

بررسی اثر تغییر در چگالی شبکه بر نحوه بهینه‌سازی تخصیص بودجه محدود بین پل‌ها جهت تاب‌آورسازی شبکه حمل و نقل

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

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

Email: r_raoufi@iauhvaz.ac.ir (نویسنده مسئول)

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

چکیده

تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه اولویت‌بندی تخصیص منابع به پل‌ها برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های حمل و نقل انجام شده است. بسیاری از این تحقیقات، شناسایی پل‌های مهم در یک شبکه ثابت و بدون تغییر توپولوژی را بررسی کرده‌اند. اما در بسیاری از شبکه‌ها، احتمال تغییر و توسعه ساختاری در آینده وجود دارد که منجر به تغییر در تراکم و توپولوژی شبکه خواهد شد. این تغییرات، اهمیت پل‌ها را نسبت به شرایط اولیه مبنا در تصمیم‌گیری برای تخصیص منبع تغییر می‌دهد. بنابراین، نمی‌توان در انتخاب سبد بهینه پل‌ها تغییرات اهمیت آن‌ها در آینده را در نظر نگرفت. همچنین، شناسایی پل‌هایی که صرفنظر از تغییرات شبکه در آینده همواره در اولویت هستند، به تصمیم‌گیری بهینه در شرایط محدودیت منابع کمک می‌کند. در این مقاله، یک شاخص با عنوان اهمیت تجمعی پل (CI_b) ارائه شده که با در نظر گرفتن تغییرات اهمیت پل‌ها در دوره‌های مختلف توسعه، سبد بهینه را تعیین می‌کند. جهت بیان نحوه استفاده از این شاخص، یک مثال عددی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از شاخص CI_b باعث انتخاب پل‌های متفاوتی نسبت به سبد بهینه انتخاب شده با رویکردهای متداول می‌شود. به عنوان نمونه، پل $AE - AM$ ابتدا در سبد بهینه اولیه قرار داشت. اما استفاده از شاخص CI_b باعث شد تا این پل از سبد بهینه اصلاح شده حذف شود؛ زیرا اهمیت این پل طی دو مرحله توسعه شبکه از ۰/۰۹۶۱ به ۰/۰۷۲۹ کاهش می‌یابد. در مقابل، پل $AA - AZ$ در ابتدا در سبد بهینه اولیه قرار نداشت. اما به دلیل افزایش اهمیت این پل از ۰/۰۳۷۸ به ۰/۲۲۴۸، طی توسعه شبکه، در سبد بهینه اصلاح شده قرار گرفت.

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

۱. مقدمه

شاخص‌هایی مبتنی بر خصوصیات توپولوژیک شبکه استفاده نموده‌اند. این گروه از تحقیقات عمدتاً توپولوژی شبکه را ثابت و بدون تغییر در نظر گرفته و اثر حذف شاخه‌ای که پل روی آن واقع شده، بر کاهش تاب‌آوری شبکه را مبنای تصمیم‌گیری برای انتخاب تعدادی از پل‌ها برای تخصیص منبع قرار داده‌اند. اما بهسازی پل‌های انتخاب شده برای بهبود تاب‌آوری شبکه در یک زمان واحد و به صورت آنی رخ نمی‌دهد و ممکن است چند ماه و یا چند سال به طول بیانجامد. از سوی دیگر، توپولوژی یک شبکه در طول زمان ثابت نیست و امکان تغییر آن طی دوره ارتقاء تاب‌آوری شبکه وجود دارد.

در بسیاری از شبکه‌های حمل و نقل، اعم از درون شهری یا بزرگراهی، امکان تغییر و توسعه ساختار شبکه در آینده، طی افق‌های کوتاه یا بلندمدت، با کاهش تعداد شاخه‌های موجود یا افزایش شاخه‌های جدید، وجود دارد که منجر به تغییر در تراکم و توپولوژی شبکه در آینده خواهد شد. این تغییرات سبب می‌شوند که اهمیت پل‌ها، نسبت به شرایط اولیه‌ای که مبنای تصمیم‌گیری برای تخصیص منبع بوده تغییر کند. این امکان وجود دارد که پل‌هایی که ابتدا کم‌اهمیت فرض می‌شدند، طی روند تغییر و توسعه ساختار شبکه به پل‌های با اهمیتی تبدیل شوند و در مقابل، پل‌هایی که پیش از این پل‌های با اهمیتی محسوب می‌شدند، ممکن است اهمیت نسبی آن‌ها کاهش یابد. با این حال، در تحقیقات متمرکز بر این موضوع، اثر تغییر چگالی شبکه بر تغییر اهمیت پل‌ها در نظر گرفته نشده است.

باید دقت نمود که اهداف برنامه‌های بهسازی پل‌ها، به منظور افزایش تاب‌آوری شبکه، معمولاً به صورت بلندمدت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، نمی‌توان در انتخاب سبب بهینه پل‌ها تغییر اهمیت آن‌ها در آینده را در نظر نگرفت. همچنین، در شرایط محدودیت منابع، شناسایی پل‌هایی که صرف‌نظر از تغییر چگالی و توپولوژی شبکه در آینده، همواره با اولویت هستند، به

زیرساخت‌های حیاتی، مانند شبکه‌های حمل و نقل، نقش اساسی در زندگی روزانه ما ایفا می‌کنند (فنگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). این شبکه‌ها در تأمین نیازهای حیاتی جامعه و فعالیت‌های اقتصادی (مانند کالا، محصولات، مواد، مصالح، انرژی و اطلاعات) مشارکت دارند. به همین دلیل، تاب‌آوری آن‌ها در برابر حوادث طبیعی (مانند سیل و زلزله) و انسان‌ساز (مانند حملات تروریستی) به یکی از مهمترین اولویت‌های بسیاری از کشورها (ژو و همکاران، ۲۰۱۹؛ ون و همکاران، ۲۰۲۰)، به ویژه در کشورهایی که دارای شبکه عظیمی از زیرساخت‌های حیاتی پیچیده و به هم پیوسته می‌باشند تبدیل شده است (کورتز و همکاران، ۲۰۱۶). به دلیل پیچیدگی و وابستگی متقابل اجزای زیرساخت‌های حیاتی، شکست یکی از اجزای منفرد مجموعه می‌تواند منجر به شکست ناگهانی در مقیاس شبکه‌ای و اختلال در خدمت‌رسانی سراسری آن‌ها گردد (ون و همکاران، ۲۰۱۹).

پل‌ها آسیب‌پذیرترین اجزای شبکه حمل و نقل می‌باشند. شکست آن‌ها در اثر وقوع رویدادهای مخرب می‌تواند موجب کاهش تاب‌آوری شبکه گردد (علیپور و شافعی، ۲۰۱۶). برای جلوگیری از شکست پل‌ها می‌توان با تخصیص منبع و مقاوم‌سازی در شرایط پیش از بحران، قابلیت اطمینان آن‌ها را در برابر رویدادهای مخرب افزایش داد. محدودیت منابع در اختیار یکی از چالش‌های اساسی در این زمینه می‌باشد. مالکان شبکه، منابع کافی برای بهسازی تمامی پل‌های موجود در شبکه را در اختیار نداشته و می‌بایست از بین تمامی پل‌های شبکه، آن‌هایی که اثر کاهشی بیشتری بر تاب‌آوری شبکه دارند را شناسایی و در اولویت انتخاب برای تخصیص منبع قرار دهند.

تحقیقات متعددی در زمینه اولویت‌بندی پل‌ها برای بهبود تاب‌آوری شبکه انجام شده است. برخی از این تحقیقات برای مقایسه و اولویت‌بندی پل‌ها از

تاب‌آوری در نظر گرفته شده است.

در تحقیقات مرتبط با زیرساخت‌های حیاتی، برخی از محققین، تأثیر خصوصیات توپولوژیک شبکه بر میزان تاب‌آوری را به‌طور عمومی تحت عنوان شبکه‌های پیچیده و به‌هم پیوسته مورد بررسی قرار داده‌اند (دوناس اوسوریو و همکاران، ۲۰۰۴؛ اش و نیوت، ۲۰۰۷). اما برخی به‌طور مشخص بر یک زیرساخت حیاتی خاص مانند شبکه‌های توزیع برق (کیم و همکاران، ۲۰۱۷؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰) یا شبکه‌های انتقال آب (منگ و همکاران، ۲۰۱۸) تمرکز داشته‌اند. در زمینه شبکه‌های حمل و نقل نیز تحقیقات متعددی در زمینه سنجش تاب‌آوری شبکه در برابر رویدادهای مخرب انجام شده است. این تحقیقات انواع مختلف شبکه‌های حمل و نقل را مورد بررسی قرار داده‌اند (میلر هوکس و همکاران، ۲۰۱۲؛ حسینی و بارکر، ۲۰۱۶؛ کالورت و اسنلدر، ۲۰۱۸؛ گوئیر و همکاران، ۲۰۱۸؛ بسینوویچ، ۲۰۲۰). در این بین، گروهی از تحقیقات به‌طور مشخص بر موضوع اثر شکست پل‌ها در تاب‌آوری شبکه تمرکز داشته‌اند. این گروه از تحقیقات نیز به تناسب شرایط حاکم بر مسأله مورد بررسی، تعاریف مختلفی از تاب‌آوری سیستم را در نظر گرفته‌اند. جدول ۱، لیست برخی از این تحقیقات را نمایش می‌دهد.

تصمیم‌گیری بهینه در این زمینه کمک می‌کند. در این مقاله، یک شاخص جدید با عنوان شاخص اهمیت تجمعی پل (GI_b) ارائه شده است که با در نظر گرفتن تغییرات اهمیت پل‌ها در دوره‌های مختلف توسعه، سبد بهینه را تعیین می‌کند.

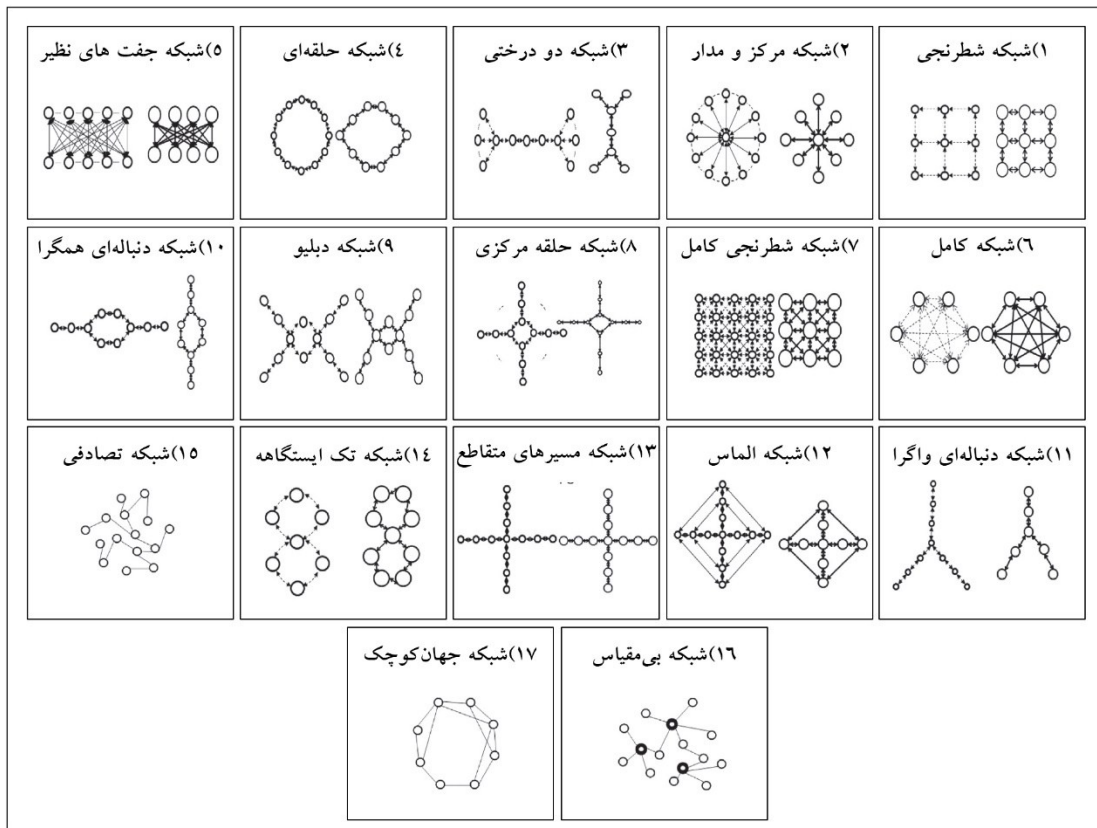
۲. مروری بر تحقیقات پیشین

توپولوژی یک شبکه عبارت است از نمایش هندسی روابط و نحوه اتصالات اجزای آن شبکه (گروث و اسکندیر، ۲۰۰۵). نظریه گراف (بوندی و مورتی، ۱۹۸۲)، یک ابزار ریاضی ارزشمند برای مطالعه توپولوژی شبکه‌ها می‌باشد (منگ و همکاران، ۲۰۱۸). به دلیل طیف گسترده کاربرد نظریه گراف در علوم مختلف، موضوع نقش خصوصیات توپولوژیک شبکه در تاب‌آوری آن، در شبکه‌های مختلف، از جمله شبکه‌های وایرلس، موبایل و سنسور (کیم و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژانگ و استرنس، ۲۰۱۵؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ برگ و کرکپاتریک، ۲۰۰۹)، شبکه مغز انسان (لی و همکاران، ۲۰۱۷؛ کوانگ و همکاران، ۲۰۲۰)، شبکه‌های اجتماعی و اقتصادی (گارسیا و همکاران، ۲۰۱۳؛ لی و شیائو، ۲۰۱۷)، شبکه‌های زنجیره تأمین (ماری و همکاران، ۲۰۱۵؛ آرورا و ونترسکا، ۲۰۱۸) مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیقات، به تناسب نوع شبکه مورد بررسی، تعاریف مختلفی از

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

محققین	شرایط حاکم	مسأله مورد بررسی	ملاک سنجش تاب‌آوری
لیو و همکاران (۲۰۰۹)؛ چانگ و همکاران (۲۰۱۲)؛ ژانگ و وانگ (۲۰۱۶)؛ سلطانی صبح و همکاران (۲۰۱۶)	پیش از بحران	انتخاب تعدادی از پل‌ها برای بهسازی/بهینه‌سازی تخصیص منبع برای بهسازی پل‌ها	توانایی پیش‌بینی، جذب، مواجهه (استواری و افزونگی شبکه)

لی و همکاران (۲۰۱۹)؛ بوکینی و فرانگوپل (۲۰۱۲)؛ ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)؛ دکو و همکاران (۲۰۱۳)؛ چانگ و همکاران (۲۰۱۲)؛ فرانگوپل و بوکینی (۲۰۱۱)؛ کرملو و بوکینی (۲۰۱۴)؛ مرشمن و همکاران (۲۰۲۰)؛ لیو و همکاران (۲۰۲۰)؛ ووگرین و همکاران (۲۰۱۴)؛ ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)	تعیین توالی بهینه بازسازی پل‌های آسیب دیده / کمینه‌سازی هزینه و زمان بازسازی پل‌های آسیب دیده خروج سریع و بازیابی به شرایط اولیه (تدبیر و سریع‌العملی)	پس از بحران
اکثر این تحقیقات، شناسایی و اولویت‌بندی پل‌های مهم در شبکه را با فرض ثابت و بدون تغییر بودن توپولوژی شبکه انجام داده‌اند. در حالی که توپولوژی و ساختار شبکه در طول زمان ثابت نبوده و تغییر خواهد کرد. علاوه بر این، رویدادهای مخرب ماهیتی احتمالاتی و غیرقابل پیش‌بینی دارند. هیچ قطعیتی وجود ندارد که رویداد مخرب در وضعیت اولیه شبکه که مبنای شناسایی و اولویت‌بندی پل‌های مهم بوده، رخ دهد. بلکه ممکن است شبکه پس از توسعه و تغییرات با رویداد مخرب مواجه شود. به دلیل اینکه اهمیت نسبی پل‌ها با تغییرات توپولوژی شبکه تغییر خواهد کرد، نمی‌توان در شناسایی و اولویت‌بندی پل‌های مهم اثر تغییرات توپولوژی شبکه در آینده را در نظر نگرفت. در حالی که در خصوص شناسایی پل‌های مهم و نقش آن‌ها در تاب‌آوری شبکه‌های حمل و نقل تحقیقات بسیاری انجام شده است، اما در زمینه تحلیل اثرات تغییر توپولوژی این شبکه‌ها بر اهمیت پل‌ها در تاب‌آوری، منابع اندکی در دسترس است.	مطالعه انجام شده توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۵) جزو اندک منابع موجود در این زمینه می‌باشد. محققین، در این مطالعه، توپولوژی‌های متداول در انواع شبکه حمل و نقل را معرفی (شکل ۱) و سپس با تعریف سه شاخص مختلف برای سنجش تاب‌آوری، ساختارهای متداول در سیستم‌های حمل و نقل را از نظر میزان تاب‌آوری با یکدیگر مقایسه نموده‌اند. در این تحقیق، در تعریف تاب‌آوری، علاوه بر قابلیت ایستادگی و مواجهه با بحران، توانایی خروج سریع و بازگشت به شرایط اولیه نیز در نظر گرفته شده است. اگر چه در مثال‌های عددی مورد بررسی در این تحقیق، تمامی توپولوژی‌های مورد مقایسه در دو مقیاس کوچک و بزرگ مورد مقایسه قرار گرفتند، اما این تحقیق صرفاً به مقایسه توپولوژی‌های متداول در شبکه‌های حمل و نقل پرداخته و موضوع تغییرات بلندمدت توپولوژی شبکه ناشی از رشد و توسعه آن در آینده را مورد بررسی قرار نداده است.	



شکل ۱. توپولوژی‌های متداول در انواع شبکه‌های حمل و نقل (ژانگ و استرنز، ۲۰۱۵)

۳. مفهوم تاب‌آوری

برای تاب‌آوری تعاریف متعددی در منابع مختلف و برای سیستم‌های گوناگون ارائه شده است. یک تعریف مشترک و قابل تعمیم عبارت است از: توانایی بازگشت سریع به شرایط اولیه پس از وقوع رویداد مخرب (حسینی و همکاران، ۲۰۱۶).

در حوزه زیرساخت‌های حیاتی نیز تعریفی که توسط شورای مشورتی زیرساخت‌های ملی^۱ ارائه شده، به‌طور گسترده مورد پذیرش قرار گرفته، که عبارت است از: توانایی پیش‌بینی، جذب، مواجهه و خروج سریع و بازگشت به شرایط اولیه در برابر رویدادهای مخرب احتمالی (کامشوار و همکاران، ۲۰۱۹). 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) شاخص استواری^۲ (توانایی ایستادگی در برابر حوادث و بحران‌های بزرگ و حفظ یک سطح سرویس مشخص و از پیش تعریف شده بعد از وقوع حوادث)، (۲) شاخص افزونگی^۳ (میزان توانایی المان‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده سیستم در جایگزینی و پوشش یکدیگر)، (۳) شاخص تدبیر^۴ (توان تشکیلاتی و سازمانی در مدیریت بحران شامل توانایی شناخت و درک بحران و مسأله، توانایی اولویت‌بندی مسائل، توانایی در برنامه‌ریزی و سازمان‌دهی نیروی انسانی و منابع مالی پس از بحران) و (۴) شاخص سریع‌العملی^۵ (بازگشت در کوتاه‌ترین زمان به یک سطح سرویس مشخص و قابل قبول) (ژانگ و وانگ، ۲۰۱۶؛ کامشوار و همکاران، ۲۰۱۹).

^۲- Robustness
^۳- Redundancy
^۴- Resourcefulness
^۵- Rapidity

^۱- National Infrastructure Advisory Council (NIAC)

بررسی اثر تغییر در چگالی شبکه بر نحوه بهینه سازی تخصیص بودجه محدود بین پل‌ها جهت تاب آورسازی شبکه حمل و نقل

۳-۱. سنجش تاب‌آوری

شاخص‌ها معمولاً بر مبنای یک سری از ویژگی‌های توپولوژیک شبکه مانند مرکزیت میانی یا طول کوتاه-ترین مسیر ساخته می‌شوند. در جدول ۲، به برخی از آن‌ها اشاره شده است (ژو و همکاران، ۲۰۱۹).

برای سنجش تاب‌آوری شبکه‌های حمل و نقل شاخص‌های متعددی ارائه شده است. شاخص‌های توپولوژیک یک گروه از این شاخص‌ها می‌باشند. این

جدول ۲. انواع شاخص توپولوژیک برای سنجش تاب‌آوری شبکه (ژو و همکاران، ۲۰۱۹)

محققین	شاخص توپولوژیک استفاده شده جهت سنجش تاب‌آوری شبکه
شینتلا و همکاران (۲۰۰۷)	شاخص قطر شبکه و شاخص میانگین کوتاه‌ترین مسیر
برچ و همکاران (۲۰۰۹)	شاخص اندازه بزرگترین مؤلفه همبند گراف و شاخص میانگین کوتاه‌ترین مسیر
آسئی آسامواه و لونس (۲۰۱۴)	شاخص اندازه بزرگترین مؤلفه همبند گراف و شاخص بازدهی شبکه
هارتمن (۲۰۱۴)	توان پشتیبانی شاخه‌ها
تستا و همکاران (۲۰۱۵)	شاخص میانگین درجه گره‌ها، ضریب خوشه‌بندی گراف، شاخص مرکزیت میانی و شاخص افزونگی
چوپرا و همکاران (۲۰۱۶)	ضریب درجه جورشدگی
آیدین و همکاران (۲۰۱۸)	شاخص مرکزیت میانی، شاخص اندازه بزرگترین مؤلفه همبند گراف و شاخص بازدهی شبکه
ژانگ و همکاران (۲۰۱۵)	شاخص قطر شبکه و میانگین درجه گره‌ها

مسیرهای مستقل شاخص افزونگی و با افزایش قابل اطمینان مسیرها، شاخص استواری در شبکه افزایش یافته و تاب‌آوری بهبود می‌یابد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). رابطه (۱) نحوه محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد.

$$WIPW(G, \theta) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, i \neq j}^n \sum_{k=1}^{K(i,j)} \left(\frac{L' P_k(i,j) + T' P_k(i,j)}{2} \right) \cdot R_k(\theta)(i,j) \quad (1)$$

مطابق رابطه (۱)، تاب‌آوری شبکه برابر است با میانگین تاب‌آوری کلیه گره‌های شبکه. 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 رابطه، از دو شاخص طول نرمالیزه شده $L' P_k(i,j)$ و ترافیک نرمالیزه شده $T' P_k(i,j)$ برای وزن‌دار کردن و تعیین اهمیت نسبی مسیرهای مستقل مابین گره‌ها استفاده شده است، این دو شاخص به ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه شده که پارامترهای مورد استفاده در آن‌ها در جدول ۳ معرفی شده‌اند.

تمامی شاخص‌های توپولوژیک اشاره شده در جدول ۲ با بهره‌گیری از شاخص‌های متداول در نظریه گراف ساخته شده‌اند (ژو و همکاران، ۲۰۱۹). اما برخی محققین نیز شاخص‌های نوآورانه‌ای پیشنهاد نموده‌اند. شاخص «میانگین وزنی تعداد مسیرهای مستقل و قابل اطمینان (WIPW)»، یک شاخص نوین و منحصر به فرد بوده که در این مقاله با انجام برخی تغییرات، جهت سنجش تاب‌آوری مورد استفاده قرار گرفته است.

شاخص WIPW ابتدا توسط ایپ و ونگ (۲۰۰۹) و (۲۰۱۱)، جهت سنجش تاب‌آوری شبکه راه‌آهن چین ارائه گردید و سپس توسط ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) جهت استفاده در شبکه‌های جاده‌ای دارای پل‌ها متعدد تطبیق داده شد. جنیک (۲۰۱۵) نیز شاخص مشابهی برای سنجش تاب‌آوری شبکه حمل و نقل هوایی ارائه کرده است. مطابق این شاخص، هر چه میانگین تعداد مسیرهای مستقل^۱ و قابل اطمینان در یک شبکه (G) بیشتر باشد، آن شبکه در برابر تهدیدات مختلف (θ) تاب‌آوری بیشتری خواهد داشت، زیرا با افزایش تعداد

^۱- دو مسیر زمانی مستقل تلقی می‌شوند که هیچ شاخه مشترکی با یکدیگر نداشته باشند.

$$T'_{P_k(i,j)} = \frac{\{\min(T_l | l \in P_k(i,j))\}}{\sum_{k=1}^{K(i,j)} \{\min(T_l | l \in P_k(i,j))\} \times K(i,j)} \quad (3)$$

$$L'_{P_k(i,j)} = \frac{L_{max}(i,j)}{\sum_{l \in P_k(i,j)} L_l \cdot \sum_{k=1}^{K(i,j)} \left(\frac{L_{max}(i,j)}{\sum_{l \in P_k(i,j)} L_l} \right) \times K(i,j)} \quad (2)$$

جدول ۳. شرح پارامترهای مورد استفاده در روابط (۲) و (۳)

نماد	شرح	نماد	شرح
K	تعداد کل مسیرهای مستقل موجود در گراف	L_l	طول شاخه l در گراف مورد بررسی
$K(i,j)$	تعداد مسیرهای مستقل موجود بین جفت گره (i,j)	$L_{max}(i,j)$	طول بزرگترین مسیر مستقل بین (i,j)
$P_k(i,j)$	مجموعه شاخه‌های مسیر مستقل P -ام بین (i,j)	$L'_{P_k(i,j)}$	شاخص طول مسیر مستقل P -ام بین (i,j)
(θ)	سناریوی تهدید	ADT	میانگین ترافیک روزانه شاخه‌های گراف
$q_l(\theta)$	قابلیت اطمینان پل مختلف مطابق سناریوی تهدید θ	T_l	ترافیک شاخه l در گراف مورد بررسی
$WIPW(G)$	میزان شاخص تاب‌آوری شبکه پیش از بحران	$T'_{P_k(i,j)}$	شاخص ترافیک مسیر مستقل P -ام بین (i,j)
$WIPW(G, \theta)$	میزان شاخص تاب‌آوری شبکه در شرایط تهدید θ	$P_{bf}(\theta)$	احتمال شکست پل در مقابل تهدید θ
$WIPW(G, \theta, b_i)$	تاب‌آوری در شرایط تهدید θ و بهسازی پل b_i	$C_r(r)$	هزینه بهسازی هر یک از پل‌های موجود
$minWIPW(G, \theta)$	حداقل تاب‌آوری قابل پذیرش	$maxAR$	حداکثر منابع مالی در اختیار
L	طول شاخه‌های گراف	n_r	تعداد پل‌های موجود و نیازمند بهسازی

قابلیت اطمینان مسیرهای مستقل مابین گره‌ها $R_k(i,j)$ نیز با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. مطابق این رابطه، قابلیت اطمینان یک مسیر مستقل برابر است با حاصل ضرب قابلیت‌های اطمینان $q_l(\theta)$ شاخه‌های تشکیل‌دهنده آن مسیر.

$$R_k(\theta)(i,j) = \begin{cases} \prod_{l \in P_k(i,j)} 0.999 & : \text{شاخه‌های فاقد پل} \\ \prod_{l \in P_k(i,j)} q_l(\theta) & : \text{شاخه‌های دارای پل} \end{cases} \quad (4)$$

شاخه‌های تشکیل‌دهنده یک مسیر به دو گروه شاخه‌های دارای پل و فاقد پل تقسیم‌بندی می‌شوند. در این مقاله، قابلیت اطمینان شاخه‌های فاقد پل، قبل و بعد از بحران، برابر با ۰/۹۹۹ در نظر گرفته شده، اما قابلیت اطمینان شاخه‌های دارای پل قبل از بحران برابر با ۰/۹۹۹ و بعد از بحران برابر با "احتمال متمم شکست پل تحت شرایط تهدید (θ) مطابق رابطه (۵) در نظر گرفته می‌شود.

$$q_l(\theta) = 1 - P_{bf}(\theta) \quad (5)$$

۴. بیان مسأله و هدف

اگر توپولوژی شبکه ثابت در نظر گرفته شود، مسأله یافتن سبد بهینه پل‌هایی که ضمن در نظر گرفتن محدودیت منابع، تاب‌آوری را بیشینه می‌کنند، یک مسأله بهینه‌سازی مقید محسوب شده و برای حل آن می‌توان از انواع الگوریتم‌های جستجوی فراابتکاری مثل GA^۱ استفاده نمود. روابط (۶) تا (۸) بیانگر مسأله بهینه‌سازی مقید مرتبط با این مقاله می‌باشند. در مدل بهینه‌سازی ارائه شده، جواب‌هایی به صورت بردار باینری $[0,1]$ تولید می‌شود. اگر یک پل در سبد بهینه برای بهسازی انتخاب شود، درایه مشخص‌کننده آن برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

کمینه‌سازی:

$$MOR(G, \theta) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, i \neq j}^n \sum_{k=1}^{K(i,j)} \left(\frac{L'_{P_k(i,j)} + T'_{P_k(i,j)}}{2} \right) \cdot R_k(\theta)(i,j) \quad (6)$$

¹ - Genetic Algorithm

بررسی اثر تغییر در چگالی شبکه بر نحوه بهینه سازی تخصیص بودجه محدود بین پل‌ها جهت تاب آورسازی شبکه حمل و نقل

در معرض شرایط:

$$\sum_{r=1}^{n_r} x(r) \cdot C_r(r) \leq \max AR \quad (7)$$

$$x(r) = \begin{cases} 0 & \text{عدم انتخاب پل جهت بهسازی} \\ 1 & \text{انتخاب پل جهت بهسازی} \end{cases} \quad (8)$$

اما در نظر گرفتن تغییرات آینده شبکه، مسأله انتخاب سبد بهینه را از یک مسأله تصمیم‌گیری ایستا به یک مسأله پویا تبدیل می‌کند و صرفاً بر مبنای اهمیت فعلی پل‌ها نمی‌توان سبد بهینه را تعیین نمود. در این مقاله، یک شاخص جدید با عنوان شاخص اهمیت تجمعی پل (CI_b) ارائه شده است که با در نظر گرفتن تغییرات اهمیت پل‌ها در دوره‌های توسعه مختلف، سبد بهینه را تعیین می‌کند. رابطه (۹) نحوه محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد.

$$CI_b(\varphi) = \sum_{d=1}^n \left(x_b^d \cdot \delta_b^d \cdot \frac{1}{(1+\varphi)^d} \right) \quad (9)$$

در این رابطه، d شماره و n تعداد دوره‌های توسعه مورد بررسی می‌باشد. مقدار d برای وضعیت اولیه شبکه برابر با ۱، برای اولین افق زمانی توسعه برابر ۲ و به همین ترتیب برای دوره‌های بعدی در نظر گرفته می‌شود. در بسیاری از کشورها معمولاً برنامه‌های توسعه در قالب افق‌های زمانی ۵ ساله پیش‌بینی می‌شوند. در هر حال، در این رابطه فرض شده که فواصل بین دوره‌های زمانی توسعه مختلف به صورت یکسان در نظر گرفته شده است.

δ_b^d در رابطه (۹) بیانگر شاخص اهمیت منفرد پل

b در دوره d می‌باشد. δ_b^d در هر دوره برابر است با میزان اثر افزایشی منفرد بهسازی پل بر بهبود تاب‌آوری شبکه. بنابراین، δ_b^d مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta_b^d = WIPW^d(G, \theta, b_i) - WIPW^d(G, \theta) \quad (10)$$

در رابطه فوق، $WIPW^d(G, \theta, b_i)$ برابر است با مقدار شاخص تاب‌آوری بهبود یافته شبکه در دوره d بر اثر بهسازی پل b و $WIPW^d(G, \theta)$ نیز مقدار شاخص تاب‌آوری شبکه در دوره d در شرایط عدم تخصیص منبع به هیچکدام از پل‌ها می‌باشد. در رابطه (۹)، x_b^d بازتاب‌کننده تعداد دفعاتی است که یک پل در سبدهای بهینه دوره‌های مختلف انتخاب شده است. مقدار x_b^d در صورتی که پل b در سبد بهینه دوره d موجود باشد، برای آن دوره برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در نظر گرفتن پارامتر x_b^d در این رابطه سبب می‌شود تا مقدار شاخص CI_b برای پل‌هایی که دوره‌های بیشتری با اهمیت هستند، نسبت به پل‌هایی که فقط در برخی از دوره‌ها در سبد بهینه انتخاب شده‌اند، عدد بزرگتری شود.

در نهایت، به منظور این که تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب سبد بهینه با استفاده از شاخص CI_b به صورت هدفمند و متناسب با شرایط حاکم بر تصمیم‌گیری انجام شود، در این رابطه ضریب فوریت (φ) در نظر گرفته شده است. مقادیر در نظر گرفته شده برای ضریب فوریت در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر ضریب فوریت در تصمیم‌گیری

φ	سطح فوریت	شرایط حاکم بر تصمیم‌گیری
*	اضطراری	رویداد مخرب به احتمال بسیار زیاد در وضعیت فعلی شبکه رخ می‌دهد
۰/۰۵	زیاد	احتمال وقوع رویداد مخرب در کوتاه‌مدت زیاد است
۰	متوسط	احتمال وقوع رویداد مخرب در میان‌مدت زیاد است
- ۰/۰۵	کم	احتمال وقوع رویداد مخرب در بلندمدت زیاد است
**	بدون فوریت	رویداد مخرب به احتمال بسیار زیاد پس از تکمیل برنامه توسعه شبکه رخ می‌دهد

* در شرایط اضطراری، پل‌های موجود در سبد بهینه اولیه مربوط به وضعیت فعلی شبکه به عنوان پل‌های مهم انتخاب می‌شوند.

** در شرایط بدون فوریت، پل‌های موجود در سبد بهینه مربوط به شبکه حاصل از آخرین دوره توسعه، به عنوان پل‌های مهم انتخاب می‌شوند.

و سبب بهینه پل‌ها برای بهبود تاب‌آوری آن در شرایط محدودیت منابع مطابق رویکردهای متداول در تحقیقات پیشین تعیین می‌شود. سپس، با هدف بررسی اثر تغییر در چگالی شبکه بر نحوه تعیین سبب بهینه، برای دو شبکه که نشان‌دهنده توسعه توپولوژی این شبکه در دو دوره آینده هستند، مجدداً سبب بهینه پل‌ها تعیین شده و در نهایت با محاسبه اهمیت تجمعی پل‌های انتخاب شده در هر سه دوره، سبب بهینه اصلاح شده با استفاده از شاخص CI_b تعیین می‌شود.

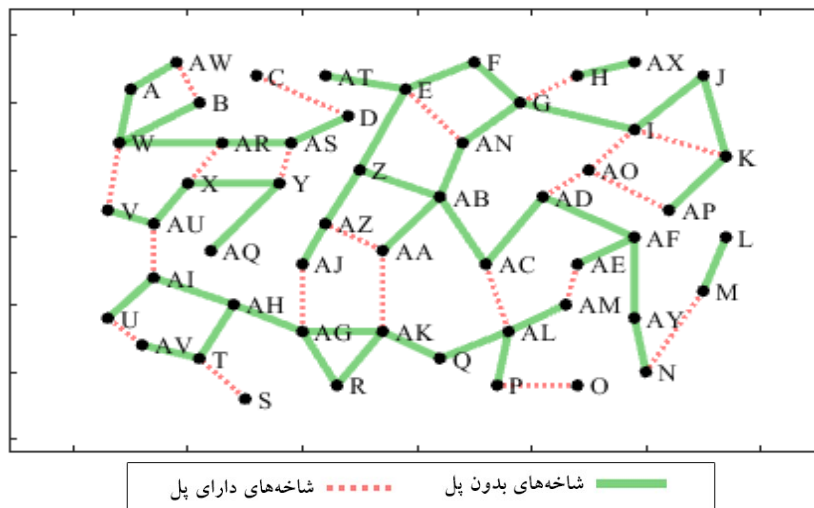
شکل ۲، شبکه مرجع را نمایش می‌دهد. این شبکه دارای ۲۰ پل بوده که بر اساس الزامات ناکافی طراحی شده‌اند و در برابر سناریوی تهدید فرضی مورد بررسی (جدول ۵) آسیب‌پذیر هستند. شبکه مرجع پیش از وقوع بحران دارای میانگین ۱/۱۱۹۳ مسیر مستقل و قابل اطمینان بوده که در صورت عدم تخصیص منابع مورد نیاز برای بهسازی پل‌های موجود و وقوع تهدید مطابق سناریو تعریف شده، به ۰/۳۵۵۵ تنزل می‌یابد.

استفاده از ضریب φ در رابطه فوق به مالکان شبکه این امکان را می‌دهد تا متناسب با شرایط حاکم بر مسأله، انعطاف بیشتری در تصمیم‌گیری داشته باشند. در نظر گرفتن فوریت زیاد ($\varphi = 0.05$) در تصمیم‌گیری باعث می‌شود که پل‌هایی که در کوتاه‌مدت با اهمیت هستند در اولویت انتخاب قرار گیرند. در مقابل، در فوریت کم ($\varphi = -0.05$)، پل‌هایی که در بلندمدت اهمیت آن‌ها بیشتر می‌شود، در سبب بهینه انتخاب می‌شوند. لازم به ذکر است که در فوریت متوسط ($\varphi = 0$) شاخص اهمیت تجمعی برای یک پل (CI_b) برابر است با مجموع اهمیت‌های منفرد آن پل در تمام دوره‌هایی که در سبب بهینه انتخاب شده است.

$$CI_b(\varphi = 0) = \sum_{d=1}^n (x_b^d \cdot \delta_b^d) \quad (10)$$

۵. مثال عددی

در این بخش، جهت بیان کمی مسأله مورد بررسی یک مثال عددی ارائه شده است. در این مثال، ابتدا یک شبکه به عنوان شبکه مرجع (G_0) در نظر گرفته می‌شود



شکل ۲. توپولوژی شبکه مرجع (G_0)

جدول ۵. قابلیت اطمینان پل‌های موجود در شبکه در برابر سناریوی تهدید فرضی (θ)

V-W	U-AV	S-T	O-P	M-N	I-K	G-H	E-AN	C-D	B-AW	کد پل
-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	------	-------

بررسی اثر تغییر در چگالی شبکه بر نحوه بهینه سازی تخصیص بودجه محدود بین پل‌ها جهت تاب آورسازی شبکه حمل و نقل

$q_l(\theta)$	۰/۵۳	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۵۷	۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۳۷	۰/۴۳	۰/۵۲	۰/۴۵
کد پل	X-AR	Y-AS	AA-AK	AA-AZ	AC-AL	AD-AO	AE-AM	AG-AJ	AI-AU	AO-AP
$q_l(\theta)$	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۵۳	۰/۴۸	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۵۵

بودجه مورد نیاز برای بهسازی ۲۰ پل موجود در این شبکه ۴۶۶ واحد پولی می‌باشد. با توجه به محدودیت منابع با استفاده از مدل بهینه‌سازی ارائه شده در بخش ۳، از بین تمامی پل‌های موجود در شبکه، آن‌هایی که اثر بیشتری بر بهبود تاب‌آوری دارند، مشخص می‌شوند

جدول ۶، تخمین منابع مالی مورد نیاز برای بهسازی پل‌های موجود را نشان می‌دهد. در این جدول، برای پل‌هایی که قابلیت اطمینان کمتری دارند، منابع مالی بیشتری برای بهسازی در نظر گرفته شده است. در این مثال، بودجه در اختیار ۱۵۰ واحد پولی فرض شده، اما

جدول ۶. تخمین منابع مالی پل‌های نیازمند بهسازی (مبالغ به میلیارد تومان)

کد پل	B-AW	C-D	E-AN	G-H	I-K	M-N	O-P	S-T	U-AV	V-W	X-AR	Y-AS	AA-AK	AA-AZ	AC-AL	AD-AO	AE-AM	AG-AJ	AI-AU	AO-AP
$C_r(r)$	۲۲	۲۴	۲۵	۲۲	۲۲	۲۳	۲۸	۲۶	۲۳	۲۴	۲۲	۲۲	۲۵	۲۶	۲۳	۲۲	۲۲	۲۲	۲۱	۲۲

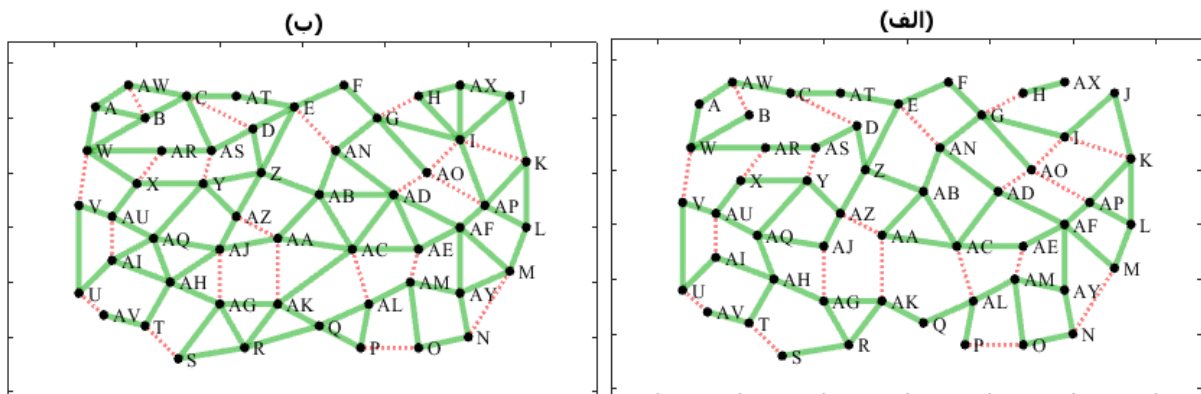
جدول ۷، نتایج حاصل از جستجوی سبد بهینه با استفاده از GA را نشان می‌دهد. مطابق نتایج حاصل، اگر سبد بهینه انتخاب شود، با انجام بهسازی ۶ پل و با صرف هزینه ۱۳۸ واحد پولی، تاب‌آوری شبکه به ۰/۶۸۵۱ افزایش می‌یابد.

جدول ۷. نتایج حاصل از جستجوی سبد بهینه در گراف مرجع G_0

گراف	کد پل‌های انتخاب شده در سبد بهینه	تعداد تاب‌آوری	هزینه
مرجع	E-AN, X-AR, AA-AK, AC-AL, AE-AM, AI-AU	۶	۰/۶۸۵۱
			۱۳۸

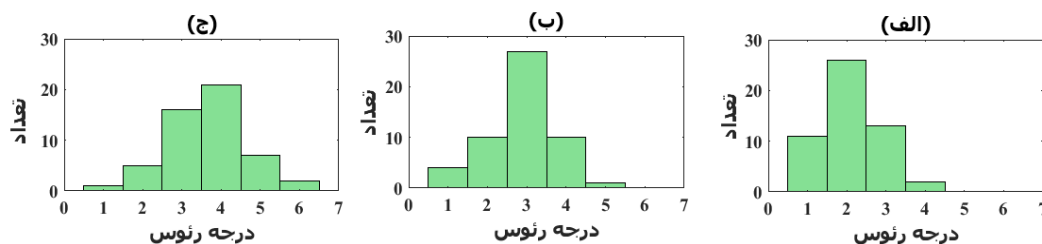
نمایش داده شده است. همچنین، فرض می‌شود اگر طی برنامه توسعه، پل‌های جدیدی به شبکه اضافه شوند، به دلیل اینکه مطابق الزامات جدید طراحی شده‌اند، در فهرست پل‌های آسیب‌پذیر و در معرض ریسک قرار نمی‌گیرند.

در این مثال، فرض می‌شود که شبکه مرجع (G_0) دارای یک برنامه توسعه برای بهبود توپولوژی می‌باشد. مطابق چشم‌انداز تعریف شده، این برنامه طی دو مرحله در افق‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت پیاده‌سازی می‌شود. توپولوژی حاصل از پیاده‌سازی برنامه توسعه در افق‌های زمانی اول (G_1) و دوم (G_2) در شکل ۳





شکل ۳. توپولوژی حاصل از پیاده‌سازی برنامه توسعه: الف) گراف توسعه افق اول و ب) گراف توسعه افق دوم



شکل ۴. نمودار هیستوگرام درجه رئوس: الف) گراف مرجع، ب) گراف توسعه افق اول و ج) گراف توسعه افق دوم

نمایش می‌دهد. با توجه به اینکه هدف از این مقایسه، فقط بررسی تأثیر تغییر و رشد توپولوژی شبکه بر نحوه تعیین سبب بهینه می‌باشد، سایر عوامل مؤثر مثل قابلیت اطمینان پل‌ها و ترافیک، بدون تغییر در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی تأثیر تغییر و رشد توپولوژی شبکه بر نحوه تعیین سبب بهینه، برای هر یک از دو شبکه G_1 و G_2 به‌طور جداگانه مجدداً سبب بهینه پل جستجو می‌شود و با نتایج به دست آمده برای شبکه مرجع مقایسه می‌شود. جدول ۸، شرایط حاکم بر این مقایسه را

جدول ۸. شرایط حاکم بر مقایسه بین گراف‌های مرجع و افق زمانی اول و دوم

چگالی یکسان	توپولوژی مشابه	موقعیت پل مشابه	ترافیک یکسان برای شاخه‌ها	قابلیت اطمینان پل‌ها مشابه
x	x	✓	✓	✓

در کوتاه‌مدت و بلندمدت می‌باشد. اما برخی پل‌ها مانند $(E - AN, AA - AK)$ به‌طور مشترک در هر سه سبب بهینه وجود دارند. این موضوع نشان می‌دهد که برخی پل‌ها صرف‌نظر از تغییر اهمیت ناشی از تغییر چگالی و توپولوژی شبکه در آینده، هموار با اولویت هستند.

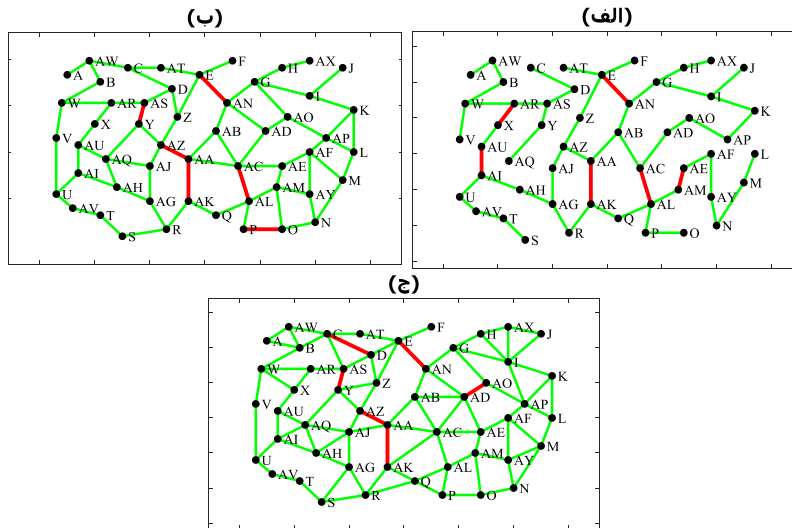
جدول ۹، نتایج حاصل از جستجوی سبب بهینه برای شبکه‌های توسعه یافته را نشان می‌دهد. نتایج این جستجو نشان داد که الگوریتم سبب پل‌های متفاوتی را نسبت به شبکه مرجع انتخاب نموده است. علت این موضوع تغییر اهمیت پل‌ها در اثر تغییر توپولوژی شبکه

جدول ۹. مقایسه سبدهای بهینه پل‌ها در گراف‌های مرجع و گراف‌های توسعه یافته افق اول و دوم

وضعیت شبکه	کد پل‌های انتخاب شده جهت بهسازی	تعداد بهسازی	تاب‌آوری	هزینه
G_0	<u>E-AN</u> , X-AR, <u>AA-AK</u> , AC-AL, AE-AM, AI-AU	۶	۰/۶۸۵۱	۱۳۸
G_1	<u>E-AN</u> , O-P, Y-AS, <u>AA-AK</u> , AA-AZ, AC-AL	۶	۱/۴۱۸۱	۱۴۹
G_2	C-D, <u>E-AN</u> , Y-AS, <u>AA-AK</u> , AA-AZ, AD-AO	۶	۲/۰۷۸	۱۴۴

شاخص سنجش‌گر تاب‌آوری مورد استفاده در این مقاله و افزایش تعداد مسیرهای مستقل وابسته به پل‌های میانی با افزایش تراکم شبکه مرتبط می‌باشد.

همچنین، نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که با افزایش تراکم در شبکه‌های افق اول و دوم، الگوریتم به سمت انتخاب پل‌های نواحی مرکزی و میانی شبکه تمایل پیدا می‌کند (شکل ۵). علت این موضوع، به نوع



شکل ۵. تأثیر تغییر چگالی بر پل‌های انتخاب شده: (الف) گراف مرجع، (ب) گراف توسعه افق اول و (ج) گراف توسعه افق دوم

پل‌های هر دوره را در سبد بهینه انتخاب می‌کند. بنابراین، در این مثال، در مجموع ۱۱ پل مهم در دوره‌های مختلف شناسایی شده است. این پل‌ها را با توجه به سبد بهینه‌ای که در آن قرار دارند می‌توان در گروه‌های زیر دسته‌بندی نمود.

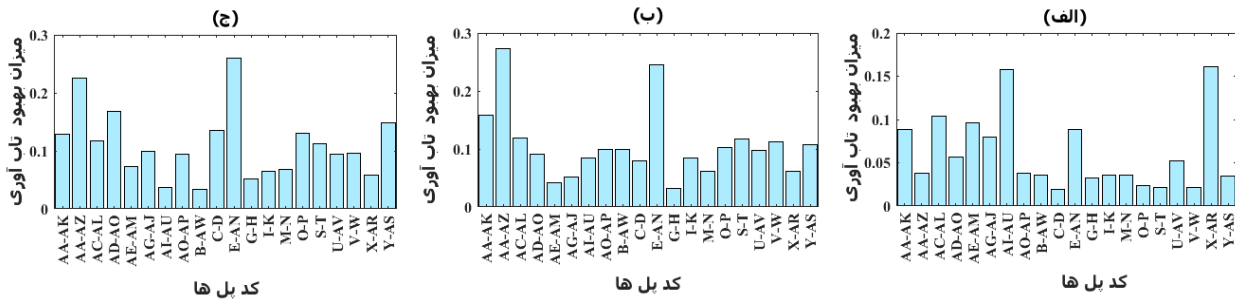
بنابراین، برای این شبکه، سه سبد بهینه متفاوت در دوره‌های مختلف وجود دارد. این که کدامیک از این سبدها یا ترکیبی اصلاح شده از آن‌ها، بهترین انتخاب برای افزایش تاب آوری شبکه می‌باشد، به شرایط حاکم بر مسأله بستگی دارد. اما الگوریتم، همواره مهم‌ترین

جدول ۱۰. دسته‌بندی پل‌های انتخاب شده در سبد بهینه

کد پل‌های انتخاب شده	اهمیت پل‌ها
X-AR, AC-AL, AE-AM, AI-AU	با اهمیت در کوتاه‌مدت
O-P, Y-AS, AA-AZ, AC-AL	با اهمیت در میان‌مدت
C-D, Y-AS, AA-AZ, AD-AO	با اهمیت در بلندمدت
E-AN, AA-AK	پل‌های همواره مهم
سایر پل‌هایی که در سبد بهینه هیچ دوره‌ای انتخاب نشدند	پل‌های غیرمهم

توسعه شبکه اهمیت خود را از دست داده‌اند $(X-AR, AI-AU)$ ، برخی دیگر نیز که در ابتدا کم اهمیت بودند، با توسعه شبکه اهمیت آن‌ها افزایش پیدا کرده است $(Y-AS, AA-AZ)$ ، اما برخی همواره مهم بوده‌اند $(E-AN, AA-AK)$.

شکل ۶، تغییرات شاخص اهمیت منفرد پل δ_B^d برای کلیه پل‌های شبکه را در وضعیت فعلی و دو دوره توسعه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که توسعه شبکه موجب تغییر اهمیت پل‌ها شده است. برخی از پل‌هایی که در ابتدا دارای اهمیت نسبی بالایی بودند، پس از



شکل ۶. تغییرات شاخص اهمیت منفرد پل‌ها: الف) گراف مرجع، ب) گراف توسعه افق اول و ج) گراف توسعه افق دوم

اهمیت تجمعی را کسب کنند، سبد بهینه اصلاح شده را تشکیل می‌دهند. جدول ۱۱، نتایج محاسبه شاخص اهمیت تجمعی برای ۱۱ پل مهم را نشان می‌دهد.

با توجه به محدودیت منابع در اختیار، حداکثر ۶ پل از بین ۱۱ پل را می‌توان انتخاب نمود. برای انجام این انتخاب، شاخص CI_b برای هر ۱۱ پل مهم محاسبه می‌شود. شش پلی که بر اساس شاخص CI_b بیشترین

جدول ۱۱. محاسبه شاخص اهمیت تجمعی برای ۱۱ پل مهم

(CI_b)			x_b^d			δ_b^d			b_i
$\varphi=0/0.5$	$\varphi=0$	$\varphi=-0/0.5$	$(d=3)$	$(d=2)$	$(d=1)$	$G_2(d=3)$	$G_1(d=2)$	$G_0(d=1)$	
۰/۱۱۷۱	۰/۱۳۵۶	۰/۱۵۸۲	۱	۰	۰	۰/۱۳۵۶	۰/۰۷۹۸	۰/۰۱۹۶	C-D
۰/۵۳۱۵	۰/۵۹۴	۰/۶۶۸۳	۱	۱	۱	۰/۲۶۰۵	۰/۲۴۴۵	۰/۰۸۸۹	E-AN
۰/۰۹۳۲	۰/۱۰۲۷	۰/۱۱۳۸	۰	۱	۰	۰/۱۲۹۹	۰/۱۰۲۷	۰/۰۲۳۹	O-P
۰/۱۵۳۲	۰/۱۶۰۹	۰/۱۶۹۴	۰	۰	۱	۰/۰۵۸۲	۰/۰۶۱۲	۰/۱۶۰۹	X-AR
۰/۲۲۴۷	۰/۲۵۴۸	۰/۲۹۰۹	۱	۱	۰	۰/۱۴۷۷	۰/۱۰۷۱	۰/۰۳۵	Y-AS
۰/۳۳۸۹	۰/۳۷۵۴	۰/۴۱۸۶	۱	۱	۱	۰/۱۲۸۶	۰/۱۵۸۸	۰/۰۸۸	AA-AK
۰/۴۴۱۱	۰/۴۹۷	۰/۵۶۳۸	۱	۱	۰	۰/۲۲۴۸	۰/۲۷۲۲	۰/۰۳۷۸	AA-AZ
۰/۲۰۵۸	۰/۲۲۱۷	۰/۲۳۹۹	۰	۱	۱	۰/۱۱۶۴	۰/۱۱۸۱	۰/۱۰۳۶	AC-AL
۰/۱۴۵۰	۰/۱۶۷۸	۰/۱۹۵۷	۱	۰	۰	۰/۱۶۷۸	۰/۰۹۰۸	۰/۰۵۶۱	AD-AO
۰/۰۹۱۵	۰/۰۹۶۱	۰/۱۰۱۲	۰	۰	۱	۰/۰۷۲۹	۰/۰۴۲۶	۰/۰۹۶۱	AE-AM
۰/۱۵۰۳	۰/۱۵۷۸	۰/۱۶۶۱	۰	۰	۱	۰/۰۳۶۱	۰/۰۸۴۹	۰/۱۵۷۸	AI-AU

با استفاده از نتایج حاصل از محاسبه شاخص CI_b و متناسب با شرایط حاکم بر مسأله، مالکان شبکه می‌توانند سبد بهینه را از بین ۵ الگوی تصمیم‌گیری مختلف تعیین نمایند. جدول ۱۲، الگوهای مختلف تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲. مقایسه تأثیر تغییر در چگالی شبکه بر پل‌های انتخاب شده برای تخصیص منبع

سطح فوریت	منبای تصمیم‌گیری	پل‌های انتخاب شده در سبد بهینه	تعداد بهسازی	هزینه
اضطراری	انتخاب سبد بهینه اولیه شده بدون توجه به تغییرات چگالی	E-AN, X-AR, AA-AK, AC-AL, AE-AM, AI-AU	۶	۱۳۸
زیاد	انتخاب سبد بهینه اصلاح شده از بین پل -	E-AN, Y-AS, AA-AK, AA-AZ, AC-AL, AD-AO	۶	۱۴۳

		های همواره مهم و پل‌های مهم در کوتاه‌مدت	
۱۴۳	۶	E-AN, X-AR, Y-AS, AA-AK, AA-AZ, , AC-AL	انتخاب سبد بهینه اصلاح شده از بین پل- های همواره مهم و پل‌های مهم در میان- مدت
۱۴۳	۶	E-AN, X-AR, Y-AS, AA-AK, AA-AZ, , AC-AL	انتخاب سبد بهینه اصلاح شده از بین پل- های همواره مهم و پل‌های مهم در بلندمدت
۱۴۴	۶	C-D, E-AN, Y-AS, AA-AK, AA-AZ, AD-AO	انتخاب سبد بهینه مربوط به آخرین دوره فوریت توسعه

برای بهبود تاب‌آوری شبکه تعیین می‌کند. در این شاخص، تعداد دفعاتی که یک پل در سبدهای بهینه دوره‌های مختلف انتخاب می‌شود لحاظ شده، تا پل‌هایی که دوره‌های بیشتری در سبد بهینه انتخاب شده‌اند در اولویت انتخاب قرار گیرند. همچنین، با توجه به عدم قطعیت و ماهیت احتمالاتی رویدادهای مخرب در این شاخص، ضریب فوریت (φ) در نظر گرفته شده است. استفاده از ضریب (φ) در این شاخص به مالکان شبکه این امکان را می‌دهد تا متناسب با شرایط حاکم بر مسأله، سبد بهینه را انتخاب نمایند.

جهت بیان نحوه استفاده از این شاخص، یک مثال عددی ارائه شده است. در این مثال، یک شبکه به عنوان شبکه مرجع و دو شبکه که نشان‌دهنده توسعه توپولوژی این شبکه طی دو دوره در آینده هستند، مورد بررسی قرار گرفتند. سبد بهینه اصلاح شده در این مثال با استفاده از شاخص CI_b تعیین گردید. نتایج این مثال نشان داد که استفاده از شاخص CI_b باعث انتخاب پل‌های متفاوتی نسبت به رویکردهای متداول انتخاب سبد بهینه می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت منابع که نمی‌توان تمام پل‌های شبکه را بهسازی نمود، سبد بهینه پل‌های مهم، با در نظر گرفتن تغییرات احتمالی شبکه در آینده را می‌توان مطابق الگوی تصمیم‌گیری زیر تعیین نمود:

الف) اگر احتمال وقوع رویداد مخرب پیش از توسعه

نتایج این مثال نشان داد که استفاده از شاخص CI_b باعث انتخاب پل‌های متفاوتی نسبت به سبد بهینه اولیه می‌شود. به عنوان نمونه، پل ($AE - AM$) ابتدا در سبد بهینه اولیه قرار داشت. اما استفاده از شاخص CI_b باعث شد تا این پل از سبد بهینه اصلاح شده حذف گردد. زیرا اهمیت منفرد این پل از $0/0961$ در وضعیت اولیه، طی دو مرحله توسعه شبکه به $0/0729$ کاهش می‌یابد. در مقابل، پل ($AA - AZ$) ابتدا در سبد بهینه اولیه قرار نداشت. اما با توجه به افزایش اهمیت منفرد این پل از $0/0378$ به $0/2248$ ، طی دو مرحله توسعه شبکه، در سبد بهینه اصلاح شده قرار گرفت.

۶. نتیجه‌گیری

اهمیت نسبی پل‌ها با تغییرات توپولوژی شبکه در آینده تغییر خواهد کرد. پل‌های موجود در یک شبکه بر اساس تغییراتی که در اهمیت نسبی آن‌ها طی فرآیند توسعه ایجاد می‌شود به ۵ گروه تقسیم می‌شوند: (۱) پل‌هایی که در کوتاه‌مدت (وضعیت فعلی) با اهمیت هستند، (۲) پل‌هایی که در میان‌مدت با اهمیت می‌شوند، (۳) پل‌هایی که در بلندمدت با اهمیت می‌شوند، (۴) پل‌هایی که همواره با اهمیت هستند و در نهایت (۵) پل‌هایی که همواره کم اهمیت هستند.

در این مقاله، یک شاخص با عنوان اهمیت جمع‌ی پل (CI_b) ارائه شده که با در نظر گرفتن تغییرات اهمیت پل‌ها در دوره‌های مختلف توسعه، سبد بهینه پل‌ها را

تاب‌آوری اولیه حاصل از پیاده‌سازی سبد بهینه انتخاب شده با استفاده از شاخص CI_b همواره کمتر از تاب‌آوری اولیه حاصل از پیاده‌سازی سبد بهینه انتخاب شده بر اساس رویکردهای متداول می‌باشد. زیرا سبد بهینه اصلاح شده با استفاده از شاخص CI_b در شرایط تصمیم‌گیری ایستا یک جواب غیربهینه محسوب می‌شود. اما تغییر فرضیات حاکم بر مسأله در آینده به دلیل توسعه شبکه، برانزنگی این جواب غیربهینه را افزایش داده و به مرور به جواب بهینه متناسب با شرایط پیش‌بینی شده در آینده تبدیل می‌سازد.

با توجه به اینکه در این مقاله، هدف از مقایسه سبدهای بهینه اولیه و اصلاح شده فقط بررسی اثر تغییر و رشد توپولوژی شبکه بر نحوه تعیین سبد بهینه بود، سایر عوامل مؤثر مثل قابلیت اطمینان پل‌ها و ترافیک، در طول زمان بدون تغییر در نظر گرفته شد. اما در واقعیت، قابلیت اطمینان اکثر پل‌ها به مرور زمان و در اثر عوامل داخلی و خارجی کاهش می‌یابد. ترافیک عبوری هر شاخه نیز با پیاده‌سازی برنامه‌های توسعه شبکه تغییر خواهد کرد. با توجه به اینکه این ویژگی‌ها در پل‌های مختلف، در آینده به یک نسبت و به‌طور مشابه تغییر نمی‌کنند، در تحقیقات آتی می‌توان با پیش‌بینی تغییر سایر عوامل مؤثر بر تغییر اهمیت پل، بررسی کامل‌تری در خصوص تعیین سبد بهینه انجام داد. همچنین، در این تحقیق، برای تعیین سنجش تاب‌آوری شبکه از شاخص میانگین وزنی تعداد مسیرهای مستقل و قابل اطمینان استفاده شد. در تحقیقات آتی می‌توان از سایر شاخص‌های توپولوژیک و یا یک شاخص ترکیبی از آن‌ها برای سنجش تاب‌آوری شبکه استفاده نمود.

شبکه بسیار زیاد است، به این معناست که شبکه در وضعیت اضطرار قرار دارد و سبد بهینه باید بر مبنای وضعیت فعلی شبکه و بدون در نظر گرفتن اثرات رشد و توسعه آینده شبکه انتخاب شود.

ب) اگر احتمال وقوع رویداد مخرب در کوتاه‌مدت زیاد است (فوریت زیاد)، سبد بهینه باید شامل پل‌های همواره مهم و چند پل با اهمیت در کوتاه‌مدت باشد.

ج) اگر احتمال وقوع رویداد مخرب در میان مدت زیاد است (فوریت متوسط)، سبد بهینه باید شامل پل‌های همواره مهم و چند پل با اهمیت در میان‌مدت باشد.

د) اگر احتمال وقوع رویداد مخرب در بلندمدت زیاد است (فوریت کم)، سبد بهینه باید شامل پل‌های همواره مهم و چند پل با اهمیت در بلندمدت باشد.

ه) و در نهایت، اگر احتمال وقوع رویداد مخرب پس از توسعه کامل شبکه پیش‌بینی شده است، در واقع شبکه در شرایط بدون فوریت قرار دارد و سبد بهینه مربوط به شبکه حاصل از آخرین دوره توسعه، به عنوان پل‌های مهم انتخاب می‌شود.

لازم به ذکر است که سرمایه‌گذاری و تخصیص بودجه برای بهسازی پل‌های شبکه معمولاً با اهداف بلندمدت انجام می‌شود. اما حتی در شرایطی که امکان جذب و تخصیص بودجه‌های جدید برای بهسازی پل‌ها و بهبود تاب‌آوری شبکه در آینده وجود داشته باشد، پیشنهاد می‌شود که ابتدا سبد بهینه پل‌ها را مطابق الگوی تصمیم‌گیری ارائه شده انتخاب نمود. سپس، در صورت جذب و تخصیص بودجه جدید در آینده، سبد بهینه انتخاب شده پیشین تکمیل شود. زیرا استفاده از این الگو تضمین می‌کند که در هر دوره، کمترین میزان افت در شاخص تاب‌آوری در معرض ریسک باشد.

۷. مراجع

- Alipour, A. and Shafei, B. 2016. "Seismic resilience of transportation networks with deteriorating components". *J. Struct. Eng.*, 142(8): C4015015.
- Arora, V. and Ventresca, M. 2018. "Modeling topologically resilient supply chain networks". *Appl. Netw. Sci.*, 3(1): 19.
- Ash, J. and Newth, D. 2007. "Optimizing complex networks for resilience against cascading failure". *Phys.*

- A: *Statist. Mech. Appl.*, 380: 673-683.
- Aydin, N. Y., Duzgun, H. S., Wenzel, F. and Heinemann, H. R. 2018. "Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards". *Nat. Hazard.*, 91(1): 37-68.
- Berche, B., Von Ferber, C., Holovatch, T. and Holovatch, Y. 2009. "Resilience of public transport networks against attacks". *Eur. Phys. J. B*, 71(1): 125-137.
- Bereg, S. and Kirkpatrick, D. 2009. "Approximating barrier resilience in wireless sensor networks". *Int. Symp. Algorithms and Experiments for Sensor Systems, Wireless Networks and Distributed Robotics*, Springer, Berlin, pp. 29-40.
- Bešinović, N. 2020. "Resilience in railway transport systems: A literature review and research agenda". *Transport Rev.*, 40(4): 457-478.
- Bocchini, P. and Frangopol, D. M. 2012. "Optimal resilience-and cost-based postdisaster intervention prioritization for bridges along a highway segment". *J. Bridge Eng.*, 17(1): 117-129.
- Bondy, J. A. and Murty, U. S. R. 1982. "Graph theory with applications". Fifth Printing, Elsevier Science Publishing Co., Inc., 52: 1277-1294.
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... and Von Winterfeldt, D. 2003. "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities". *Earthq. Spectra*, 19(4): 733-752.
- Calvert, S. C. and Snelder, M. 2018. "A methodology for road traffic resilience analysis and review of related concepts". *Transportmetrica A: Transport Sci.*, 14(1-2): 130-154.
- Chang, L., Peng, F., Ouyang, Y., Elnashai, A. S. and Spencer Jr., B. F. 2012. "Bridge seismic retrofit program planning to maximize postearthquake transportation network capacity". *J. Infrastruct. Syst.*, 18(2): 75-88.
- Chopra, S. S., Dillon, T., Bilec, M. M. and Khanna, V. 2016. "A network-based framework for assessing infrastructure resilience: A case study of the London metro system". *J. Royal Soc. Interface*, 13(118): 20160113.
- Groth, D. and Skandier, T. 2005. "Network+ study guide". Fourth Edition, Sybex.
- Decò, A., Bocchini, P. and Frangopol, D. M. 2013. "A probabilistic approach for the prediction of seismic resilience of bridges". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 42(10): 1469-1487.
- Dueñas-Osorio, L., Craig, J. I. and Goodno, B. J. 2004. "Probabilistic response of interdependent infrastructure networks". 2nd Annual Meeting of the Asian-Pacific Network of Centers for Earthquake Engineering Research (ANCER), Honolulu, Hawaii, July, 28-30.
- Fang, Y. P., Pedroni, N. and Zio, E. 2016. "Resilience-based component importance measures for critical infrastructure network systems". *IEEE Trans. Reliab.*, 65(2): 502-512.
- Frangopol, D. M. and Bocchini, P. 2011. "Resilience as optimization criterion for the rehabilitation of bridges belonging to a transportation network subject to earthquake". *Structures Congress 2011*, pp. 2044-2055.
- Garcia, D., Mavrodiev, P. and Schweitzer, F. 2013. "Social resilience in online communities: The autopsy of friendster. *Proceedings of the First ACM Conference on Online Social Networks*, pp. 39-50.
- Gauthier, P., Furno, A. and El Faouzi, N. E. 2018. "Road network resilience: How to identify critical links subject to day-to-day disruptions". *Transport. Res. Record*, 2672(1): 54-65.
- Hartmann, A. K. 2014. "Large-deviation properties of resilience of transportation networks. *Eur. Phys. J. B*, 87(5): 114.
- Hosseini, S. and Barker, K. 2016. "Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: A case study of inland waterway ports". *Comput. Indust. Eng.*, 93: 252-266.
- Hosseini, S., Barker, K. and Ramirez-Marquez, J. E. 2016. "A review of definitions and measures of system resilience". *Reliab. Eng. Syst. Safety*, 145: 47-61.
- Huang, Y., Martínez, J. F., Sendra, J. and López, L. 2015. "Resilient wireless sensor networks using topology control: A review". *Sensors*, 15(10): 24735-24770.
- Ip, W. H. and Wang, D. 2009. "Resilience evaluation approach of transportation networks". 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, IEEE, Vol. 2, pp. 618-622.
- Ip, W. H. and Wang, D. 2011. "Resilience and friability of transportation networks: Evaluation, analysis and optimization". *IEEE Syst. J.*, 5(2): 189-198.
- Janić, M. 2015. Reprint of "Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 77-92.
- Kameshwar, S., Cox, D. T., Barbosa, A. R., Farokhnia, K., Park, H., Alam, M. S. and 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". *Reliab. Eng. Syst. Safety*, 191: 106568.
- Karamlou, A. and Bocchini, P. 2014. "Optimal bridge restoration sequence for resilient transportation networks". *Structures Congress 2014*, pp. 1437-1447.
- Kim, D. H., Eisenberg, D. A., Chun, Y. H. and Park, J. 2017. "Network topology and resilience analysis of South Korean power grid". *Phys. A: Statist. Mech. Appl.*, 465: 13-24.
- Kim, T. H., Tipper, D. and Krishnamurthy, P. 2013. "Localized algorithm to improve connectivity and topological resilience of multi-hop wireless networks". *J. Info. Commun. Converg. Eng.*, 11(2): 69-81.
- Kuang, C., Zha, Y., Liu, C. and Chen, J. 2020. "Altered topological properties of brain structural covariance networks in patients with cervical spondylotic myelopathy". *Front. Human Neurosci.*, 14: 364.
- Kurtz, N., Song, J. and Gardoni, P. 2016. "Seismic reliability analysis of deteriorating representative US West Coast bridge transportation networks". *J. Struct. Eng.*, 142(8): C4015010.
- Li, B., Ofori-Boateng, D., Gel, Y. R. and Zhang, J. 2020. "A hybrid approach for transmission grid resilience assessment using reliability metrics and power system local network topology". *Sustain. Resil. Infrastruct.*, DOI: 10.1080/23789689.2019.1708182
- Li, H., Zhou, H., Yang, Y., Wang, H. and Zhong, N. 2017. "More randomized and resilient in the topological properties of functional brain networks in patients with major depressive disorder". *J. Clinic. Neurosci.*, 44: 274-278.
- Li, X. and Xiao, R. 2017. "Analyzing network topological characteristics of eco-industrial parks from the perspective of resilience: A case study". *Ecol. Indic.*, 74: 403-413.
- Li, Z., Jin, C., Hu, P. and Wang, C. 2019. "Resilience-based transportation network recovery strategy during emergency recovery phase under uncertainty". *Reliab. Eng. Syst. Safety*, 188: 503-514.
- Liu, C., Fan, Y. and Ordóñez, F. 2009. "A two-stage stochastic programming model for transportation network protection". *Comput. Oper. Res.*, 36(5): 1582-1590.
- Liu, Y., McNeil, S., Hackl, J. and Adey, B. T. 2020. "Prioritizing transportation network recovery using a resilience measure". *Sustain. Resil. Infrastruct.*, DOI: 10.1080/23789689.2019.1708180
- Mari, S. I., Lee, Y. H., Memon, M. S., Park, Y. S. and Kim, M. 2015. "Adaptivity of complex network topologies for designing resilient supply chain networks". *Int. J. Ind. Eng.*, 22(1).
- Meng, F., Fu, G., Farmani, R., Sweetapple, C. and Butler, D. 2018. "Topological attributes of network resilience: A study in water distribution systems". *Water Res.*, 143: 376-386.
- Merschman, E., Doustmohammadi, M., Salman, A. M. and Anderson, M. 2020. "Postdisaster decision framework for bridge repair prioritization to improve road network resilience". *Transport. Res. Record*, 2674(3): 81-92.
- Miller-Hooks, E., Zhang, X. and Fatorechi, R. 2012. "Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks". *Comput. Oper. Res.*, 39(7): 1633-1643.
- Osei-Asamoah, A. and Lownes, N. E. 2014. "Complex network method of evaluating resilience in surface transportation networks". *Transport. Res. Record*, 2467(1): 120-128.
- Schintler, L. A., Kulkarni, R., Gorman, S. and Stough, R. 2007. "Using raster-based GIS and graph theory to analyze complex networks". *Netw. Spat. Econ.*, 7(4): 301-313.
- Soltani-Sobh, A., Heaslip, K., Scarlatos, P. and Kaisar, E. 2016. "Reliability based pre-positioning of recovery centers for resilient transportation infrastructure". *Int. J. Disaster Risk Reduc.*, 19: 324-333.
- Testa, A. C., Furtado, M. N. and Alipour, A. 2015. "Resilience of coastal transportation networks faced with extreme climatic events". *Transport. Res. Record*, 2532(1): 29-36.
- Vugrin, E. D., Turnquist, M. A. and Brown, N. J. 2014. "Optimal recovery sequencing for enhanced resilience and service restoration in transportation networks". *Int. J. Critic. Infrastruct.*, 10(3-4): 218-246.
- Wen, M., Chen, Y., Yang, Y., Kang, R. and Zhang, Y. 2020. "Resilience-based component importance measures". *Int. J. Robust Nonlinear Control*, 30(11): 4244-4254.
- Wen, W., Zhang, M., Zhai, C. and Liu, W. 2019. "Resilience loss factor for evaluation and design considering the effects of aftershocks". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 116: 43-49.
- Zhang, D. and Sterbenz, J. P. 2015. "Measuring the resilience of mobile ad hoc networks with human walk patterns. 7th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM), IEEE, pp. 161-168.
- Zhang, W. and Wang, N. 2016. "Resilience-based risk mitigation for road networks". *Struct. Safety*, 62: 57-65.
- Zhang, W., Wang, N. and Nicholson, C. 2017. "Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks". *Struct. Infrastruct. Eng.*, 13(11): 1404-1413.
- Zhang, W., Wang, N., Nicholson, C. and Tehrani, M. H. 2018. "A stage-wise decision framework for transportation network resilience planning". Preprint arXiv:1808.03850.

بررسی اثر تغییر در چگالی شبکه بر نحوه بهینه سازی تخصیص بودجه محدود بین پل‌ها جهت تاب آوری سازی شبکه حمل و نقل

Zhang, X., Miller-Hooks, E. and Denny, K. 2015. "Assessing the role of network topology in transportation network resilience". *J. Transport Geog.*, 46: 35-45.

Zhou, Y., Wang, J. and Yang, H. 2019. "Resilience of transportation systems: Concepts and comprehensive review". *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, 20(12): 4262-4276.

