸
A2	۱	۱	۰,۷۸
A3	۱,۲۹	۱,۲۹	۱

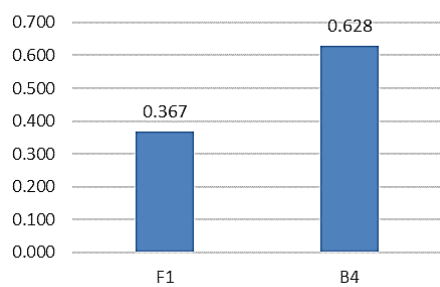
جدول پ ۲-۵- ماتریس معکوس فازی و ضرایب اهمیت شاخص‌های عمومی از دیدگاه اندیس قابلیت اطمینان

ماتریس معکوس فازی			
CR1	A1	A2	A3
A1	(۱,۰۰,۱,۰۰,۱,۰۰)	(۱,۰۰,۱,۳۰,۱,۸۰)	(۰,۷۸,۱,۰۵,۱,۸۰)
A2	(۰,۵۶,۰,۷۷,۱,۰۰)	(۱,۰۰,۱,۰۰,۱,۰۰)	(۰,۵۶,۰,۸۱,۱,۰۰)
A3	(۰,۵۶,۰,۹۵,۱,۲۹)	(۱,۰۰,۱,۲۳,۱,۸۰)	(۱,۰۰,۱,۰۰,۱,۰۰)
ضرایب اهمیت نهایی			
CR1	$\tilde{Z}_i$	$\tilde{W}_i$	W_i
A1	(۰,۹۲۰,۱,۱۱۰,۱,۴۸۰)	(۰,۳۸۰,۰,۳۶۸,۰,۳۸۹)	۰,۳۷۹
A2	(۰,۶۷۶,۰,۸۵۶,۱,۰۰۰)	(۰,۲۸۰,۰,۲۸۴,۰,۲۶۳)	۰,۲۷۵
A3	(۰,۸۲۲,۱,۰۵۲,۱,۳۲۳)	(۰,۳۴۰,۰,۳۴۹,۰,۳۵۰)	۰,۳۴۵
$\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n = (۲,۴۱۸,۳,۰۱۸,۳,۸۰۲)$ $(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} = (۰,۴۱۴,۰,۳۳۱,۰,۲۶۳)$			$\sum W_i = ۱,۰۰۰$

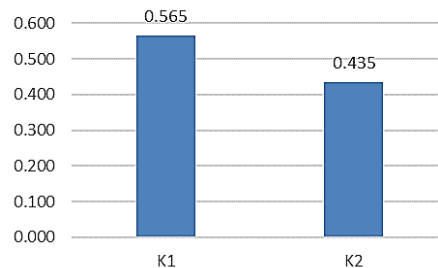
ضرایب اهمیت نهایی عوامل موثر در ادامه ارائه شده‌اند:



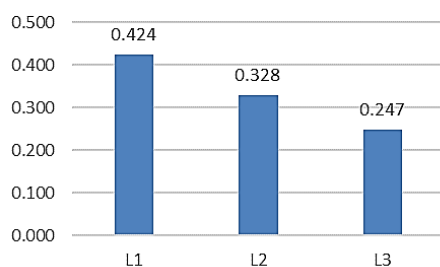
ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی ظرفیت مرمت سیستم



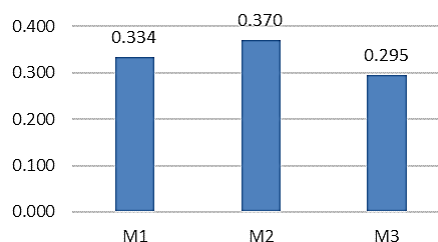
ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی قابلیت پشتیبانی سیستم



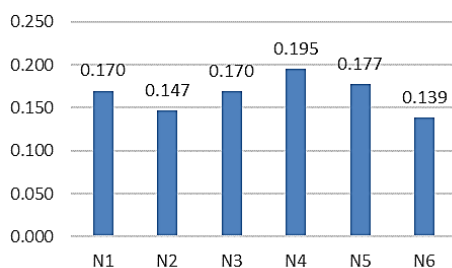
عوامل موثر بر روی عامل پشتیبانی کنش پذیر



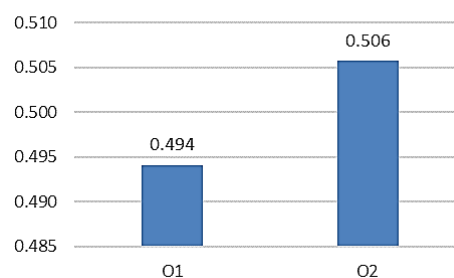
ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی عامل تدارکات قطعات یدکی



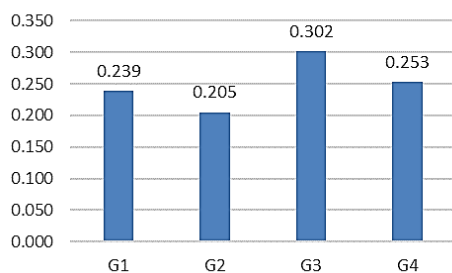
ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی عامل پشتیبانی کنش گر



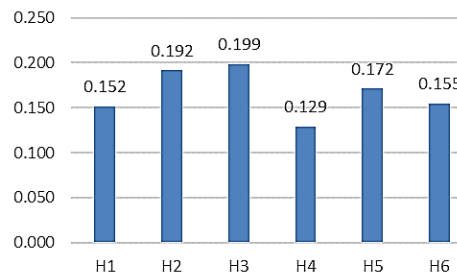
ضرایب اهمیت عوامل موثر بر عامل محدودیت های سیستم



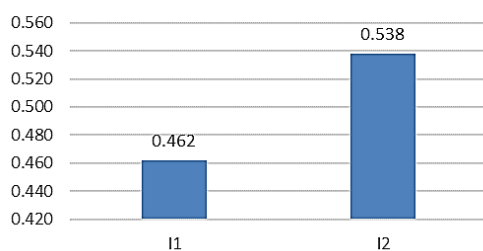
ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی عامل آموزش



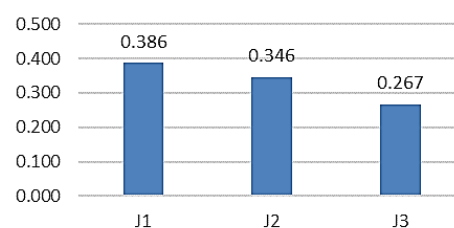
ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی عامل مدیریت



ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی عامل ارتقای فرهنگ ایمنی



ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی عامل استاندارد سازی سیستم



ج) تخمین وزن عوامل مؤثر بر اندیس تاب‌آوری سازمانی

مشابه با بخش قبل، ابتدا طبق ساختار سلسله مراتبی نمایش داده شده در شکل ۴-۱۰ پرسشنامه‌ای برای تعیین میزان اهمیت شاخص‌های عمومی و عوامل تأثیرگذار بر اندیس تاب‌آوری سازمانی طراحی شد. با توجه به ماهیت عوامل ذکر شده در این پرسشنامه سعی شد تا از افرادی که در سازمان‌های صنعتی مشغول فعالیت هستند نیز نظرسنجی شود. زیرا آن‌ها طی سال‌های فعالیت خود تأثیر این‌گونه عوامل در سازمان را به‌صورت ملموس درک کرده‌اند. در مجموع ۸ نفر به پرسشنامهٔ تدوین شده برای اندیس تاب‌آوری سازمانی پاسخ دادند که مشخصات آن‌ها در جدول پ ۲-۶ نمایش داده شده است. همچنین نتایج نظرسنجی در جدول پ ۲-۷ ارائه شده است.

جدول پ ۲-۶- مشخصات کارشناسان شرکت کننده در نظرسنجی

نماد	سطح تحصیلات	رشته	سمت	نماد	سطح تحصیلات	رشته	سمت
E_1	دکتری	معدن	هیأت علمی	E_5	کارشناسی ارشد	برق	تکنسین
E_2	دکتری	معدن	هیأت علمی	E_6	کارشناسی	برق	تکنسین
E_3	دکتری	معدن	محقق	E_7	کارشناسی	برق	تکنسین
E_4	دانشجوی دکتری	معدن	مدیر	E_8	فوق دیپلم	برق	تکنسین

جدول پ ۲-۷- نتایج نظرسنجی از کارشناسان

اهمیت عوامل مؤثر بر روی عامل انگیزش									اهمیت شاخص‌های عمومی مؤثر بر اندیس تاب‌آوری سازمانی								
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8		E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
P	۹	۹	۹	۹	۷	۹	۷	۹	R1	۵	۹	۹	۹	۷	۹	۹	۷
S	۷	۷	۵	۵	۷	۹	۵	۷	R2	۷	۷	۷	۷	۷	۹	۹	۷
U	۷	۹	۷	۷	۷	۹	۷	۹	R3	۷	۷	۹	۹	۷	۹	۹	۹
W	۷	۷	۹	۹	۷	۹	۷	۷	R4	۵	۷	۹	۹	۷	۹	۷	۷
اهمیت عوامل مؤثر بر روی شاخص ابتکار عمل									اهمیت عوامل مؤثر بر روی شاخص حس مالکیت								
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8		E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
Q1	۵	۵	۷	۷	۵	۷	۷	۷	T1	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹
Q2	۵	۵	۵	۹	۵	۹	۷	۷	T2	۹	۷	۹	۹	۷	۹	۹	۷
Q3	۵	۷	۹	۹	۵	۹	۷	۷	T3	۹	۷	۷	۷	۹	۹	۹	۹
Q4	۷	۹	۹	۹	۷	۹	۷	۷									
Q5	۷	۵	۷	۷	۵	۹	۹	۷									
Q6	۹	۵	۹	۷	۹	۹	۹	۹									

جدول پ ۲-۷- ادامه

اهمیت عوامل مؤثر بر روی شاخص خلاقیت									اهمیت عوامل مؤثر بر روی شاخص انعطاف پذیری								
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8		E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
V1	۹	۹	۹	۹	۷	۷	۷	۷	X1	۷	۹	۷	۹	۷	۹	۷	۷
V2	۷	۷	۵	۷	۹	۷	۷	۷	X2	۹	۷	۷	۷	۷	۹	۹	۹
V3	۵	۳	۷	۵	۷	۵	۷	۷	X3	۷	۷	۹	۹	۷	۹	۷	۹
V4	۷	۷	۷	۷	۹	۹	۷	۹	X4	۹	۵	۷	۷	۷	۹	۷	۷
									X5	۵	۵	۵	۷	۷	۹	۷	۷
اهمیت عوامل مؤثر بر روی عامل آموزش									اهمیت عوامل مؤثر بر روی عامل تنوع								
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8		E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
Y1	۷	۷	۷	۹	۷	۷	۹	۷	T1	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹	۹
Y2	۹	۷	۵	۹	۷	۹	۹	۷	T2	۹	۷	۹	۹	۷	۹	۹	۷
Y3	۹	۷	۹	۹	۹	۹	۹	۹									
Y4	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷									

پس از اخذ نظرات کارشناسان، مراحل بعدی روش FDAHP اجرا شده و ضریب اهمیت نهایی عوامل مؤثر تخمین زده شدند. به عنوان نمونه، ماتریس‌های مقایسه زوجی تشکیل شده برای شاخص‌های عمومی تأثیرگذار بر روی اندیس تاب‌آوری سازمانی در جدول پ ۲-۸ ارائه شده‌اند. همچنین، ماتریس معکوس فازی و ضرایب اهمیت نهایی شاخص‌های عمومی اندیس تاب‌آوری سازمانی در جدول پ ۲-۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از منظر کارشناسانی که در نظرسنجی مشارکت کرده بودند، شاخص عمومی حس مالکیت اهمیت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها داشته است.

جدول پ ۲-۸- ماتریس‌های مقایسه زوجی شاخص‌های عمومی اندیس تاب‌آوری سازمانی

E_1	P	S	U	W	E_2	P	S	U	W	E_3	P	S	U	W
P	۱	۱,۲۹	۱,۲۹	۱,۲۹	P	۱	۱,۲۹	۱,۰۰	۱,۲۹	P	۱	۱,۸۰	۱,۲۹	۱
S	۰,۷۸	۱	۱	۱	S	۰,۷۸	۱	۰,۷۸	۱,۰۰	S	۰,۵۶	۱	۰,۷۱	۰,۵۶
U	۰,۷۸	۱	۱	۱	U	۱,۰۰	۱,۲۹	۱	۱,۲۹	U	۰,۷۸	۱,۴۰	۱	۰,۷۸
W	۰,۷۸	۱	۱	۱	W	۰,۷۸	۱	۰,۷۸	۱	W	۱	۱,۸۰	۱,۲۹	۱
E_4	P	S	U	W	E_5	P	S	U	W	E_6	P	S	U	W
P	۱	۱,۸۰	۱,۲۹	۱	P	۱	۱	۱	۱	P	۱	۱	۱	۱
S	۱	۱	۰,۷۱	۱	S	۱	۱	۱	۱	S	۱	۱	۱	۱
U	۱	۱,۴۰	۱	۱	U	۱	۱	۱	۱	U	۱	۱	۱	۱
W	۱	۱,۸۰	۱,۲۹	۱	W	۱	۱	۱	۱	W	۱	۱	۱	۱

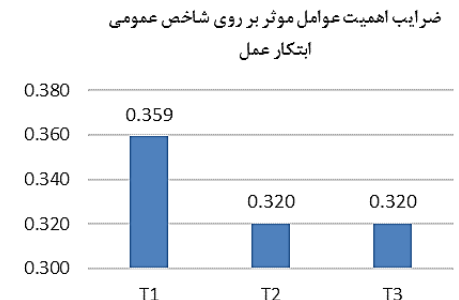
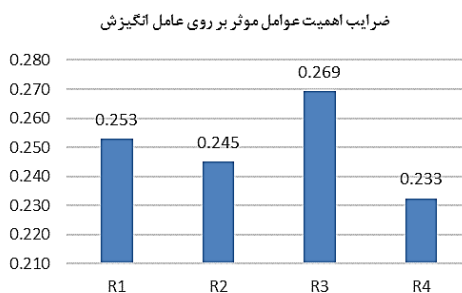
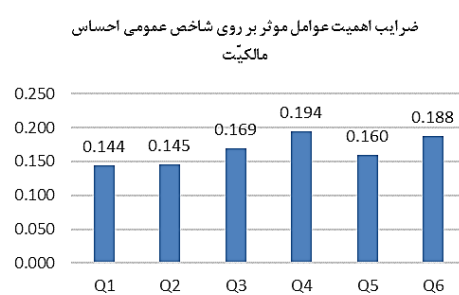
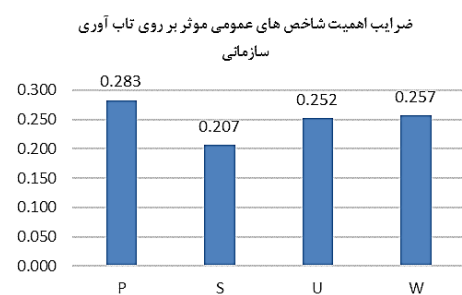
جدول پ ۲-۸- ادامه

E_7	P	S	U	W	E_8	P	S	U	W
P	۱	۱,۴۰	۱	۱	P	۱	۱,۲۹	۱	۱,۲۹
S	۰,۷۱	۱	۰,۷۱	۰,۷۱	S	۰,۷۸	۱	۰,۷۸	۱
U	۱	۱,۴۰	۱	۱	U	۱	۱,۲۹	۱	۱,۲۹
W	۱	۱,۴۰	۱	۱	W	۰,۷۸	۱	۰,۷۸	۱

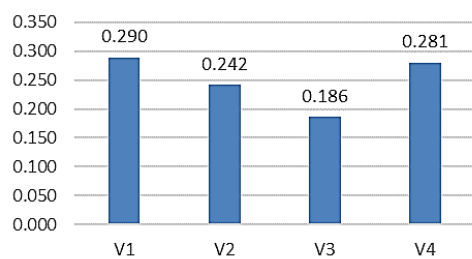
جدول پ ۲-۹- ماتریس معکوس فازی و ضرایب اهمیت شاخص های عمومی مؤثر بر تاب آوری سازمانی

ماتریس معکوس فازی				
CR4	P	S	U	W
P	(۱,۰۰,۱,۰۰,۱,۰۰)	(۱,۰۰,۱,۳۳,۱,۸۰)	(۱,۰۰,۱,۱۰,۱,۲۹)	(۱,۰۰,۱,۱۰,۱,۲۹)
S	(۰,۵۶,۰,۷۵,۱,۰۰)	(۱,۰۰,۱,۰۰,۱,۰۰)	(۱,۰۰,۱,۱۰,۱,۲۹)	(۱,۰۰,۱,۱۰,۱,۲۹)
U	(۰,۷۸,۰,۹۱,۱,۰۰)	(۱,۰۰,۱,۲۱,۱,۴۰)	(۰,۵۶,۰,۸۳,۱,۰۰)	(۰,۵۶,۰,۸۳,۱,۰۰)
W	(۰,۷۸,۰,۹۱,۱,۰۰)	(۱,۰۰,۱,۲۱,۱,۸۰)	(۰,۷۸,۰,۰۰,۱,۰۰)	(۰,۷۸,۰,۰۰,۱,۰۰)
ضرایب اهمیت نهایی				
CR4	$\tilde{Z}_i$	$\tilde{W}_i$	W_i	
P	(۱,۰۰,۱,۱۳,۱,۳۱)	(۰,۲۱,۰,۲۸,۰,۳۸)	۰,۲۸۳	
S	(۰,۶۹,۰,۸۵,۱,۰۰)	(۰,۱۵,۰,۲۱,۰,۲۹)	۰,۲۰۷	
U	(۰,۸۸,۱,۰۲,۱,۱۶)	(۰,۱۹,۰,۲۵,۰,۳۴)	۰,۲۵۲	
W	(۰,۸۸,۱,۰۲,۱,۲۳)	(۰,۱۹,۰,۲۵,۰,۳۶)	۰,۲۵۷	
$\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n = (۳,۴۵,۴,۰۲,۴,۷۱)$ $(\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} = (۰,۲۱,۰,۲۵,۰,۲۹)$				
			$\sum W_i =$	۱,۰۰۰

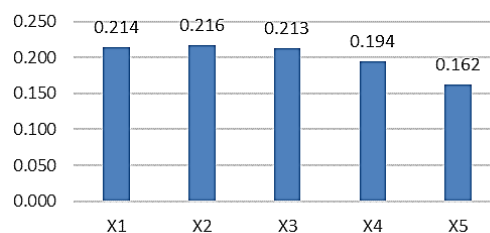
ضرایب اهمیت عوامل مؤثر در ادامه ارائه شده است:



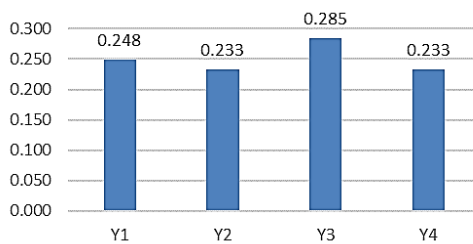
ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی شاخص عمومی خلاقیت



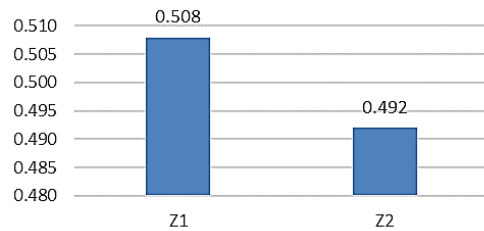
ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی شاخص عمومی انعطاف پذیری



ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی شاخص عامل آموزش



ضرایب اهمیت عوامل موثر بر روی عامل فرهنگ



Abstract

Critical infrastructure refers to an asset, a system, or a part of it necessary to maintain society's vital functions, health, safety, security, or economic or social welfare. Moreover, its disturbance due to lack of maintenance, improper operation, or errors in the design phase will significantly impact society. For years, risk management has been recognized as the only fundamental way to improve the safety of infrastructure systems against disasters. This approach focuses on designing sturdy systems that are able to withstand disasters using preventive and protective programs. However, recent events such as the COVID-19 pandemic have shown that most infrastructure systems cannot withstand all possible disruptions. Therefore, attention has shifted from robust design to resilient design that focuses on preparedness, response, and recovery. Resilience is an emerging concept whose application has increased significantly in managing engineering systems. In order to have an effective resilience management, first, an estimation of the system resilience should be undertaken. However, a lack of historical data and limited information are major challenges for system resilience estimation. The main reason is that most data collection systems are not designed for resilience assessment. Moreover, the available study dealing with resilience assessment have been used different indices to quantify the resilience of critical infrastructures including, robustness, recoverability, etc. These indices can be affected in a complex way by different factors such as operational conditions, protective practices, the recovery process, logistic process, etc. However, the available resilience studies are not so detailed regarding identifying and quantifying these influencing factors. Therefore, this thesis aims to develop and apply a practical methodology to estimate total resilience index (TRI) based on the combination of expert judgment and fuzzy set theory. By adopting this methodology, factors influencing resilience can be modeled effectively. The presented methodology adopts resilience concepts, including reliability, maintainability, organizational resilience, and PHM system efficiency indices to estimate the TRI. This method can emerge the strengths and weaknesses of system resilience either in technical (hard resilience) or organizational (soft resilience) areas. It helps managers to recognize those systems' areas that are more sensitive and require more attention. Consequently, they can follow a more detailed assessment and implement improved strategies. To show how the proposed methodology can be used in real cases, it was applied to the main fan system of Tabas Coal mine. In Tabas coal mine, the fan house of the mine includes three parallel main fans, called ventilation banks, with each bank containing two series axial fans. In this study, the type of disruption was defined as the fans' bearing failure. According to the results, the main fan restorative capacity is weaker than absorptive and adaptive capacities. Inadequate budgeting and low supportability for the system are the reasons for this weakness. Among the indicators affecting the reliability and maintainability indices of the main fan of the mine, the status of the operational conditions index is more sensitive than others. Moreover, it was found that in the field of personnel related to the main fan of the mine, not much attention is paid to maintaining and transmitting experience as well as learning from past experiences. In the field of organizational resilience index, each of the four generic indicators affecting the organizational resilience index has a weak condition and the ownership sense index is more critical than the other indicators. In this thesis, some attempts were made to provide appropriate strategies to improve the status of identified weaknesses. However, providing more accurate and useful solutions requires more extensive field investigation. Therefore, to improve the resilience of the main fan, the root causes of the identified weaknesses through more detailed field studies can be recognized. Then appropriate strategies can be adopted to improve their condition.

Keywords: Resilience, Ventilation system, Main fan, Parvadeh Tabas coal mine, Critical infrastructure.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics
PhD Thesis in Mineral Exploitation

Resilience Analysis of Ventilation System in Mechanized Longwall Mines

By: Adel Mottahedi

Supervisors:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. Mohammad Ataei

Advisors:

Dr. Abbas Barabadi

Dr. Ali Nouri Qarahasanlou

July 2021