

انتخاب استراتژی بهینه برای بهبود تاب‌آوری شبکه حمل و نقل با در نظر گرفتن

عدم قطعیت برای موعد زمانی وقوع تهدید

مهدی دزفولی نژاد، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

رضا رؤفی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

E-mail: r_raoufi@iauhvaz.ac.ir

احمد دالوند، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. دانشکده فنی دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸

چکیده

از بین تعاریف متعدد ارائه شده برای مفهوم تاب‌آوری شبکه‌های حمل و نقل، در این مقاله به شاخص ($WIPW$) پرداخته می‌شود. $WIPW$ یک شاخص نوآورانه برای سنجش تاب‌آوری است. با توجه به عدم قطعیت موجود در دوره پیش از بحران در خصوص پیش بینی دقیق موعد زمانی وقوع تهدید در این مقاله ضریبی با عنوان ضریب کارایی پیاده‌سازی استراتژی $E(\lambda_i)$ مبتنی بر دو شاخص جدید زمان و فرم منحنی زمان-تاب‌آوری ارائه شده و با استفاده از آن شاخص ($WIPW$) اصلاح می‌گردد. در انتهای مقاله یک مثال عددی ارائه شده است. در این مثال ۹ سبب مختلف با عنوان ضریب کارایی پیاده‌سازی استراتژی $E(\lambda_i)$ مبتنی بر دو شاخص جدید زمان و فرم منحنی زمان-تاب‌آوری ارائه شده و با استفاده از آن شاخص ($WIPW$) اصلاح می‌گردد. در انتهای مقاله انتخاب شده و مقادیر $E(\lambda_i)$ ، $WIPW$ و شاخص اصلاح شده (\widehat{WIPW})، برای تمامی این سبدها مقایسه می‌شوند. نتایج این مثال نشان داد، اگر مبنای انتخاب سبب بهینه، $WIPW$ باشد، سبب R و در صورت انتخاب بر مبنای (\widehat{WIPW})، سبب (\bar{R}) انتخاب می‌گردد. مقایسه پل‌های انتخاب شده در سبدهای R و \bar{R} نشان می‌دهد که پل $L-M$ از سبب R حذف شده و پل $G-H$ در سبب \bar{R} جایگزین آن شده است. جایگزینی این دو پل سبب شد تا شاخص زمان پیاده‌سازی از مقدار $1/1128$ برای سبب R به مقدار $1/1643$ برای سبب \bar{R} و شاخص فرم منحنی از مقدار $1/0.201$ برای سبب R به مقدار $1/0.213$ برای سبب \bar{R} و در نهایت کارایی پیاده‌سازی از $1/1352$ برای سبب R به $1/1852$ برای سبب \bar{R} بهبود یابند.

واژه‌های کلیدی: استراتژی، بهینه‌سازی، تاب‌آوری، پل، شبکه حمل و نقل

۱. مقدمه

اولیه در برابر رویدادهای مخرب احتمالی [Kameshwar et al., 2019].

علاوه بر این‌ها در خصوص شبکه‌های حمل و نقل، برونو و همکاران (۲۰۰۳)، چهار شاخص مختلف برای تاب‌آوری تعریف نمودند (چهار R تاب‌آوری) که عبارتند از: (۱) استواری^۱ (توانایی ایستادگی در برابر حوادث و بحران‌های بزرگ و حفظ یک سطح سرویس مشخص و از پیش تعریف شده بعد از وقوع حوادث)، (۲) افزونگی^{۱۱} (میزان توانایی المان‌ها و اجزا تشکیل دهنده سیستم در جایگزینی و پوشش یکدیگر)، (۳) توان مدیریت^{۱۲} (توان تشکیلاتی و سازمانی در مدیریت بحران شامل توانایی شناخت و درک بحران و مساله، توانایی اولویت بندی مسایل، توانایی در برنامه ریزی و سازمان‌دهی نیروی انسانی و منابع مالی پس از بحران) و (۴) سرعت عمل (بازگشت در کوتاه‌ترین زمان به یک سطح سرویس مشخص و قابل قبول) [Kameshwar et al., 2019].

در حال حاضر تحقیقات متعددی در حوزه مفهوم تاب‌آوری انجام شده است. گروهی از این تحقیقات، بطور مشخص بر موضوع اثر شکست پل‌ها بر تاب‌آوری شبکه تمرکز داشته‌اند. این گروه از تحقیقات عمدتاً بر دوره پس از بحران^{۱۴} تمرکز داشته و تعداد کمی از آن‌ها دوره پیش از بحران را مورد بررسی قرار داده است. این تحقیقات به تناسب شرایط حاکم بر مساله مورد بررسی، تعاریف مختلفی از تاب‌آوری سیستم را در نظر گرفته اند. جدول (۱) لیست برخی از این تحقیقات و مساله مورد بررسی در آن‌ها را نمایش می‌دهد.

مقاله حاضر، تعریف تاب‌آوری اشاره شده در تحقیق [Zhang and Wang, 2016] را مورد بررسی قرار می‌دهد، که عبارت است از ظرفیت و توانمندی شبکه، برای مواجهه با بحران‌های آینده. ژانگ و ونگ یک شاخص نوآورانه (WIPW)^{۱۵} مبتنی بر میزان استواری و افزونگی شبکه، برای سنجش تاب‌آوری ارائه نمودند و با استفاده از آن استراتژی بهینه به منظور افزایش

در بین زیر ساخت‌های حیاتی^۱ مختلف، شبکه‌های حمل و نقل^۲ به عنوان عاملی حیاتی در اقتصاد، سلامت، ایمنی و امنیت شناخته می‌شوند [طاهری و همکاران، ۱۳۹۷]. این شبکه‌ها با ایجاد امکان جابه جایی افراد و کالاها بر فعالیت‌های مختلف جامعه اثر گذار بوده و در پیشرفت اقتصادی و ایجاد رفاه اجتماعی نقش یک هدایت‌گر را بازی می‌کنند. قطع ارتباطی این شبکه‌ها، در اثر وقوع یک رویداد مخرب^۳، می‌تواند منجر به زیان مالی و اجتماعی بسزایی شود [رهگذر و همکاران، ۱۳۹۷ Bertola et al., 2019;]. همچنین تداوم فعالیت این شبکه‌ها پس از بحران نیز حیاتی است، چرا که این شبکه‌ها دارای نقشی کلیدی در ایجاد دسترسی برای اقدامات اضطراری^۴ و فعالیت‌های دوران بازیابی^۵ هستند [Twumasi-Boakye et al., 2019].

در بین اجزا مختلف شبکه حمل و نقل، پل‌ها به عنوان با اهمیت‌ترین و همچنین آسیب‌پذیرترین اجزا شبکه شناخته می‌شوند. [Banerjee et al., 2019]. اهمیت و آسیب‌پذیری پل‌ها نیاز به برنامه‌ریزی برای پیاده‌سازی استراتژی‌هایی به منظور کاهش آسیب‌پذیری^۶ آن‌ها، در مرحله پیش از بحران^۷ را ایجاد کرده است. در گذشته که برای کاهش آسیب‌پذیری پل‌ها صرفاً به مقاوم‌سازی سازه‌ای و محافظت فیزیکی پل‌ها توجه می‌شد، اما در سال‌های اخیر مفهوم جدیدی به نام تاب‌آوری^۸ و اثر شکست پل‌ها بر کاهش تاب‌آوری در سطح شبکه مورد توجه قرار گرفته است [Vugrin et al., 2014].

برای تاب‌آوری تاکنون تعاریف متعددی ارائه شده است. یک تعریف مشترک و قابل تعمیم عبارت است از: توانایی بازگشت سریع به شرایط اولیه پس از وقوع رویداد مخرب [Hosseini et al., 2016]. در حوزه زیرساخت‌های حیاتی نیز تعریفی که توسط شورای مشاوره زیرساخت‌های ملی^۹ ارائه شده، بطور گسترده مورد پذیرش قرار گرفته، که عبارت است از: توانایی پیش بینی، جذب، مواجهه و خروج سریع و بازیابی به شرایط

انتخاب استراتژی بهینه برای بهبود تاب‌آوری شبکه حمل و نقل با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای موعد زمانی وقوع تهدید

تاب‌آوری شبکه را در سطوح مختلف بودجه در اختیار تعیین نمودند.

افزایش تاب‌آوری شبکه در دوره پیش از بحران، چه از طریق بهسازی پل‌های موجود، چه از طریق ساخت پل‌های جدید، به صورت آنی و یکباره محقق نمی‌شود. بلکه تاب‌آوری شبکه طی یک دوره زمانی و به تدریج افزایش یافته و در نهایت به مقدار حداکثر خود می‌رسد. در واقع با پایان عملیات بهسازی هر یک از پل موجود در شبکه، یا با پایان احداث هر یک از پل‌های جدید، تاب‌آوری شبکه یک پله افزایش یافته و این روند تدریجی ادامه یافته تا در آخرین پله شبکه به مقدار حداکثر تاب‌آوری می‌رسد. این روند ممکن است چند ماه و یا بیش از یکسال به طول بیانجامد.

با توجه به این که پیش بینی دقیق موعد زمانی وقوع یک تهدید ، علی‌الخصوص در حوزه تهدیدات انسان ساز و یا تهدیدات طبیعی با قابلیت پیش بینی کم مثل زلزله، امکان پذیر نمی‌باشد، طی دوره زمانی افزایش تدریجی تاب‌آوری شبکه، همواره این احتمال وجود دارد که وقوع یک رویداد مخرب طبیعی و یا انسان‌ساز، پیش از پیاده‌سازی کامل استراتژی، مانع تحقق حداکثر تاب‌آوری شبکه را در سطوح مختلف بودجه در اختیار تعیین نمودند.

تاب‌آوری قابل حصول گشته و اهداف از پیش برنامه‌ریزی شده محقق نگردند.

عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی دقیق موعد زمانی وقوع تهدیدات، ضرورت توجه به نمودار زمان-تاب‌آوری یا خط سیر استراتژی را نمایان می‌سازد. خط سیر (تراژکتوری) یک استراتژی نشان دهنده مسیر بهبود تاب‌آوری شبکه در طول زمان می‌باشد. با توجه به عدم قطعیت زمان وقوع تهدیدات، تحلیل خط سیر یک استراتژی و توجه به فاکتورهای میزان تحذب مسیر بهبود تاب‌آوری و زمان پیاده‌سازی آن ، می‌تواند متولیان شبکه را در انتخاب یک استراتژی قابل اطمینان یاری کند.

با توجه به این که این فاکتورها در شاخص (WIPW) مورد بررسی قرار نگرفته اند، در این مقاله با هدف توسعه و تکمیل تحقیقات پیشین، ضریبی با عنوان ضریب کارایی پیاده‌سازی استراتژی $E(\lambda_i)$ ارائه شده و با استفاده از آن شاخص (WIPW) اصلاح می‌گردد. در شاخص اصلاح شده (\widehat{WIPW}) علاوه بر توجه به معیارهای مدنظر محققین پیشین، معیارهای زمان مورد نیاز برای پیاده‌سازی استراتژی و میزان تحذب مسیر بهبود تاب‌آوری در فرآیند جستجو استراتژی بهینه موثر می‌باشند.

جدول ۱. تحقیقات متمرکز بر پل در حوزه بهبود تاب‌آوری شبکه حمل و نقل

محققین	شرایط	مساله مورد بررسی	ملاک سنجش تاب‌آوری
لیو و همکاران (۲۰۰۹)، ژانگ و ونگ (۲۰۱۶)، سلطانی و همکاران (۲۰۱۶).	پیش از بحران	انتخاب تعدادی از پل‌ها برای بهسازی/ بهینه سازی تخصیص منبع برای بهسازی پل‌ها	توانایی پیش بینی، جذب، مواجهه (استواری و افزونگی شبکه)
لی و همکاران (۲۰۱۹)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)، فرانکوپول و همکاران (۲۰۱۱)، لئو و همکاران (۲۰۲۰)، مرشمن و همکاران (۲۰۲۰)	پس از بحران	تعیین توالی بهینه بازسازی پل‌های آسیب دیده / کمینه سازی هزینه و زمان بازسازی پل‌های آسیب دیده	خروج سریع به شرایط اولیه (توان مدیریت و سرعت عمل)

در پایان این مقاله نیز یک مثال عددی ارائه شده که در آن تفاوت انتخاب استراتژی بهینه با استفاده از شاخص (WIPW) و شاخص اصلاح شده (\widehat{WIPW}) ، مقایسه می‌شود. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که استفاده از شاخص (\widehat{WIPW}) برای

جستجوی استراتژی بهینه باعث انتخاب پل‌های متفاوتی نسبت به استفاده از (WIPW) می‌شود. توجه به این موضوع در شرایط محدودیت منابع که فقط امکان انتخاب تعداد محدودی از پل‌ها برای بهسازی و یا احداث مسیراست، بسیار حائز اهمیت است.

۲. انواع شاخص‌های سنجش تاب‌آوری

تا کنون شاخص‌های متعددی برای سنجش تاب‌آوری شبکه‌های حمل و نقل ارائه شده است. برخی از محققین به مرور و دسته بندی این شاخص‌ها پرداخته اند. [Wan et al., 2018; Sun et al., 2020]. ژائو و همکاران، (۲۰۱۹) این شاخص‌ها را در سه گروه توپولوژیک، مبتنی بر خصوصیات و مبتنی بر عملکرد، دسته بندی کرده اند. شاخص‌های توپولوژیک معمولاً بر مبنای یک سری از ویژگی‌های توپولوژیک شبکه مانند، مرکزیت میانی، طول کوتاه ترین مسیر، قطر شبکه، میانگین درجه گره‌ها و ... ساخته می‌شوند [Zhou et al., 2019].

در این مقاله یک شاخص توپولوژیک با عنوان میانگین وزنی تعداد مسیرهای مستقل و قابل اطمینان (WIPW)، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق این شاخص هر چه میانگین تعداد مسیرهای مستقل و قابل اطمینان در شبکه (G) بیشتر باشد، آن شبکه در برابر تهدیدات مختلف (θ) تاب‌آوری بیشتری خواهد داشت، زیرا با افزایش تعداد مسیرهای مستقل شاخص افزونگی و با افزایش قابلیت اطمینان مسیرها، شاخص استواری و در واقع تاب‌آوری شبکه بهبود می‌یابد.

دو مسیر زمانی مستقل تلقی می‌شوند که هیچ شاخه مشترکی با یکدیگر نداشته باشند [Zhang and Wang, 2016]. مفهوم مسیرهای مستقل ابتدا توسط آی پی و ونگ (۲۰۰۹)، جهت سنجش تاب‌آوری شبکه راه آهن چین ارائه گردید و سپس توسط ژانگ و ونگ (۲۰۱۶) جهت استفاده در شبکه‌های جاده‌ای دارای پل‌ها متعدد تطبیق داده شد. همچنین جانیس (۲۰۱۸) نیز شاخص مشابه‌ای در زمینه حمل و نقل هوایی ارائه کرده است.

لازم به ذکر است، (WIPW)، یک شاخص نوآورانه و منحصر به فرد بوده [Zhou et al., 2019] و دارای مزایای نسبی متعددی نسبت به سایر شاخص‌های موجود برای سنجش تاب‌آوری شبکه می‌باشد. بسیاری از شاخص‌های موجود مبتنی بر شمارش تعداد کوتاه ترین مسیرهای موجود در شبکه (Shortest path)

طراحی شده‌ان و بیشتر بازتاب‌کننده توانمندی شبکه در خدمت رسانی در شرایط عادی می‌باشند. در حالی که شاخص WIPW با رویکرد نوآورانه شمارش تعداد مسیرهای مستقل موجود در شبکه، توانمندی شبکه در شرایط بحرانی را به خوبی توصیف می‌کند.

شاخص WIPW با در نظر گرفتن اوزان نسبی برای مقایسه مسیرهای مستقل (W_k) و اوزان نسبی برای مقایسه گره‌ها (W_i)، برای مالکان شبکه این امکان وجود دارد که با در نظر گرفتن سلاقی خود، وزن دهی را شخصی سازی کرده و یا حتی با افزودن معیارهای جدید، عواملی دیگری در تعیین اهمیت نسبی مسیرها و گره‌ها موثر نمایند. بدین ترتیب در شرایط محدودیت، بصورت هدفمند منابع به مسیرهایی تعلق می‌گیرند که وزن بیشتری داشته باشند و با افزایش قابلیت اطمینان آن‌ها مقدار WIPW رشد بیشتری می‌کند.

در هر حال شاخص WIPW در کنار مزیت‌های فوق‌الذکر، محدودیت‌هایی نیز داشته که از جمله آن‌ها، انتخاب سبب بهینه بدون در نظر گرفتن مدت زمان پیاده سازی آن و عدم توجه به توالی پل‌ها انتخاب شده برای بهسازی یا احداث می‌باشند، که در این مقاله سعی شده با ارائه یک ضریب به نام ضریب کارایی، پل‌هایی برای سبب بهینه انتخاب شوند که در شرایط عدم اطمینان برای موعد زمانی وقوع بحران، قابلیت اطمینان بیشتری را محقق سازد.

مزیت روش پیشنهاد شده در این مقاله این است که برخلاف سایر رویکردها که در انتخاب سبب بهینه پل‌ها شبکه برای بهسازی یا احداث، صرفاً بر اثر بخشی پیاده سازی استراتژی توجه داشته و میزان اثر بخشی پیاده سازی استراتژی بر افزایش تاب‌آوری شبکه را ملاک انتخاب سبب پل‌ها قرار داده بودند. اما شاخص اصلاح شده در این مقاله علاوه بر توجه به اثر بخشی پیاده سازی استراتژی به کارایی پیاده سازی آن نیز توجه می‌کنند، تا استراتژی انتخاب شده به عنوان استراتژی بهینه بصورت همزمان اثر بخشی، کارایی بالایی داشته باشد.

انتخاب استراتژی بهینه برای بهبود تاب‌آوری شبکه حمل و نقل با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای موعد زمانی وقوع تهدید

رابطه (۱) الی (۴) نحوه محاسبه WIPW را نشان می‌دهند. مطابق رابطه (۱) تاب‌آوری شبکه برابر است با میانگین وزنی تاب‌آوری کلیه گره‌های شبکه و تاب‌آوری هر یک از گره‌های شبکه نیز بر اساس میانگین وزنی تعداد مسیرهای مستقل و قابل اطمینان بین آن گره و سایر گره‌ها سنجیده می‌شود. در این روابط، n تعداد تعداد گره‌ها شبکه، w_i بیانگر ارزش وزنی گره i ، $K(i, j)$ تعداد مسیرهای مستقل بین (i, j) ، w_k ارزش وزنی مسیر مستقل k ، $R_k(i, j)$ قابلیت اطمینان مسیر مستقل k بین گره، u ضریب اهمیت نسبی طول و ترافیک، L طول شاخه‌های گراف، L_1 طول شاخه i, j ، $L_{\max}(i, j)$ طول بزرگترین مسیر مستقل بین (i, j) ، $P_k(i, j)$ مجموعه شاخه‌های مسیر مستقل k بین (i, j) ، $T_1(i, j)$ ترافیک شاخه i ، Ω_i شاخص فاصله تا نزدیک‌ترین مرکز حیاتی، N مجموعه گره‌های معمولی، E مجموعه گره‌های مراکز حیاتی و q_1 قابلیت اطمینان شاخه i می‌باشد. در مدل ارائه شده توسط زانگ هر شاخه دارای یک پل در نظر گرفته شده بود و برای تعیین قابلیت اطمینان پل‌ها (q_1)، استفاده از منحنی شکنندگی پل و محاسبه احتمال شکست سازه‌ای توصیه شده بود.

تخصیص منابع به پل‌ها و افزایش تاب‌آوری شبکه حمل و نقل در دوره پیش از بحران از طریق سه استراتژی مختلف امکان‌پذیر می‌باشد: (۱) استراتژی (R): اختصاص منابع جهت بهسازی پل‌های موجود (بهبود تاب‌آوری شبکه به وسیله افزایش قابلیت اطمینان پل‌های موجود در شبکه از طریق اقدامات مناسب بهسازی)، (۲) استراتژی (B): اختصاص منابع جهت ساخت پل‌های جدید (ارتقاء تاب‌آوری شبکه به وسیله تقویت توپولوژی آن از طریق افزودن شاخه‌های جدید و (۳) استراتژی (R+B): ترکیبی از استراتژی (۱) و (۲) [Zhang and Wang, 2016]. محدودیت منابع مالی امکان پیاده‌سازی تمامی این استراتژی‌ها را از مالکان و متولیان شبکه سلب می‌نماید [Karamlou and Bocchini, 2014]. بنابراین می‌بایست با بررسی و مقایسه استراتژی‌های پیشنهاد شده، مناسب‌ترین را انتخاب نمایند. شکل (۱) خط سیر سه استراتژی a ، b و c را نشان می‌دهد. در این شکل فرض شده که یک مهلت زمانی ۹۰۰ روزه در دوره پیش از بحران از سوی مالکان به عنوان ضرب الاجل برای افزایش تاب‌آوری شبکه تعیین شده و تیم‌ها و گروه‌های اجرایی نیز سه استراتژی: a (فقط بهسازی)، b (فقط احداث) و c (بهسازی و احداث) را برای افزایش تاب‌آوری شبکه به مالکان پیشنهاد نموده‌اند که همگی تا سقف بودجه در اختیار تعریف شده‌اند.

۳. عدم قطعیت موعد زمانی وقوع تهدید

$$WIPW(G, \theta) = \sum_{i \in N} w_i \cdot \left(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1, i \neq j}^n \sum_{k=1}^{K(i,j)} (w_k) \cdot R_k(\theta)(i, j) \right) \quad (1)$$

$$w_k = K(i, j) \times \left(u \cdot \frac{L_{\max}(i, j)}{\left(\sum_{l \in P_k(i, j)} L_l \right) \cdot \sum_{k=1}^{K(i, j)} \left(\frac{L_{\max}(i, j)}{\sum_{l \in P_k(i, j)} L_l} \right)} + (1 - u) \cdot \frac{\min(T_1 | l \in P_k(i, j))}{\sum_{k=1}^{K(i, j)} \{ \min(T_1 | l \in P_k(i, j)) \}} \right) \quad (2)$$

$$w_i = \frac{\Omega_i}{\sum_{j=1}^n \Omega_j} \quad \text{and} \quad \Omega_i = \begin{cases} 1 & , i \in N \\ \frac{1}{\min(L_{P_k(i, j \in E)} | k=1, 2, \dots, K(i, j \in E))} & , i \in E \end{cases} \quad (3)$$

$$R_k(\theta)(i, j) = \begin{cases} \prod_{V \in P_k(i, j)} q_1(\theta), & \text{edge have bridge} \\ \prod_{V \in P_k(i, j)} 0.999, & \text{Otherwise} \end{cases} \text{ and } q_1(\theta) = \begin{cases} 0.999, & \text{before threat} \\ \text{Fragility Curve, after threat} \end{cases} \quad (4)$$

کارایی پیاده‌سازی استراتژی معرفی شده و با استفاده از آن شاخص (WIPW) اصلاح می‌شود.

۴. ضریب کارایی پیاده‌سازی استراتژی

ضریب کارایی پیاده‌سازی استراتژی $E(\lambda_i)$ معرفی شده در این مقاله، مبتنی بر فاکتورهایی زمان پیاده‌سازی استراتژی و فرم منحنی زمان-تاب‌آوری آن تعریف شده است. رابطه (۵) نحوه محاسبه این ضریب را نشان می‌دهد. در این رابطه $MOS(\lambda_i)$ شاخص فرم منحنی زمان-تاب‌آوری و $MOT(\lambda_i)$ شاخص زمان پیاده‌سازی استراتژی می‌باشد.

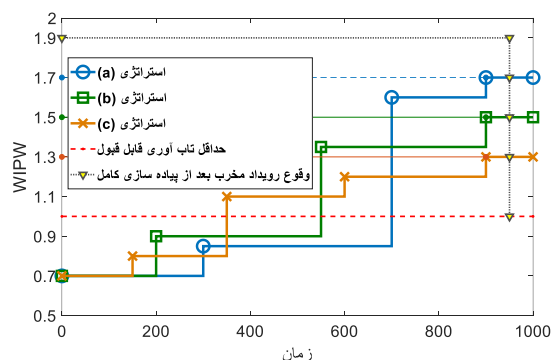
$$E(\lambda_i) = MOS(\lambda_i) \times MOT(\lambda_i) \quad (5)$$

۴-۱ شاخص فرم منحنی زمان-تاب‌آوری $MOS(\lambda_i)$

در شکل ۲ نیز فرض شده که مهلت زمانی ۹۰۰ روزه به عنوان ضرب الاجل افزایش تاب‌آوری شبکه تعیین شده است. هر سه استراتژی a, b و c دارای WIPW برابر (۱/۵) و مدت زمان پیاده‌سازی یکسان (۸۰۰ روز) و پیش از ضرب الاجل هستند. اما فرم نمودار زمان-تاب‌آوری استراتژی b به نحوی است که در تمامی مواعدهای زمانی، بیشترین تاب‌آوری را نسبت به سایر استراتژی‌های مورد بررسی، برای شبکه ایجاد می‌کند.

اگر مالکان شبکه بدون مقایسه فرم نمودار و صرفاً به دلیل یکسان بودن تاب‌آوری نهایی، استراتژی دیگری به غیر از b را (مثلاً a) به عنوان استراتژی بهینه انتخاب نمایند و در صورتی که رویداد مخرب نیز برخلاف پیش‌بینی آن‌ها قبل از روز ۹۰۰ ام (مثلاً روز ۴۰۰ ام) رخ دهد، استراتژی a بدترین انتخاب خواهند بود.

اگر رویداد مخرب مطابق پیش‌بینی مالکان، پس از ۹۰۰امین روز رخ بدهد، استراتژی (a) بهترین انتخاب خواهد بود. زیرا استراتژی a بیشترین افزایش تاب‌آوری شبکه را نسبت به سایر استراتژی‌ها دارد (از ۰/۷ به مقدار ۱/۷). اما در مقایسه استراتژی‌های a, b و c باید دقت نمود در مواعدهای زمانی مختلف، برتری نسبی این استراتژی‌ها تغییر می‌کند. بطور مثال اگر رویداد مخرب در یک نقطه زمانی پیش از پیاده‌سازی کامل استراتژی‌های مورد مقایسه (مثلاً قبل از روز ۷۰۰ ام) رخ دهد، استراتژی a بدترین انتخاب خواهد بود.



شکل ۱. نمودار زمان-تاب‌آوری استراتژی‌های a, b و c

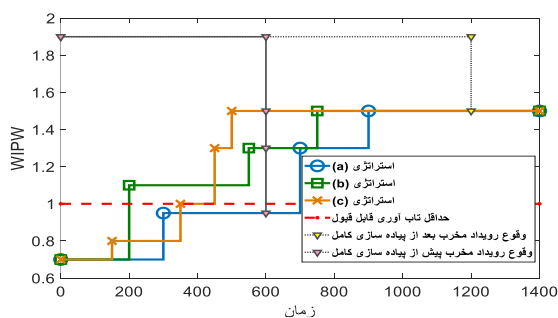
شاخص (WIPW) در انتخاب استراتژی بهینه فقط بر مقدار تاب‌آوری نهایی تمرکز داشته و فاکتورهایی مانند زمان پیاده‌سازی استراتژی (کوتاه یا طولانی بودن) و چگونگی افزایش تدریجی تاب‌آوری قابل حصول (توالی پل‌های انتخاب شده در استراتژی) در این شاخص مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به این که پیش‌بینی دقیق موعد زمانی وقوع یک تهدید (علی‌الخصوص در حوزه تهدیدات انسان‌ساز مثل حملات خرابکارانه)، امکان‌پذیر نمی‌باشد، توجه به فاکتورهایی مانند زمان و توالی پل‌ها، در فرآیند مقایسه و جستجو استراتژی بهینه، حائز اهمیت و ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله با هدف توسعه و تکمیل شاخص (WIPW)، ضریبی با عنوان ضریب

انتخاب استراتژی بهینه برای بهبود تاب‌آوری شبکه حمل و نقل با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای موعد زمانی وقوع تهدید

زمان یک استراتژی به گونه ای باشد، خط ایده آل بالاتر از خط رگرسیون قرار گیرد (شکل ۴-ب) شاخص نسبت سطح کوچکتر از ۱ و در مقابل اگر فرم نمودار سبب شود، که خط رگرسیون بالاتر خط ایده آل قرار گیرد (شکل ۴-پ) شاخص نسبت سطح بزرگتر از ۱ می‌شود. بنابراین از بین دو یا چند استراتژی، استراتژی دارای نمودار با تحدب بیشتر، شاخص نسبت سطح بزرگتر و در نتیجه ضریب کارایی بزرگتری خواهد داشت.

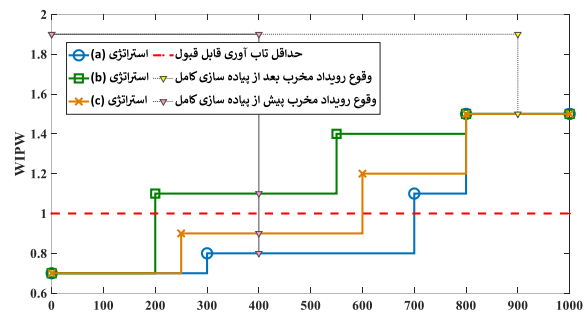
۴-۲ شاخص زمان پیاده‌سازی استراتژی $MOT(\lambda_i)$

در شکل ۳ نیز مجدداً فرض شده که مهلت زمانی ۹۰۰ روزه به عنوان ضرب الاجل افزایش تاب‌آوری شبکه تعیین شده است، هر سه استراتژی a، b و c دارای WIPW یکسان (۱/۵) هستند، اما استراتژی c در مدت زمان کوتاه تری (۵۰۰ روز)، به این مقدار می‌رسد. اگر مالکان بدون مقایسه زمان، استراتژی دیگری به غیر از c (بطور مثال استراتژی a) را انتخاب کرده باشند و رویداد مخرب نیز برخلاف پیش بینی به جای روز ۱۹۰۰م در روز ۶۰۰ برنامه ریزی رخ دهد، استراتژی a بدترین انتخاب خواهد بود.



شکل ۳. نمودار زمان-تاب‌آوری استراتژی‌های a، b و c

لذا هر استراتژی که بتواند اهداف از پیش تعیین شده مالکان را سریع‌تر محقق سازد، استراتژی کاراتری خواهد بود. شاخص زمان پیاده‌سازی هر استراتژی $MOT(\lambda_i)$ با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. در این رابطه t_{IL} زمان ایده آل برای افزایش تاب‌آوری شبکه و $t(\lambda_i)$ مدت زمان مورد نیاز برای پیاده سازی استراتژی (λ_i) پس از تعیین توالی بهینه می باشد.



شکل ۲. نمودار زمان-تاب‌آوری استراتژی‌های a، b و c

توالی پل‌های انتخاب شده جهت بهسازی یا احداث، فرم نمودار زمان-تاب‌آوری را مشخص می‌کند. با تغییر در توالی پل‌ها می‌توان فرم نمودار زمان-تاب‌آوری آن‌ها را تغییر داد. در این مقاله استراتژی‌هایی با فرم نمودار محدب‌تر، به عنوان استراتژی‌هایی با کارایی بیشتر در نظر گرفته می‌شوند. زیرا در این استراتژی‌ها، با ازاء هر نقطه روی محور زمان، حداکثر تاب‌آوری ممکن آن نقطه محقق شده است.

برای اینکه میزان تحدب نمودار استراتژی‌های مختلف قابل مقایسه باشد، در این مقاله یک شاخص کمی با عنوان شاخص نسبت سطح $MOS(\lambda_i)$ پیشنهاد شده است. شاخص نسبت سطح عبارت است از نسبت مساحت زیر سطح خط رگرسیون شده بر منحنی تاب‌آوری-زمان یک استراتژی $RG(\lambda_i)$ به برمساحت زیر خط ایده آل آن استراتژی $IL(\lambda_i)$. رابطه (۶) نحوه محاسبه این شاخص را نمایش می‌دهد. در این روابط t_S و t_F به ترتیب روزهای شروع و پایان پیاده‌سازی استراتژی λ_i می باشد.

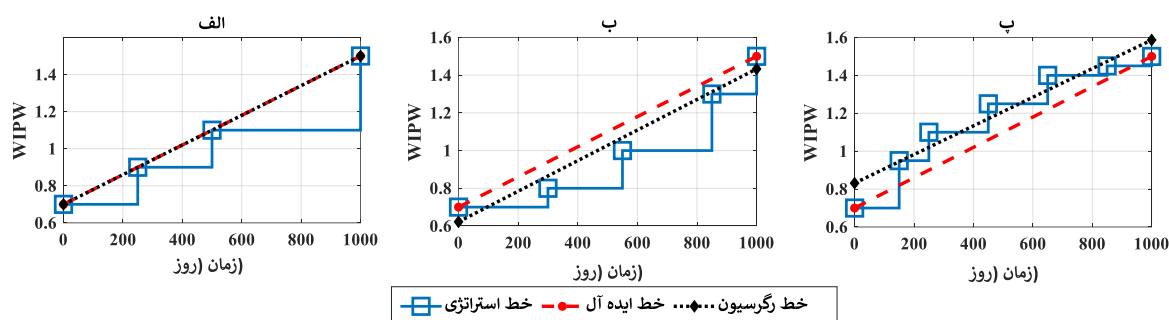
$$MOS(\lambda_i) = \frac{\int_{t_S(\lambda_i)}^{t_F(\lambda_i)} RG(\lambda_i)}{\int_{t_S(\lambda_i)}^{t_F(\lambda_i)} IL(\lambda_i)} \quad (6)$$

خط ایده آل، خطی است که بصورت مستقیم نقاط ابتدا و انتهای نمودار یک استراتژی را به یکدیگر متصل می‌کند. اگر خط رگرسیون دقیقاً بر خط ایده آل آن منطبق باشد (شکل ۴-الف)، مساحت زیر هر دو خط رگرسیون و ایده آل برابر شده و شاخص نسبت سطح برابر ۱ خواهد شد، اما اگر فرم نمودار تاب‌آوری -

عنوان کارفرمای پروژه بهسازی یا احداث تعیین می شود. بنابراین در این مقاله هر چه مدت زمان مورد نیاز برای پیاده سازی یک استراتژی کمتر از زمان ایده آل مدنظر کارفرما باشد، آن استراتژی کارا تر در نظر گرفته می شود.

$$MOT(\lambda_i) = \frac{t_{IL}}{t(\lambda_i)} \quad (7)$$

زمان ایده آل (t_{IL}) در واقع همان ضرب الاجل تعیین شده از سوی مالکان شبکه برای افزایش تاب آوری شبکه است که بر اساس برنامه ریزی ها راهبردی و اهداف بلند مدت مالکان به



شکل ۴. حالات مختلف خط ایده آل نسبت به خط رگرسیون

بصورت همزمان، X_r و X_b متغیرهای باینری برای پل های انتخاب شده به ترتیب جهت بهسازی یا احداث، X_{rt} و X_{bt} متغیرهای باینری برای پل های انتخاب شده به ترتیب جهت بهسازی یا احداث در موعد زمانی t می باشند.

بهینه سازی سطح اول:

$$\text{Maximize: } WIPW(G, \theta) \quad (9)$$

Subject to:

$$\sum_{r=1}^{n_r} X_r \cdot C_r \leq b_{max} \quad \text{فقط بهسازی}$$

$$\sum_{b=1}^{n_b} X_b \cdot C_b \leq b_{max} \quad \text{فقط احداث}$$

$$\sum_{r=1}^{n_r} X_r \cdot C_r + \sum_{b=1}^{n_b} X_b \cdot C_b \leq b_{max} \quad \text{هر دو}$$

بهینه سازی سطح دوم:

$$\text{Maximize: } E(\lambda) \quad (10)$$

Subject to:

$$\sum_{r=1}^{n_r} X_{rt} \leq n_t \quad \forall t = 1.2 \dots t_{max} \quad \text{فقط بهسازی}$$

$$\sum_{b=1}^{n_b} X_{bt} \leq n_t \quad \forall t = 1.2 \dots t_{max} \quad \text{فقط احداث}$$

$$\sum_{r=1}^{n_r} X_{rt} + \sum_{b=1}^{n_b} X_{bt} \leq 1 \quad \forall t = 1.2 \dots t_{max} \quad \text{هر دو}$$

در بهینه سازی سطح اول مشابه تحقیق ژانگ، از بین پل های موجود و جدید سببی انتخاب می شود که تا سقف منابع مالی

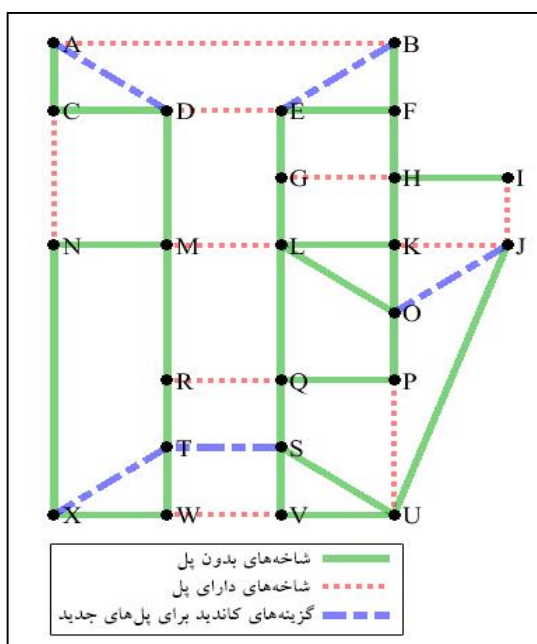
۵. شاخص اصلاح شده WIWP

شاخص تاب آوری اصلاح شده ($WIWP$) مطابق رابطه (۸) محاسبه می شود. در این رابطه $WIWP(\lambda_i)$ بیانگر میانگین تعداد مسیرهای مستقل و قابل اطمینان در شبکه پس از پیاده سازی استراتژی λ_i و $E(\lambda_i)$ نیز بیانگر ضریب اصلاح تاب آوری استراتژی های مورد مقایسه از نظر کارایی پیاده سازی می باشد.

$$WIWP(\lambda_i) = E(\lambda_i) \cdot WIWP(\lambda_i) \quad (8)$$

در این مقاله از بهینه سازی دو سطحی برای جستجوی مقدار پیشینه $WIWP$ استفاده می شود، در سطح اول شاخص $WIWP$ و در سطح دوم ضریب کارایی $E(\lambda_i)$ بیشینه می شود. در هر دو سطح، متناسب با سایز شبکه مورد بررسی می توان از انواع الگوریتم های فرا ابتکاری مثل ژنیتک (GA) استفاده نمود. روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب بیانگر بهینه سازی سطح اول و دوم می باشند. در این روابط، b_{max} حداکثر بودجه در اختیار، n_r تعداد پل های نیازمند بهسازی، C_r هزینه بهسازی هر یک از پل ها، n_b تعداد پل های جدید پیشنهادی، C_b هزینه ساخت هر یک از پل های جدید، n_t حداکثر تعداد پل قابل بهسازی و یا احداث

انتخاب استراتژی بهینه برای بهبود تاب‌آوری شبکه حمل و نقل با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای موعد زمانی وقوع تهدید



شکل ۵. توپولوژی شبکه مورد بررسی

رویداد مخرب مورد بررسی در این مثال حمله خرابکارانه می باشد. از بین انواع مختلف شیوه‌های تهاجم ممکن به پل‌ها (شکل ۶) شامل، انفجار با وسایل نقلیه از طریق زمینی و یا آبی، انفجار با وسایل دستی، آتش زدن، ضربه مستقیم با وسایل نقلیه از طریق زمینی و آبی، تخریب با تجهیزات آسیب‌رسان غیر انفجاری (ری، ۲۰۰۷)، شیوه‌ی تهاجم انفجار با وسایل نقلیه از طریق زمینی (VBIED) و از بین انواع مختلف سناریو مربوط به شیوه این تهاجم (جدول ۲)، در این مثال سناریو حمله انفجاری به پل با استفاده از خودروی سواری سدان به عنوان سناریو مبنا تهدید (θ) و مبنای ارزیابی و سنجش تاب‌آوری شبکه در نظر گرفته شد.

جدول ۲. انواع شیوه تهاجم (VBIED) [Frazier et al., 2009]

جرم مواد منفجره	نوع وسیله نقلیه زمینی
(kg معادل TNT)*	
۲۲۷	خودروی سواری کامپکت
۴۵۴	خودروی سواری سدان
۱۸۱۴	ون مسافری

در اختیار (b_{max})، تاب‌آوری شبکه (WIWP) را حداکثر کند. جواب‌های تولید شده در سطح اول بصورت یک بردار باینری [۰، ۱] بوده و اگر یک پل در جواب بهینه برای بهسازی یا احداث انتخاب شود درایه مشخص کننده آن برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

در بهینه سازی سطح دوم اما، تقدم و تأخر پل انتخاب شده در سبد سطح اول به نحوی تنظیم می‌شود که ضریب کارایی حداکثر شود. جواب‌های تولید شده در سطح دوم بصورت یک بردار عدد صحیح بوده و درایه‌های تشکیل دهنده این بردار معرف کد پل‌های انتخاب شده در سبد پل‌های سطح اول می‌باشند. برای تعیین توالی بهینه پل‌ها، ترکیبات مختلف این بردار از طریق توابع تقاطع و جهش تولید شده و بر اساس تابع هدف کارایی برازش شده و به سمت توالی بهینه همگرا می‌شوند.

۶. مثال عددی

در این بخش، جهت بیان تفاوت انتخاب استراتژی بهینه با استفاده از شاخص‌های (WIPW) و (\widehat{WIPW})، یک مثال عددی ارائه شده است. شبکه مورد بررسی در این مثال بر مبنای توپولوژی شبکه سوفالز (Sioux Falls) ایجاد شده است (شکل ۵). این شبکه دارای ۲۴ گره معمولی و ۳۷ شاخه بوده که در این مثال ۱۰ شاخه آن دارای پل در نظر گرفته شده است. همچنین ۵ گزینه برای افزودن پل جدید در این شبکه پیشنهاد شده است.

بودجه‌ای برای بهسازی پل‌های موجود و افزایش قابلیت اطمینان آن‌ها و یا احداث پل‌های جدید به منظور بهبود تاب‌آوری شبکه اختصاص داده نشود، در صورت وقوع رویداد مخرب، میانگین تعداد مسیرهای مستقل و قابل اطمینان در این شبکه به $1/0814$ کاهش می‌یابد.

در این مثال حداقل مقدار مورد پذیرش شاخص تاب‌آوری برای شبکه برابر با ۲ در نظر گرفته شده است. $WIWP=2$ به این معناست که بطور میانگین بین تمام گره‌های شبکه دو مسیر ارتباطی کاملاً مستقل و قابل اطمینان وجود داشته باشد تا در صورت انسداد هرکدام از این مسیرها در اثر وقوع رویداد مخرب، بتوان از مسیر دیگر به عنوان مسیر جایگزین استفاده نمود.

مالکان شبکه یک بودجه ۲۵۰ میلیارد تومانی و یک مهلت زمانی دو ساله (۷۳۰ روزه) را به عنوان ضرب الاجل جهت افزایش تاب‌آوری شبکه به بیش از حداقل مورد پذیرش در نظر گرفته اند. مطابق برآوردهای انجام شده، مجموع بودجه مورد نیاز برای بهسازی هر ۱۰ پل موجود و احداث هر ۵ پل جدید به ترتیب برابر ۴۵۳ و ۵۰۰ میلیارد تومان و در مجموع برابر ۹۵۳ میلیارد تومان بوده (جدول ۴) که به مراتب بیش از بودجه در اختیار است. با توجه به محدودیت منابع در اختیار می‌بایست از بین پل‌های موجود برای بهسازی و گزینه‌های کاندید برای احداث، یک سبد بهینه را به نحوی انتخاب نمود که تا سقف منابع در اختیار، شاخص تاب‌آوری را بیشینه کند.

جدول ۴. اطلاعات شاخه‌های شبکه

شاخه	پل	L	AADT	q_l	$c_{r/b}$	$t_{r/b}$
A-B	✓	۱۹/۵	۱۶۰۰	۰/۱۳۶	۸۶	۲۳۹
A-C	✓	۶/۵	۲۳۰۰	۰/۹۹۹	-	-
B-F	×	۶/۵	۵۰۰	۰/۹۹۹	-	-
C-D	×	۶/۵	۱۲۰۰	۰/۹۹۹	-	-
C-N	✓	۱۳	۱۶۰۰	۰/۴۳۵	۵۶	۱۵۱
D-E	✓	۶/۵	۱۹۰۰	۰/۳۶۷	۶۴	۱۷۷

جرم مواد منفجره (kg معادل TNT)*	نوع وسیله نقلیه زمینی
۴،۵۳۶	کامیون متوسط باربری درون شهری
۱۳۰،۶۸۰	کامیون بزرگ / تانکر حمل آب
۲۷،۲۱۶	کامیون کشنده / تریلر

* مقادیر مندرج در جدول بر مبنای رویکرد بدترین حالت ممکن در نظر گرفته شده است.

در تحقیقات مختلف برای تعیین قابلیت اطمینان پل‌ها در برابر انواع مختلف رویدادهای مخرب از جمله حملات خرابکارانه، ترسیم منحنی شکنندگی پیشنهاد شده [شایانفر و همکاران، ۱۳۹۹; Yu et al., 2019]. جدول (۳) تفاوت معیارهای شدت‌های مورد استفاده در ترسیم منحنی شکنندگی با توجه به نوع رویداد مخرب مورد بررسی را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است ترسیم منحنی شکنندگی برای پل‌ها جزء اهداف این مقاله نمی‌باشد.

جدول ۳. معیارهای مختلف شدت در ترسیم منحنی شکنندگی

معیار شدت (IM)	تهدید مورد بررسی
حداکثر شتاب زمین	زلزله
ارتفاع موج	سیل
فاصله مقیاس شده	حمله خرابکارانه (انفجار)
سرعت کامیون	حمله خرابکارانه (برخورد کامیون)
دمای سازه	حمله خرابکارانه (آتش)

در جدول (۴) قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده برای شاخه‌های دارای پل در برابر سناریو مبنای ارزیابی، منابع مالی و زمان مورد نیاز برای بهسازی (افزایش قابلیت اطمینان) پل‌های موجود و یا احداث پل‌های جدید و اطلاعاتی مانند طول و ترافیک شاخه‌ها ارائه شده است.

قابلیت اطمینان کلیه شاخه‌های دارا و بدون پل در شرایط نرمال برابر ۰/۹۹۹ در نظر گرفته شده، بنابراین مطابق رابطه (۱) در شرایط نرمال این شبکه بطور میانگین دارای $2/6484$ مسیر مستقل و قابل اطمینان (WIWP) می‌باشد. در صورتی که هیچ

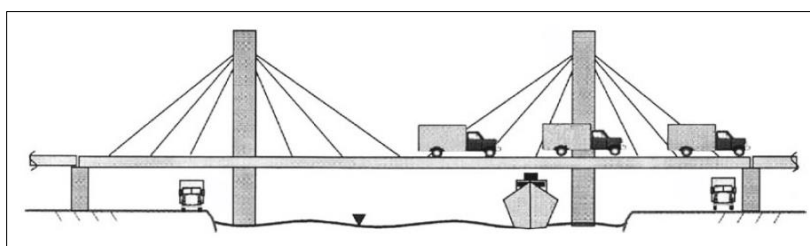
انتخاب استراتژی بهینه برای بهبود تاب‌آوری شبکه حمل و نقل با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای موعده زمانی وقوع تهدید

شاخه	پل	L	AADT	q_l	$c_{T/b}$	$t_{T/b}$
B-E	✓	۹/۲	۱۶۰۰	۰/۹۹۹	۱۱۰	۲۶۰
J-O	✓	۹/۲	۱۴۰۰	۰/۹۹۹	۱۱۰	۲۹۰
S-T	✓	۶/۵	۶۰۰	۰/۹۹۹	۱۰۰	۲۴۰
T-X	✓	۹/۲	۵۰۰	۰/۹۹۹	۸۰	۲۱۰

* واحد طول کیلومتر، هزینه‌ها به میلیارد تومان و زمان به روز می‌باشد.

جهت بیان تفاوت انتخاب سبد بهینه با استفاده از شاخص‌های (WIPW) و (\overline{WIPW})، ۹ سبد به شرح زیر انتخاب شده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. ابتدا یکبار سبد بهینه با استفاده از روش بهینه‌سازی یک سطحی برای استراتژی‌های فقط بهسازی (R)، فقط احداث (B) و ترکیبی (R+B)، و سپس ۳ سبد بهینه دیگر با استفاده از روش بهینه‌سازی دو سطحی برای هر سه استراتژی فوق با عناوین (\bar{R})، (\bar{B}) و ($\bar{R}+\bar{B}$)، انتخاب می‌شود. همچنین برای هر سه این استراتژی‌ها، ۳ سبد غیر بهینه بصورت تصادفی با عناوین (R^*)، (B^*) و (R^*+B^*)، انتخاب شده است. انتخاب پل‌ها برای سبد بهینه‌سازی یک سطحی صرفاً بر مبنای مقدار تاب‌آوری نهایی انجام می‌شود، در حالی که برای انتخاب پل‌ها در سبد بهینه‌سازی دو سطحی، علاوه بر در نظر گرفتن در نظر گرفتن مقدار تاب‌آوری نهایی، اثر زمان و توالی بهینه پل نیز در نظر گرفته می‌شود. پل‌های سبد غیر بهینه، بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند، اما در انتخاب آن‌ها به مانند سایر سبدها کنترل می‌شود تا مدت زمان پیاده سازی ($t(\lambda_i)$)، پیش از ضرب الاجل بوده و هزینه مورد نیاز برای پیاده سازی آن‌ها ($C(\lambda_i)$)، کمتر از بودجه در اختیار شود. برای حل مسائل بهینه‌سازی یک سطحی و دو سطحی از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شده است. در جدول (۵) نتایج انتخاب سبد بهینه با استفاده از روش یک سطحی و دو سطحی و همچنین سبد غیر بهینه تصادفی ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که استفاده از روش بهینه‌سازی دو سطحی و شاخص (\overline{WIPW}) برای جستجوی سبد بهینه باعث انتخاب پل‌های متفاوتی نسبت به استفاده از روش بهینه‌سازی یک سطحی و شاخص (WIPW) شده است.

شاخه	پل	L	AADT	q_l	$c_{T/b}$	$t_{T/b}$
D-M	×	۱۳	۱۶۰۰	۰/۹۹۹	-	-
E-F	×	۶/۵	۲۱۰۰	۰/۹۹۹	-	-
E-G	×	۶/۵	۱۷۰۰	۰/۹۹۹	-	-
F-H	×	۶/۵	۱۱۰۰	۰/۹۹۹	-	-
G-H	✓	۶/۵	۲۳۰۰	۰/۸۸۲	۱۱	۱۵
G-L	×	۶/۵	۱۳۰۰	۰/۹۹۹	-	-
H-I	×	۶/۵	۱۶۰۰	۰/۹۹۹	-	-
H-K	×	۶/۵	۹۰۰	۰/۹۹۹	-	-
I-J	✓	۶/۵	۷۰۰	۰/۷۹۸	۲۱	۴۶
J-K	✓	۶/۵	۱۵۰۰	۰/۱۷۱	۸۵	۲۳۶
J-U	×	۲۶/۸	۲۲۰۰	۰/۹۹۹	-	-
K-L	×	۶/۵	۷۰۰	۰/۹۹۹	-	-
K-O	×	۶/۵	۱۰۰۰	۰/۹۹۹	-	-
L-M	✓	۶/۵	۱۱۰۰	۰/۸۴۴	۱۶	۱۶
L-O	×	۹/۲	۲۱۰۰	۰/۹۹۹	-	-
L-Q	×	۱۳	۸۰۰	۰/۹۹۹	-	-
M-N	×	۶/۵	۱۰۰۰	۰/۹۹۹	-	-
M-R	×	۱۳	۸۰۰	۰/۹۹۹	-	-
N-X	×	۲۶	۱۵۰۰	۰/۹۹۹	-	-
O-P	×	۶/۵	۲۴۰۰	۰/۹۹۹	-	-
P-Q	×	۶/۵	۲۱۰۰	۰/۹۹۹	-	-
P-U	✓	۱۳	۹۰۰	۰/۸۰۱	۲۰	۴۴
Q-R	✓	۶/۵	۱۹۰۰	۰/۶۳۰	۳۷	۹۶
Q-S	×	۶/۵	۲۱۰۰	۰/۹۹۹	-	-
R-T	×	۶/۵	۶۰۰	۰/۹۹۹	-	-
S-U	×	۹/۲	۵۰۰	۰/۹۹۹	-	-
S-V	×	۶/۵	۹۰۰	۰/۹۹۹	-	-
T-W	×	۶/۵	۵۱۵	۰/۹۹۹	-	-
U-V	×	۶/۵	۸۱۱	۰/۹۹۹	-	-
V-W	✓	۶/۵	۶۹۲	۰/۴۴۱	۵۷	۱۵۴
W-X	×	۶/۵	۹۰۰	۰/۹۹۹	-	-
A-D	✓	۹/۲	۲۲۰۰	۰/۹۹۹	۱۰۰	۲۳۰



شکل ۶. انواع مختلف شیوه‌های تهاجم به پل ها [Ray et al., 2007]

جدول ۵. نتایج انتخاب سبدها بهینه با استفاده روش یک سطحی و دو سطحی و همچنین سبدها غیر بهینه تصادفی

گروه	بهینه سازی	استراتژی	سبدها انتخاب شده	$\sum x_t$	$\sum x_r$	$C(\lambda_i)$	$t(\lambda_i)$
۱	یک سطحی	(R)	C-N, D-E, L-M, P-U, Q-R, V-W	۰	۶	۲۵۰	۶۵۶
	(WIPW)	(B)	J-O, S-T	۲	۰	۲۱۰	۵۳۲
		(R+B)	A-B, D-E, L-M, T-X	۱	۳	۲۴۶	۶۵۸
۲	دو سطحی	(\tilde{R})	C-N, D-E, G-H, L-M, Q-R, V-W	۰	۶	۲۴۱	۶۲۷
	(\tilde{WIPW})	(\tilde{B})	B-E, S-T	۲	۰	۲۱۰	۵۰۲
		($\tilde{R}+\tilde{B}$)	D-E, J-K, S-T	۱	۲	۲۴۹	۶۵۶
۳	غیر بهینه	(R^*)	C-N, G-H, I-J, J-K, L-M, P-U, Q-R	۰	۷	۲۴۶	۶۲۳
	تصادفی	(B^*)	B-E, J-O	۲	۰	۲۲۰	۵۵۰
		(R^*+B^*)	C-N, G-H, I-J, L-M, P-U, Q-R, T-X	۱	۶	۲۴۱	۵۹۷

مقایسه بین سبدهای مختلف برای هر استراتژی را نمایش می‌دهد. در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود که در صورت انتخاب سبدها بهینه پل‌ها بر اساس شاخص پیشین (سبدها گروه ۱) مقدار تاب آوری نهایی بیشتر خواهد بود. اما باید دقت نمود اگر چه مقدار تاب آوری نهایی سبدها انتخاب شده بر اساس شاخص اصلاح شده (سبدها گروه ۲)، کمتر است، اما در تمام دوره‌های زمانی بهبود تاب آوری شبکه، نمودار سبدها بالاتر از نمودار سبدها قرار دارد. در نظر گرفتن عدم قطعیت برای موعد زمانی وقوع تهدید، موجب می‌شود که بالاتر بودن نمودار سبدها نسبت به نمودار سبدها ۱، یک مزیت محسوب شده و بیانگر تاثیر بهتر شاخص پیشنهادی در انتخاب سبدها بهینه باشد.

باید دقت نمود زمان دقیق وقوع بحران قابل پیش بینی نیست و برای برخی از تهدیدات مثل تهدیدات انسان ساز، غیر قابل پیش بینی است. بنابراین، می‌بایست در انتخاب استراتژی بهبود تاب آوری شبکه، علاوه بر توجه به مقدار نهایی تاب آوری، بر دو

در ادامه و برای مقایسه بهتر تفاوت‌های موجود بین سبدهای انتخاب شده توسط هر دو شاخص از نظر کارایی، ابتدا توالی بهینه برای تمامی سبدها تعیین شده و سپس مقادیر ضریب کارایی $E(\lambda_i)$ ، $(WIPW)$ و (\tilde{WIPW}) ، برای تمام سبدها محاسبه و مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است در بین سبدهای انتخاب شده در جدول (۵)، فقط در انتخاب سبدها گروه ۲ توالی بهینه موثر بوده است. در این مثال فرض شده به دلیل محدودیت‌های اجرایی و ترافیکی، امکان بهسازی یا احداث دو یا چند پل بصورت همزمان وجود ندارد، لذا در هر مقطع از زمان حداکثر یک پل می‌تواند بهسازی یا احداث شود ($n_t=1$).

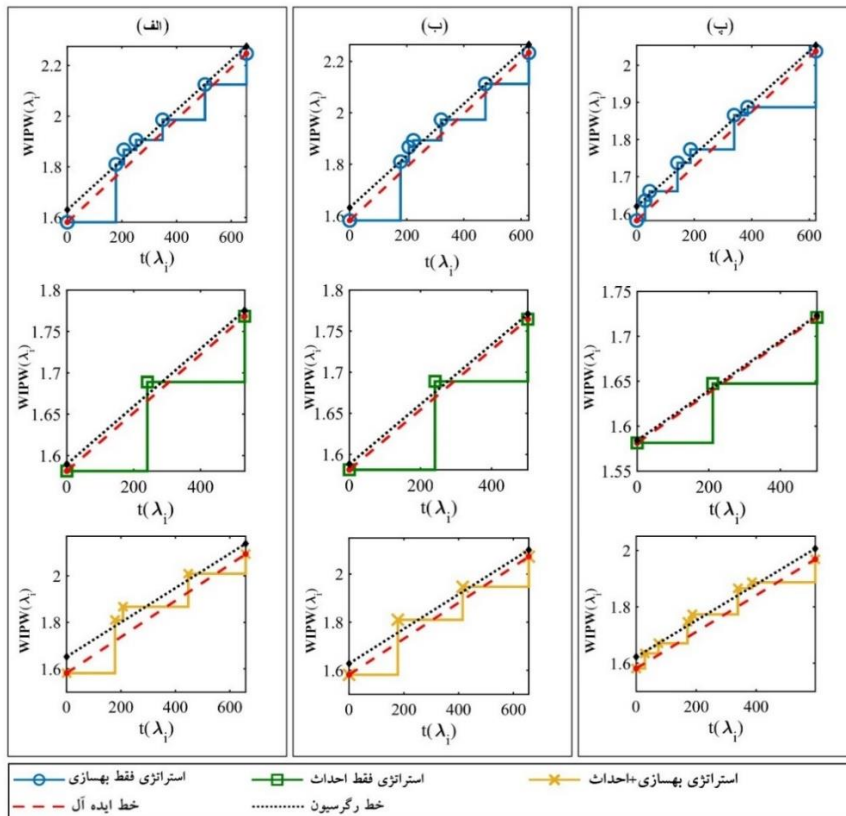
شکل (۷) نتایج جستجوی توالی بهینه با استفاده از GA برای تمامی سبدهای انتخاب شده را نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که استفاده از GA در تعیین توالی بهینه سبدها تا در تمامی استراتژی‌های این مثال خط رگرسیون بالای خط ایده آل قرار گرفته و شاخص نسب سطح بزرگتر از یک شود. شکل (۸)

انتخاب استراتژی بهینه برای بهبود تاب‌آوری شبکه حمل و نقل با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای موعده زمانی وقوع تهدید

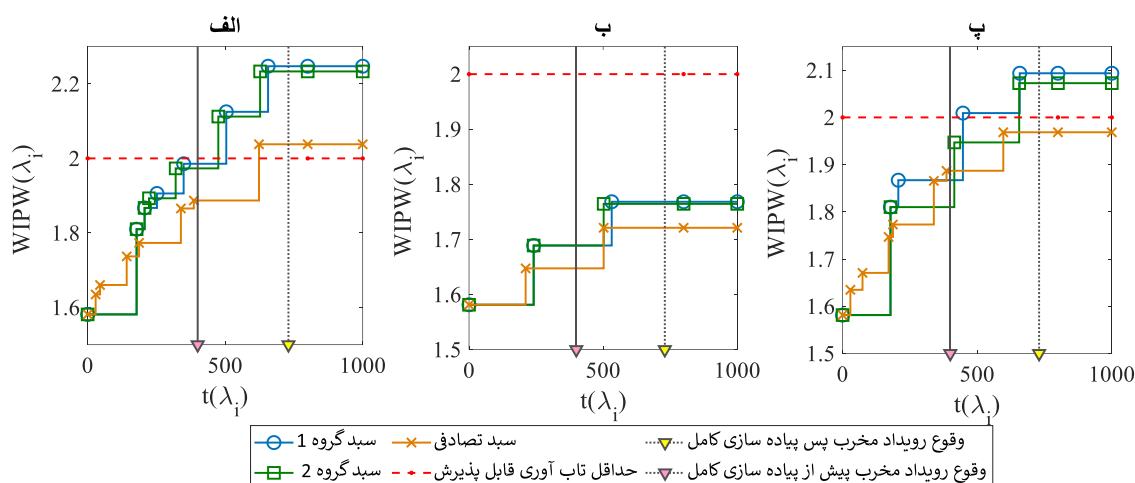
معیار MOS و MOT نیز توجه نمود. پس از ترسیم نمودار معیار MOS و MOT، ابتدا مقادیر شاخص نسبت سطح (MOS) و شاخص زمان (MOT) محاسبه شده و سپس در جدول (۶) برای تمامی سبدهای مختلف مقادیر ضریب کارایی $E(\lambda_i)$ ، $(WIPW)$ و (\overline{WIPW}) ، برای تمام سبدها محاسبه و مقایسه می‌شود. ملاحظه می‌شود که استراتژی (R) بیشترین تاب‌آوری را برای این شبکه حاصل می‌کند.

جدول ۶. مقایسه تاب‌آوری نهایی، شاخص اصلاح شده و کارایی برای سبدهای مختلف

گروه	بهینه سازی	استراتژی	$MOS(\lambda_i)$	$MOT(\lambda_i)$	$E(\lambda_i)$	$WIPW$	\overline{WIPW}
۱	یک سطحی (WIPW)	(R)	۱,۰۲۰۱	۱,۱۱۲۸	۱,۱۳۵۲	۲,۲۴۷۳	۲,۵۵۱۱
		(B)	۱,۰۰۴۵	۱,۳۷۲۲	۱,۳۷۸۴	۱,۷۶۸۳	۲,۴۳۷۳
		(R+B)	۱,۰۳۱۴	۱,۱۰۹۴	۱,۱۴۴۳	۲,۰۹۳۵	۲,۳۹۵۵
۲	دو سطحی (\overline{WIPW})	(\bar{R})	۱,۰۲۱۳	۱,۱۶۴۳	۱,۱۸۹۱	۲,۲۳۳۴	۲,۶۵۵۸
		(\bar{B})	۱,۰۰۳۹	۱,۴۵۴۲	۱,۴۵۹۹	۱,۷۶۴۵	۲,۵۷۵۹
		($\bar{R}+\bar{B}$)	۱,۰۲۰۳	۱,۱۱۲۸	۱,۱۳۵۴	۲,۰۷۲۵	۲,۳۵۳۱
۳	غیر بهینه تصادفی	(R^*)	۱,۰۱۴۹	۱,۱۷۱۷	۱,۱۸۹۲	۲,۰۳۷۹	۲,۴۲۳۵
		(B^*)	۱,۰۰۱۵	۱,۴۵۴۲	۱,۴۵۶۴	۱,۷۲۱۱	۲,۵۰۶۵
		(R^*+B^*)	۱,۰۲۲۳	۱,۲۲۲۸	۱,۲۵۰۰	۱,۹۶۸۵	۲,۴۶۰۷



شکل ۷. توالی بهینه برای تمامی سبدهای انتخاب شده: (الف) سبدهای گروه ۱، (ب) سبدهای گروه ۲، (پ) سبدهای گروه ۳



شکل ۸. مقایسه بین سبدهای مختلف هر استراتژی (الف) فقط بهسازی، (ب) فقط احداث، (پ) بهسازی و احداث

اگر در مثال مورد بررسی، انتخاب سبدها بهینه مطابق رویکرد تحقیقات پیشین، صرفاً بر مبنای مقدار نهایی WIPW باشد، سبدها R (مربوط به استراتژی فقط بهسازی در گروه اول) به عنوان سبدها بهینه انتخاب خواهد شد. اما در صورت در نظر گرفتن ضریب کارایی پیاده سازی استراتژی و انتخاب سبدها بهینه بر مبنای (\overline{WIPW}) ، سبدها (\tilde{R}) مربوط به استراتژی فقط بهسازی در گروه دوم) به عنوان سبدها بهینه این مثال انتخاب می گردد.

مقایسه پل های انتخاب شده در سبدهای R و \tilde{R} ، نشان می دهد که پل L-M که در سبدها R انتخاب شده بود، با در نظر گرفتن معیار کارایی از سبدها \tilde{R} حذف شده و پل G-H جایگزین آن شده است. این موضوع سبب شده تا مدت زمان پیاده سازی سبدها \tilde{R} در حدود ۵ درصد کاهش یافته و از زمان ۶۵۶ روز برای سبدها R به ۶۲۷ روز کاهش یابد و موجب بهبود شاخص MOT برای این سبدها شود. بدین ترتیب که شاخص MOT با ۴/۶ درصد افزایش از مقدار ۱/۱۱۲۸ برای سبدها R به مقدار ۱/۱۱۶۴۳ برای سبدها \tilde{R} افزایش یافته است.

همچنین جایگزینی پل G-H در سبدها \tilde{R} به جای پل L-M در سبدها R سبب شد تا توالی بهینه پل ها به نحوی تنظیم شود که شاخص MOS برای سبدها \tilde{R} بهبود یابد. بدین ترتیب که شاخص MOS از مقدار ۱/۰۲۰۱ برای سبدها R به مقدار

۷. جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله با هدف توسعه و تکمیل تحقیقات پیشین، ضریبی با عنوان ضریب کارایی $E(\lambda_i)$ ارائه شد و با استفاده از آن شاخص (WIPW) اصلاح گردید. در شاخص اصلاح شده (\overline{WIPW}) علاوه بر توجه به معیارهای مدنظر محققین پیشین، معیارهای زمان و نحوه توالی پل ها نیز در فرآیند جستجو استراتژی بهینه موثر قرار گرفت. در این مقاله یک مثال عددی نیز ارائه شده که در آن تفاوت انتخاب استراتژی بهینه با استفاده از شاخص (WIPW) و شاخص اصلاح شده (\overline{WIPW}) ، مقایسه شد.

در این مثال ۹ سبدها مختلف شامل ۳ سبدهای بهینه با استفاده از روش بهینه سازی یک سطحی برای استراتژی های فقط بهسازی (R)، فقط احداث (B) و ترکیبی (R+B)، ۳ سبدهای بهینه با استفاده از روش بهینه سازی دو سطحی برای هر سه استراتژی فوق با عنوانین (\tilde{R}) ، (\tilde{B}) و $(\tilde{R}+\tilde{B})$ ، همچنین ۳ سبدها غیر بهینه برای هر سه استراتژی فوق بصورت تصادفی با عنوانین (R^*) ، (B^*) و (R^*+B^*) انتخاب شده و مقادیر ضریب کارایی $E(\lambda_i)$ ، شاخص تاب آوری (WIPW) و شاخص تاب آوری اصلاح شده (\overline{WIPW}) ، برای تمامی این سبدها محاسبه و مقایسه گردید.

انتخاب استراتژی بهینه برای بهبود تاب‌آوری شبکه حمل و نقل با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای موعد زمانی وقوع تهدید

آتی می‌توان این ضریب را توسعه داد و عوامل دیگری را نیز برای سنجش کارایی استراتژی در نظر گرفت.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Critical infrastructure
2. Transportation networks
3. Disruptive event
4. Emergency response
5. Recovery
6. Vulnerability
7. Pre-disaster period
8. Resilience
9. National Infrastructure Advisory Council
10. Robustness
11. Redundancy
12. Resourcefulness
13. Rapidity
14. Post-disaster period
15. Weighted Independent Pathways

۹. مراجع

- رهگذر، محمد علی، حق شناس، حسین، رحیمی، شیرین، بیرژندی، صالحه. (۱۳۹۷). اولویت بندی پل ها در عملکرد ترافیکی شبکه معابر شهری مطالعه موردی: شبکه معابر شهر اصفهان. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۱۰(۱)، ۱-۱۷.

- شایانفر، محسنعلی، عباسلو، اسدالله، پهلوان، حسین، برخوردار، محمدعلی. (۱۳۹۹). ارزیابی احتمالاتی آسیب‌پذیری لرزه‌ای زیر ساخت‌های شبکه حمل و نقل با تأکید بر پل‌های عرشه جعبه‌ای بتن آرمه مستقیم و قوسی تحت تحریکات چندگانه. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۱۲(۱)، ۱-۴۱.

- طاهری امیری، محمدجواد، حقیقی، فرشید رضا، رحمانی فیروزجائی، علی، همتیان، میلاد، جواهری بارفروشی، مانده. (۱۳۹۷). تخصیص بهینه تعمیرات و نگهداری پلهای استان

۱/۰۲۱۳ برای سبب \bar{R} ارتقاء یافت. در نهایت بهبود شاخص های MOT و MOS برای سبب گروه \bar{R} موجب گردید تا کارایی پیاده سازی این سبب نسبت به سبب R افزایش یابد. بدین ترتیب که کارایی سبب R برابر با ۱/۱۳۵۲ بوده ولی در سبب \bar{R} به ۱/۱۸۵۲ ارتقاء یافته است.

افزایش کارایی سبب \bar{R} نسبت به سبب R که حاصل جایگزینی پل L-M با پل G-H می باشد، به این معناست که \bar{R} نسبت به سبب R، فرم منحنی محدب تری داشته و در مدت زمان کوتاه تری قابل پیاده سازی است. بنابراین سبب \bar{R} با توجه به عدم قطعیت زمان وقوع بحران، سبب قابل اطمینان تری محسوب می شود.

نتایج حاصل در این مثال نشان داد، حتی اگر سبب (R)، بصورت توالی بهینه اجرا شود، مقدار تاب‌آوری اصلاح شده (WIPW) برای آن کمتر از سبب (\bar{R}) خواهد بود. این موضوع نشان می دهد که سبب بهینه انتخاب شده بدون در نظر گرفتن فاکتورهای موثر در کارایی، حتی اگر با توالی بهینه پیاده سازی شود، کارایی آن کمتر از سببی است که مبنای انتخاب آن شاخص اصلاح شده بوده است. ملاحظه می شود که اگر چه مقدار تاب‌آوری نهایی سبب \bar{R} (۲,۲۳۳۴) از مقدار تاب‌آوری نهایی سبب R (۲,۲۴۷۳) کمتر است، اما مقدار شاخص اصلاح شده برای این سبب (۲,۶۵۵۸) از مقدار شاخص اصلاح شده برای سبب R (۲,۵۵۱۱) بیشتر شده است.

برنامه‌ریزی برای بهبود تاب‌آوری شبکه معمولاً با اهداف بلند مدت و در قالب تعریف پروژه‌هایی با طول بیش از یک سال انجام می‌شود. با توجه به طولانی بودن فرآیند بهبود تاب‌آوری شبکه و همچنین عدم قطعیت موجود در موعد زمانی وقوع تهدید، در انتخاب سبب می‌بایست علاوه بر مقدار تاب‌آوری نهایی خط سیر، مدت زمان و روند افزایش تدریجی تاب‌آوری نیز بهینه موثر باشند.

در این مقاله ضریب کارایی بر مبنای دو شاخص زمان پیاده سازی استراتژی و شاخص فرم منحنی تعریف شد. درکارهای

- Ip, W. H., & Wang, D. (2011). Resilience and friability of transportation networks: evaluation, analysis and optimization. *IEEE Systems Journal*, 5(2), 189-198.
- Kameshwar, S., Cox, D. T., Barbosa, A. R., Farokhnia, K., Park, H., Alam, M. S., & van de Lindt, J. W. (2019). Probabilistic decision-support framework for community resilience: Incorporating multi-hazards, infrastructure interdependencies, and resilience goals in a Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*, 191, 106568.
- Karamlou, A., & Bocchini, P. (2014). Optimal bridge restoration sequence for resilient transportation networks. In *Structures Congress 2014* (pp. 1437-1447).
- Li, Z., Jin, C., Hu, P., & Wang, C. (2019). Resilience-based transportation network recovery strategy during emergency recovery phase under uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 503-514.
- Liu, C., Fan, Y., & Ordóñez, F. (2009). A two-stage stochastic programming model for transportation network protection. *Computers & Operations Research*, 36(5), 1582-1590.
- Liu, Y., McNeil, S., Hackl, J., & Adey, B. T. (2020). Prioritizing transportation network recovery using a resilience measure. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 1-12.
- Merschman, E., Doustmohammadi, M., Salman, A. M., & Anderson, M. (2020). Postdisaster decision framework for bridge repair prioritization to improve road network resilience. *Transportation research record*, 2674(3), 81-92.
- Ray, J. C. (2007). Risk-based prioritization of terrorist threat mitigation measures on bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 12(2), 140-146.
- Argroudis, S., Hofer, L., Zanini, M. A., & Mitoulis, S. A. (2019, June). Resilience of critical infrastructure for multiple hazards: Case study on a highway bridge. In *ICONHIC 2019 2nd International Conference on Natural Hazards & Infrastructure* (pp. 23-26).
- Banerjee, S., Vishwanath, B. S., & Devendiran, D. K. (2019). Multihazard resilience of highway bridges and bridge networks: a review. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(12), 1694-1714.
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... & Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, 19(4), 733-752.
- Frangopol, D. M., & Bocchini, P. (2011). Resilience as optimization criterion for the rehabilitation of bridges belonging to a transportation network subject to earthquake. In *Structures Congress 2011* (pp. 2044-2055).
- Frazier Sr, E. R., Nakanishi, Y. J., & Lorimer, M. A. (2009). *Surface Transportation Security, Volume 14: Security 101: A Physical Security Primer for Transportation Agencies* (No. Project 20-59 (28)).
- Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47-61.
- Ip, W. H., & Wang, D. (2009, April). Resilience evaluation approach of transportation networks. In *2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization* (Vol. 2, pp. 618-622). IEEE.

a systematic review and future directions. *Transport reviews*, 38(4), 479-498.

- Yu, R., Chen, L., Fang, Q., & Huan, Y. (2018). An improved nonlinear analytical approach to generate fragility curves of reinforced concrete columns subjected to blast loads. *Advances in structural engineering*, 21(3), 396-414.

- Zhang, W., & Wang, N. (2016). Resilience-based risk mitigation for road networks. *Structural Safety*, 62, 57-65.

- Zhang, W., Wang, N., & Nicholson, C. (2017). Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(11), 1404-1413.

- Zhou, Y., Wang, J., & Yang, H. (2019). Resilience of transportation systems: concepts and comprehensive review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(12), 4262-4276.

- Soltani-Sobh, A., Heaslip, K., Scarlatos, P., & Kaiser, E. (2016). Reliability based pre-positioning of recovery centers for resilient transportation infrastructure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 19, 324-333.

- Sun, W., Bocchini, P., & Davison, B. D. (2020). Resilience metrics and measurement methods for transportation infrastructure: the state of the art. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 5(3), 168-199.

- Twumasi-Boakye, R., & Sobanjo, J. O. (2019). A computational approach for evaluating post-disaster transportation network resilience. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 1-17.

- Vugrin, E. D., Turnquist, M. A., & Brown, N. J. (2014). Optimal recovery sequencing for enhanced resilience and service restoration in transportation networks. *International Journal of Critical Infrastructures*, 10(3-4), 218-246.

- Wan, C., Yang, Z., Zhang, D., Yan, X., & Fan, S. (2018). Resilience in transportation systems:

مهدی دزفولی نژاد، رضا رؤفی، احمد دالوند

مهدی دزفولی نژاد، درجه کارشناسی از مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه آزاد اهواز و درجه کارشناسی ارشد را در همان رشته در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه آزاد شوشتر اخذ نمود. در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی عمران-مدیریت ساخت در دانشگاه آزاد اهواز است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ، الگوریتم های فرا ابتکاری، نظریه گراف، پدافند غیر عامل، تاب آوری شبکه حمل و نقل، ارزیابی و مدیریت ریسک و بهینه سازی تخصیص منابع است و در حال حاضر مدرس دانشگاه و موسسات آموزش عالی در استان خوزستان می باشد.



رضا رؤفی، درجه کارشناسی از مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۸ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی عمران-سازه در سال ۱۳۸۱ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی زلزله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل دینامیکی سازه ها، ارتعاشات تصادفی، برآورد خطر، ریسک و ارزیابی تاب آوری سازه ها می باشد، وی در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز است.



احمد دالوند، درجه کارشناسی خود را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه آزاد و کارشناسی ارشد و دکترای خود را به ترتیب در سال های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳ از دانشگاه سمنان اخذ نمود. زمینه پژوهشی مورد علاقه ایشان، پدافند غیر عامل، سازه های بتنی و نیروهای انفجاری می باشد و در حال حاضر عضو هیئت علمی با مرتبه دانشیاری در دانشگاه لرستان است.

