

## ارزیابی ریسک‌های امنیتی پل‌ها در شرایط عدم قطعیت توپولوژی شبکه

مهدی دزفولی نژاد، دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز  
رضا رؤفی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز  
احمد دالوند، دانشیار، استاد مدعو گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، و  
هیئت علمی دانشکده فنی دانشگاه لرستان، خرم آباد

Email: r\_raoufi@iauhvaz.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶

### چکیده

مدل‌های ارائه شده جهت ارزیابی ریسک‌های امنیتی پل‌ها به‌طور کلی از الگوی حاصل ضرب سه عامل احتمال وقوع (O)، آسیب‌پذیری (V) و اهمیت (I) پیروی می‌کنند. در این مقاله، به پارامتر اهمیت پل (I) و تغییرات آن ناشی از عدم قطعیت توپولوژی شبکه طی برنامه‌های توسعه شبکه در آینده پرداخته می‌شود. برای سنجش و مقایسه اهمیت نسبی پل‌ها، دو گروه شاخص‌های اهمیت فردی و اهمیت شبکه‌ای پل‌ها مورد توجه قرار گرفت. با توجه به این که ویژگی‌های شبکه‌ای پل‌ها در طی توسعه شبکه تغییر می‌کنند، جهت مقایسه رویکردهای مختلف تصمیم‌گیری در انتخاب پل‌ها، یک مطالعه موردی انجام شد. در این مطالعه، شبکه حمل و نقل درون شهری اهواز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه موردی نشان داد که اهمیت برخی از پل‌های شبکه طی توسعه آن در آینده تغییر می‌کند. به عنوان نمونه، پل B3 که در وضعیت اولیه شبکه جزء پل‌های با اهمیت نبود، طی روند توسعه جزء پل‌های با اهمیت قرار گرفت. در مقابل، در پل B5، میزان اهمیت نسبی در ابتدا زیاد بود، اما طی روند توسعه اهمیت نسبی آن کاهش یافته و از سبب پل‌های با اهمیت خارج گردید. همچنین، ملاحظه شد که شماری از پل‌ها مانند B1، B6 و B7 همواره با اهمیت هستند و در هیچ دوره‌ای از سبب پل‌های با اهمیت خارج نمی‌شوند. در مقابل، پل‌هایی مثل B4 همواره کم‌اهمیت محسوب می‌شوند و تغییرات شبکه در هیچ دوره‌ای سبب قرارگیری آن‌ها در بین پل‌های با اهمیت نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: ریسک‌های امنیتی، اهمیت پل، توپولوژی، شبکه حمل و نقل.

## ۱. مقدمه

الی ۲۰۱۵، دست‌کم ۷ پل در این کشور در اثر حمله خرابکارانه تخریب شده‌اند، در حالی که طی این سال‌ها فقط ۲ پل در اثر خطاهای طراحی و ساخت شکست سازه‌ای داشته‌اند (اد و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، برآوردهای مالی انجام شده در برخی تحقیقات حاکی از آن است که حملات خرابکارانه در مقیاس تخریب یک پل می‌تواند در حد یک طوفان با شدت کم زیان مالی داشته باشد (الکاظمی و مک‌کنزی، ۲۰۱۶). به عنوان نمونه، برخی محققین پیش‌بینی کرده‌اند که یک حمله خرابکارانه روی پل عبوری از رودخانه می‌سی‌سی‌پی می‌تواند در حدود ۱۷/۸ میلیون دلار به اقتصاد امریکا ضربه وارد نماید (ریچاردسون و همکاران، ۲۰۱۴).

با توجه به این که مالکان شبکه منابع کافی برای مقاوم‌سازی تمامی پل‌های موجود در شبکه را در اختیار ندارند، لذا می‌بایست با بهره‌گیری از ابزارها و مدل‌های ارزیابی و مدیریت ریسک<sup>۱</sup> پل‌هایی را که از دیدگاه امنیتی دارای نمره ریسک بالاتری هستند را به عنوان پل‌های حیاتی شناسایی نموده و در اولویت انتخاب برای تخصیص منبع قرار دهند. در سال‌های اخیر، و به‌ویژه پس از حملات ۱۱ سپتامبر سال ۲۰۰۱، ابزارها و مدل‌های ارزیابی و مدیریت ریسک متنوعی در حوزه امنیت زیرساخت‌های حیاتی در تحقیقات مختلف ارائه شده است. با این حال، اکثر این تحقیقات بر زیرساخت‌هایی مانند ساختمان، سد، تأسیسات شیمیایی و صنعتی تمرکز داشته‌اند و فقط تعداد اندکی از این تحقیقات موضوع امنیت پل‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. سازمان مدیریت بحران فدرال آمریکا، تا کنون شماری از دستورالعمل‌های مختلف در زمینه ریسک‌های امنیتی منتشر نموده (جدول ۱)، اما تمامی آن‌ها بر انواع مختلف ساختمان تمرکز داشته‌اند.

در سال‌های اخیر، حملات خرابکارانه اعلیه سیستم‌های حمل و نقل به شدت افزایش یافته و آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر این حملات آشکار شده است (جنکینز، ۲۰۰۱؛ هاروی و کومار، ۲۰۲۰). در بین اجزای مختلف شبکه‌های حمل و نقل، پل‌ها به دلیل سهولت دسترسی و آثار مخرب اقتصادی، اجتماعی و سیاسی شکست آن‌ها، به اهداف جذابی برای مهاجمان تبدیل شده‌اند (گِرد و همکاران، ۲۰۲۰). اطلاعات گردآوری شده از آمار حوادث تروریستی به پل‌ها نشان می‌دهد که در سراسر جهان در سال‌های ۱۹۸۰ الی ۲۰۱۷، دست‌کم ۸۶ حمله تروریستی به طور خاص پل‌ها را مورد هدف قرار داده‌اند. فقط یک گروه خرابکارانه، دست‌کم ۱۷ حمله تروریستی به پل‌های حیاتی و استراتژیک در مناطق مختلف عراق داشته است (حاتم و ال تمیمی، ۲۰۱۵).

در تحقیقات انجام شده در برخی کشورها در خصوص مهمترین علل شکست پل‌ها، به اهمیت توجه به حملات خرابکارانه اشاره شده است. در کلمبیا، حملات خرابکارانه مهمترین علت فروریزش پل‌ها در این کشور شناخته شده‌اند (دیاز و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین، مقایسه دلایل شکست پل‌ها در کشور چین با سایر کشورها نشان می‌دهد که اهمیت حملات خرابکارانه به اندازه برخی تهدیدات طبیعی مثل رانش زمین بوده و به همان نسبت باعث فروریزش پل‌ها شده‌اند (فرانگوئل و همکاران، ۲۰۱۰). بررسی مهم‌ترین دلایل شکست پل‌ها در کشور نیجریه طی سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۸ نشان داد که حملات خرابکارانه بیش از عامل خطای مهندسی باعث فروریزش پل‌های این کشور شده‌اند. لازم به ذکر است که فقط طی سال‌های ۲۰۱۴

<sup>2</sup>- Risk assessment and management

<sup>1</sup>- Terrorist attack

جدول ۱. مجموعه دستورالعمل‌های ارزیابی و مدیریت ریسک سازمان مدیریت بحران فدرال آمریکا

کد	عنوان	زیرساخت مورد بررسی
FEMA 426	راهنمای مرجع برای کاهش حملات خرابکارانه احتمالی علیه ساختمان‌ها	انواع ساختمان‌ها
FEMA 427	مبانی اولیه طراحی ساختمان‌های تجاری برای کاهش حملات خرابکارانه	ساختمان‌های تجاری
FEMA 428	مبانی اولیه طراحی ایمن مدارس برای حملات خرابکارانه و تیراندازی	ساختمان‌های آموزشی
FEMA 429	بیمه، دارایی و مقررات اولیه برای مدیریت تهدیدات خرابکارانه در ساختمان‌ها	انواع ساختمان‌ها
FEMA 430	طراحی محوطه و فضای‌های شهری برای امنیت	محوطه پیرامون ساختمان
FEMA 452	ارزیابی ریسک: راهنمایی برای کاهش حملات خرابکارانه احتمالی علیه ساختمان‌ها	انواع ساختمان‌ها
FEMA 453	راهنمای طراحی برای پناهگاه‌ها و اتاق‌های امن	پناهگاه‌ها
FEMA 455	دفترچه راهنما برای ارزیابی چشمی سریع ساختمان‌ها برای ارزیابی تهدیدات خرابکارانه	انواع ساختمان‌ها
FEMA 459	افزایش محافظت از ساختمان‌های تجاری موجود در برابر حملات خرابکارانه	ساختمان‌های تجاری

طبیعی تقریباً تثبیت و یکپارچه شوند. اما در زمینه مخاطرات انسان‌ساز تا کنون مدلی یکپارچه جهت ارزیابی ریسک و اولویت بندی پل‌های شبکه ارائه نشده و اکثر متولیان مختلف به صورت پراکنده از مدل‌های داخلی خود استفاده می‌کنند (دیویس و همکاران، ۲۰۱۷).

فقدان مدل یکپارچه و مورد وفاق همه سازمان‌های متولی و بهره‌بردار برای ارزیابی ریسک‌های امنیتی پل‌ها سبب شده تا بسیاری از این سازمان‌ها پروژه‌های تحقیقاتی ویژه‌ای در این خصوص تعریف نمایند. از جمله این موارد می‌توان به سیاست‌گذاری‌های انجام شده توسط پنل روبان آبی<sup>۱</sup> در مدیریت بزرگراه‌های فدرال<sup>۲</sup> آمریکا (رابرتز، جی ای، ۲۰۰۳؛ ذوادی و چیس، ۲۰۰۶؛ کوپر و همکاران، ۲۰۱۰) و پروژه تحقیقاتی سِرُن<sup>۳</sup> در اتحادیه اروپا (هارت و روتنیلر، ۲۰۱۳؛ کوندینیا و همکاران، ۲۰۱۴) اشاره نمود. در جدول ۲، به برخی از مدل‌ها ارائه شده توسط محققین مختلف جهت ارزیابی

بررسی تحقیقات مرتبط در ادبیات موضوع نشان می‌دهد که اکثر ابزارها و مدل‌های مدیریت و ارزیابی ریسک ارائه شده در خصوص پل‌ها بر رویدادهای مخرب طبیعی تمرکز داشته‌اند. رضایی و همکاران (۲۰۲۱) در یک مطالعه مروری، شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد پل‌ها در برابر رویدادهای مخرب را در پنج گروه شاخص‌های ارزیابی ریسک، تاب‌آوری، قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری و استواری طبقه بندی نمودند. بررسی و مرور این شاخص‌ها نشان داد که عمده تحقیقاتی که از شاخص‌های ارزیابی عملکرد پل‌ها استفاده نمودند، بر رویدادهای مخرب طبیعی مثل زلزله و طوفان تمرکز داشتند. با توجه به این موضوع، محققین استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد پل‌ها در حوزه حملات خرابکارانه را به عنوان یک خلأ تحقیقاتی و زمینه مناسب برای توسعه تحقیقات پیشنهاد دادند. توجه بیشتر محققان بر مخاطرات طبیعی باعث شده تا روش‌های ارزیابی ریسک پل‌ها در حوزه مخاطرات

Highway Administration (FHWA)

<sup>3</sup>- Sermon – Security of Road Transport Networks

<sup>1</sup>- The Blue Ribbon Panel on Bridge and Tunnel Security

<sup>2</sup> - US Department of Transportation Federal

ریسک‌های امنیتی پل‌ها اشاره شده است (دزفولی نژاد و همکاران، ۲۰۲۲).

جدول ۲. مدل مختلف ارزیابی ریسک‌های امنیتی پل‌ها (دزفولی نژاد و همکاران، ۲۰۲۲)

مدل ارزیابی ریسک	محققین
$BCI = \left[ \frac{1}{8} \times \left( \sum_{i=1}^8 CI_i \times \frac{F_{CI_i}}{CI_{i_{max}}} \right) \right] \times RF$	اداره ترابری تگزاس (۲۰۰۲)
$Y = \frac{y}{75} \times 100$ و $X = \frac{x}{c_{max}} \times 100$	آشتو (۲۰۰۲)
$RS = IF \times \sum [OF_i \times VF_i]$ فرآیند چند لایه (RFRM)	اداره بزرگراه‌های ایالتی آمریکا (۲۰۰۳) لئونگ و همکاران (۲۰۰۴)
$R = O \times V \times I$	کوپر و همکاران (۲۰۰۵)
$R = f(V, C)$	ویلیامسون (۲۰۰۵)
$R = O \times V \times I$	اداره ترابری نیوجرسی (۲۰۰۶)
$TBR = \sum [I_j \sum (O_{ij} \cdot V_{ij})]$	ری (۲۰۰۷)
$R = O \times V \times I$	عیسی (۲۰۰۸)
$R = O \times V \times I$	والثو (۲۰۱۰)
$R = \sum (O_i \cdot V_i) \times I$	کوفلین (۲۰۱۱)
$R = O \times V \times I$	والثو (۲۰۱۲)
$R = \sum_i p_i \times (C_{D,i} + C_{SE,i})$	اندرسون و همکاران (۲۰۱۳)
$R = p \times c$	دوخواژک و اسکوروپکا (۲۰۱۳)
$SR_a = \frac{F_{R_a}^\alpha}{(F_{TL_a}^\delta + F_{C_a}^\lambda)}$	دوجوترک (۲۰۱۴)
$R_{ij} = \sum_{k=1}^6 \left[ w_k^A \times \sqrt{\left( \sqrt{a_{ij}^{k1}} \times a_{ij}^{k2} \times \sum_{l=1}^3 [w_l^C \times c_{ij}^{kl}] \right)} \right]$	لی و همکاران (۲۰۱۶)
$R_i = \frac{P_i C_i}{\sum_{i=1}^n (P_i C_i)}$	دوخواژک و اسکوروپکا (۲۰۱۶)
$R = O \times V \times I$	اداره بزرگراه‌های ایالتی آمریکا (۲۰۱۷)

=  $C_{max}$  = حداکثر مقدار  
 =  $IF$  = نمره ریسک؛  
 =  $RS$  = نمره ریسک؛  
 =  $VF_i$  = فاکتور اهمیت؛  
 =  $OF_i$  = فاکتور احتمال وقوع؛  
 =  $RFRM$  = مدل جداسازی،  
 =  $O$  = رتبه‌بندی و مدیریت ریسک،  
 =  $R$  = ریسک؛  
 =  $I$  = وقوع تهدید در پل؛  
 =  $V$  = آسیب‌پذیری پل؛  
 =  $C$  = پیامدهای

=  $CI_i$  = شاخص حیاتی پل؛  
 =  $F_{CI_i}$  = معیارهای تعیین کننده اهمیت پل؛  
 =  $CI_{i_{max}}$  = معیارهای تعیین کننده اهمیت پل؛  
 =  $RF$  = فاکتور مبتنی بر  
 =  $X$  = شاخص بحران‌پذیری،  
 =  $Y$  = شاخص آسیب‌پذیری؛  
 =  $X$  = تمام پل‌های مورد بررسی،  
 =  $X$  = معیارهای جایگزینی پل،  
 =  $Y$  = نمره امتیاز بحران‌پذیری؛

فاکتورهای (O) و (V) به ترتیب بیانگر احتمال وقوع تهدید در یک پل خاص و میزان آسیب پذیری آن پل در برابر آن تهدید می باشد. تمرکز این مقاله بر فاکتور اهمیت پل (I) می باشد. لذا، فاکتورهای (O) و (V) در این مقاله مورد بررسی قرار نمی گیرند.

$$R = O \times V \times I \quad (1)$$

اهمیت پل (I) بیانگر آثار و تبعات اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و... شکست پل می باشد (دزفولی نژاد و همکاران، ۲۰۲۲). برای سنجش (I) معیارهای مختلفی پیشنهاد شده است. بررسی معیارهای پیشنهاد شده در تحقیقات مختلف برای تعیین (I)، نشان می دهد که اهمیت یک پل به دو گروه: (۱) ویژگی های مبتنی بر خصوصیات فردی<sup>۴</sup> (I<sub>ind</sub>) پل مانند ابعاد هندسی، ارزش تاریخی و نمادین، هزینه و زمان بازسازی مجدد و (۲) ویژگی های مبتنی بر خصوصیات شبکه ای<sup>۵</sup> (I<sub>ntw</sub>) مانند وجود مسیرهای جایگزین، قرارگیری در مسیرهای تخلیه اضطراری یا مسیرهای نظامی و نزدیکی به مراکز مهم مرتبط می باشد (رابطه ۲).

$$I = f(I_{ind}, I_{ntw}) \quad (2)$$

در شرایط محدودیت منابع که فقط تعداد محدودی از پل های را می توان برای تخصیص منبع انتخاب نمود، اگر مالکان شبکه فقط بر ویژگی های فردی پل ها تمرکز نمایند، پل هایی با اهمیت فردی (I<sub>ind</sub>) کم در اولویت انتخاب قرار نمی گیرند، حتی اگر این پل از اهمیت شبکه ای (I<sub>ntw</sub>) بالایی برخوردار باشند. این موضوع ضرورت توجه همزمان به هر دو گروه ویژگی های فردی و شبکه ای را برای پل ها در ارزیابی ریسک امنیتی نمایان می سازد. از سوی دیگر، در بسیاری از شبکه های حمل و نقل، امکان تغییر و توسعه ساختار شبکه در آینده، طی افق های کوتاه یا بلندمدت، با کاهش تعداد شاخه های موجود، یا افزایش شاخه های جدید وجود دارد که منجر

حمله به پل، TBR = ریسک تجمعی پل؛  $j =$  هر یک از اجزای منفرد پل؛  $i =$  تهدید مبنا؛  $I_j =$  اهمیت هر یک از اجزای منفرد برای پل؛  $O_{ij} =$  احتمال نسبی وقوع تهدید مبنا در هر یک از اجزای منفرد پل؛  $V_{ij} =$  آسیب پذیری هر یک از اجزای منفرد پل در صورتی که تهدید مبنا در آن جزء رخ داده باشد.  $R =$  ریسک؛  $p_i =$  احتمال مورد حمله قرار گرفتن پل؛  $C_{D,i} =$  پیامدهای مستقیم حمله به پل؛  $C_{SE,i} =$  پیامدهای غیرمستقیم اقتصادی-اجتماعی حمله به پل،  $R =$  ریسک آسیب به سازه پل،  $p =$  احتمال مورد حمله قرار گرفتن پل،  $C =$  پیامدهای شکست پل در صورت مورد حمله قرار گرفتن،  $SR_a =$  شاخص رتبه امنیتی پل،  $FR_a =$  فاکتور تاب آوری پل؛  $\alpha =$  وزن نمایی فاکتور تاب آوری؛  $F_{TL_a} =$  فاکتور احتمال وقوع تهدید در پل،  $\delta =$  وزن نمایی فاکتور احتمال وقوع تهدید،  $F_{C_a} =$  فاکتور پیامدهای حمله به پل؛  $\lambda =$  وزن نمایی فاکتور پیامد،  $R_{ij} =$  امتیاز تجمعی ریسک ناشی از ۶ سناریوی تهاجم تعریف شده،  $w_k^A =$  احتمال نسبی وقوع هر یک از ۶ سناریوی تهاجم تعریف شده؛  $c_{ij}^{kl} =$  شاخص تجمعی پیامد شکست پل؛  $a_{ij}^{k1} =$  شاخص ارزیابی میزان سهولت در اجرای هر یک از ۶ سناریوی تهاجم تعریف شده؛  $a_{ij}^{k2} =$  شاخص ارزیابی میزان اختفاء در برابر هر یک از ۶ سناریوی تهاجم تعریف شده؛  $w_l^C =$  وزن نسبی شاخص های مؤثر در محاسبه شاخص تجمعی پیامد شکست پل.

مدل های ارائه شده جهت ارزیابی ریسک های امنیتی پل ها علیرغم تنوع در جزئیات، به طور کلی از یک الگوی تقریباً مشابه پیروی می کنند. چارچوب کلی روش ارزیابی ریسک این مدل ها مطابق رابطه (۱) می باشد (دزفولی نژاد و همکاران، ۲۰۲۲). ریسک در این رابطه به صورت حاصل ضرب سه فاکتور احتمال وقوع<sup>۱</sup> (O)، آسیب پذیری<sup>۲</sup> (V) و اهمیت<sup>۳</sup> (I) تعریف شده است.

4- Individual-level characterize

5- Network-level characterize

1- Occurrence factor (O)

2- Vulnerability factor (V)

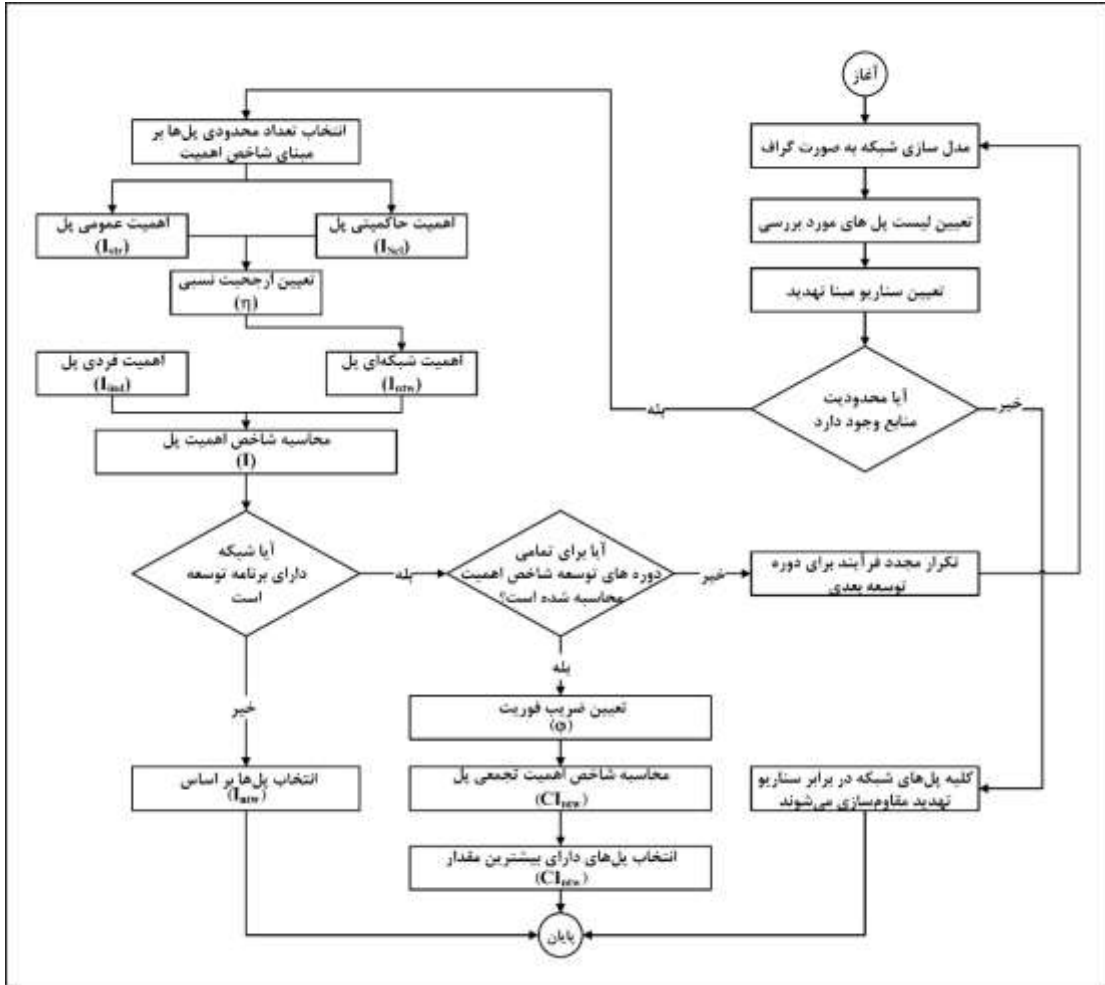
3- Importance factor (I)

آن‌ها در بلندمدت تغییر می‌کند، در ارزیابی ریسک و رتبه‌بندی پل‌ها برای تخصیص منبع می‌بایست عدم قطعیت توپولوژی شبکه در آینده را مد نظر قرار داد. زیرا در شرایط محدودیت منابع، شناسایی پل‌هایی که صرف-نظر از تغییرات توپولوژی شبکه در آینده، همواره با اهمیت هستند، مالکان شبکه را در تصمیم‌گیری برای تخصیص بهینه منابع هدایت می‌نماید.

نویسندگان این مقاله، پیش‌تر، شاخصی با عنوان شاخص اهمیت تجمعی پل (CI<sub>B</sub>) ارائه نموده‌اند که با استفاده از آن می‌توان سبب بهینه پل‌ها برای تخصیص منبع را با در نظر گرفتن تغییرات اهمیت پل‌ها در دوره‌های مختلف توسعه انتخاب نمود (دزفولی نژاد و همکاران، ۱۳۹۹). در این مقاله، ضمن تمرکز بر پارامتر اهمیت پل (I) و با هدف ادامه و تکمیل تحقیق پیشین، شاخص اهمیت تجمعی (CI<sub>B</sub>)، جهت کاربرد در حوزه ارزیابی ریسک‌های امنیتی پل‌ها، توسعه داده می‌شود. شکل ۱، فرآیند محاسبه شاخص اهمیت تجمعی (CI<sub>B</sub>) در این مقاله را نمایش می‌دهد. در بخش دوم، مسأله مورد بررسی در این تحقیق بیان شده است. این بخش، با بیان مسأله تحقیق در قالب یک مثال فرضی آغاز شده و سپس به نحوه محاسبه شاخص اهمیت تجمعی (CI<sub>Intw</sub>) ختم می‌شود. در بخش سوم، مواد و روش‌های عملی به‌کار گرفته شده در محاسبه دوگروه اهمیت فردی و شبکه‌ای I<sub>Intw</sub> و I<sub>Ind</sub> مورد بحث قرار گرفته است. بخش چهارم نیز شامل یک مطالعه موردی بوده و سرانجام در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

به تغییر توپولوژی شبکه در آینده خواهد شد. اهمیت فردی پل‌ها به خصوصیات ذاتی پل وابسته بوده و با تغییر توپولوژی شبکه تغییر نمی‌کند. لذا، تغییرات ساختاری و توسعه شبکه در آینده، تغییری در I<sub>Ind</sub> ایجاد نخواهد کرد. اما ویژگی‌های شبکه‌ای یک پل (I<sub>Intw</sub>) در دوره‌های مختلف توسعه ثابت نبوده و با تغییر توپولوژی شبکه ناشی از اضافه شاخه‌های جدید (یا حذف شاخه‌های موجود)، I<sub>Intw</sub> پل‌ها تغییر خواهند کرد. این تغییرات سبب می‌شوند که اهمیت شبکه‌ای برخی پل‌ها، نسبت به شرایط اولیه‌ای که مبنای رتبه‌بندی پل برای تخصیص منبع بوده تغییر کند. این امکان وجود دارد که پل‌هایی که ابتدا از دیدگاه شبکه‌ای در رده پل‌های کم‌اهمیت فرض می‌شدند، طی روند تغییر و توسعه ساختار شبکه به پل‌های با اهمیتی تبدیل گردند و در مقابل، پل‌هایی که در شرایط فعلی در رده پل‌های با اهمیت قرار می‌گیرند، ممکن است در آینده اهمیت نسبی آن‌ها کاهش یابد.

باید دقت نمود که از یک سو به دلیل محدودیت منابع، اهداف برنامه‌های تخصیص منبع به پل‌ها برای کاهش ریسک‌های امنیتی معمولاً به صورت بلندمدت در نظر گرفته می‌شود و از سوی دیگر، پیش‌بینی دقیق موعد زمانی وقوع رویدادهای مخرب، به ویژه تهدیدات انسان‌ساز مثل حملات خرابکارانه، امکان‌پذیر نیست و نمی‌توان اطمینان داشت که رویداد مخرب در وضعیت فعلی شبکه رخ می‌دهد یا در شرایط توسعه‌یافته آن. با توجه به این که اهمیت پل‌ها متأثر از ویژگی‌های شبکه‌ای

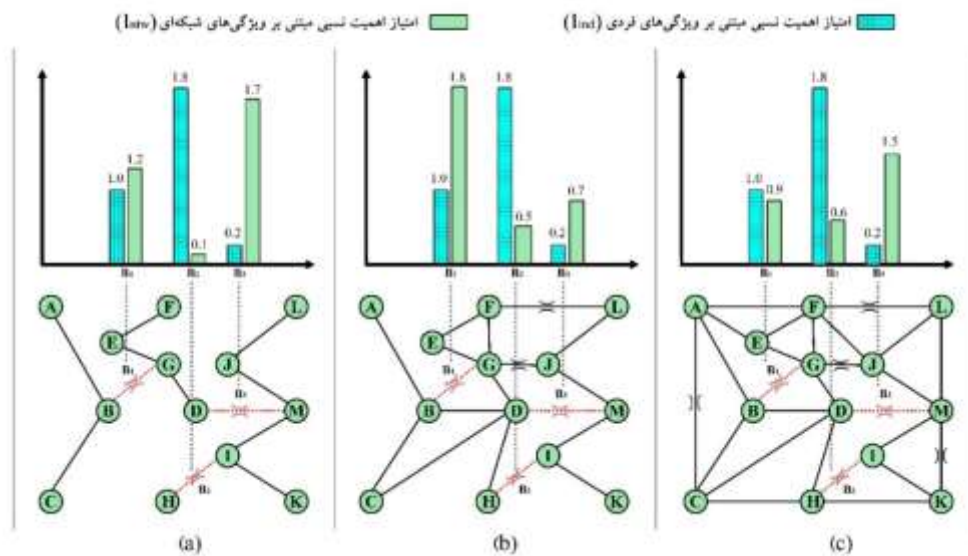


شکل ۱. فرآیند محاسبه شاخص اهمیت تجمعی

## ۲. بیان مسأله

شکل ۲، نمایش دهنده یک شبکه حمل و نقل فرضی بوده که دارای یک برنامه توسعه بلندمدت دو مرحله‌ای طی دو افق زمانی می‌باشد. شکل‌های (a)، (b) و (c) به ترتیب نمایش دهنده وضعیت فعلی شبکه و وضعیت‌های توسعه‌یافته آن طی افق‌های زمانی اول و دوم می‌باشند.

این شبکه دارای سه پل با کدهای  $B_1$ ،  $B_2$ ،  $B_3$  روی شاخه‌های  $B-G$ ،  $H-I$  و  $D-M$  بوده که بر مبنای الزامات ناکافی طراحی شده و در برابر سناریوی تهدید مورد بررسی آسیب‌پذیر هستند. مالکان شبکه قصد دارند از طریق تخصیص منابع مالی، قابلیت اطمینان آن‌ها را در برابر حملات خرابکارانه احتمالی افزایش داده و تبعات ناشی از شکست آن‌ها را به حداقل برسانند.



شکل ۲. شبکه حمل و نقل فرضی دارای سه پل آسیب‌پذیر با کدهای  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  و نمودار میله‌ای مقایسه امتیاز اهمیت مبتنی بر ویژگی‌های فردی و ویژگی‌های شبکه‌ای: (a) وضعیت فعلی شبکه، (b) شبکه توسعه‌یافته در افق اول و (c) شبکه توسعه‌یافته در افق دوم

مبتنی بر ویژگی‌های فردی ( $I_{ind}$ ) و امتیاز اهمیت نسبی مبتنی بر ویژگی‌های شبکه‌ای ( $I_{intw}$ ) را برای پل‌های  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  در دوره‌های مختلف توسعه نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در صورتی که مالکان شبکه در انتخاب پل برای تخصیص منبع صرفاً بر ویژگی‌ها فردی پل تمرکز کنند، پل  $B_2$  بهترین انتخاب خواهد بود. زیرا این پل بر اساس یک سری ویژگی‌های فردی مثل، دهانه بزرگتر، هزینه و زمان بازسازی بیشتر، ارزش نمادین و مانند این‌ها بیشترین امتیاز  $I_{ind}$  را کسب کرده است. اما از دیدگاه شبکه‌ای، با اهمیت‌ترین پل در دوره‌های مختلف متفاوت می‌باشد. پل  $B_3$  در وضعیت اولیه شبکه با اهمیت‌ترین پل از دیدگاه شبکه‌ای است. اما در دوره بعدی توسعه شبکه، اهمیت آن کاهش و سپس در دوره بعد دوباره افزایش می‌یابد. به منظور در نظر گرفتن تغییرات اهمیت شبکه‌ای پل‌ها در دوره‌های مختلف توسعه، در این مقاله، از شاخص اهمیت تجمعی پل ( $CI_{intw}$ ) (رابطه ۳) استفاده می‌شود (دزفولی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۱).

با توجه به این که پیش‌بینی دقیق موعد زمانی حملات خرابکارانه امکان‌پذیر نمی‌باشد، در تمامی دوره‌های توسعه این احتمال وجود دارد که هر یک از این سه پل مورد مورد حمله قرار بگیرد. اما صرف‌نظر از پیش‌بینی دوره وقوع حمله، به‌طور منطقی فرض می‌شود که خرابکاران همواره به با اهمیت‌ترین پل شبکه حمله خواهند کرد.

با توجه به محدودیت منابع مالی، در این مثال مالکان فقط امکان تخصیص منبع به یک پل را دارند. اگر حمله به پلی که منابع به آن تخصیص داده شده صورت گیرد، پل سالم می‌ماند و در غیر این صورت به طور کامل متوقف می‌شود. بنابراین، مالکان شبکه می‌بایست به‌طور منطقی از با اهمیت‌ترین پل شبکه محافظت کنند. همچنین، فرض می‌شود اگر طی برنامه توسعه پل‌های جدیدی به شبکه اضافه شود، به دلیل اینکه مطابق الزامات جدید طراحی شده‌اند، جزو پل‌های در معرض ریسک قرار نمی‌گیرند.

نمودار میله‌ای بالای هر شکل، امتیاز اهمیت نسبی



نظر گرفته شده برای ضریب فوریت در جدول ۳ ارائه شده است.  $I_{ntw}^d$  بیانگر اهمیت شبکه‌ای پل (b) در دوره (d) می‌باشد. نویسندگان این مقاله در تحقیق پیشین برای محاسبه اهمیت شبکه‌ای  $I_{ntw}^d$  فقط از شاخص میانگین وزنی تعداد مسیرهای مستقل و قابل اطمینان (WIPW)<sup>۱</sup> استفاده کرده بودند. اما در این مقاله، با هدف توسعه و تکمیل تحقیق پیشین و تمرکز بر پارامتر اهمیت پل (I) در حوزه ارزیابی ریسک‌های امنیتی پل‌ها، از یک شاخص ترکیبی جدید برای محاسبه  $I_{ntw}^d$  استفاده می‌شود. در ادامه، نحوه محاسبه این شاخص بیان می‌شود.

$$CI_{ntw}(\varphi) = \sum_{d=1}^n \left( x_b^d \cdot I_{ntw}^d \cdot \frac{1}{(1+\varphi)^d} \right) \quad (3)$$

که، d و n به ترتیب شماره و تعداد دوره‌های توسعه مورد بررسی و  $x_b^d$  متغیر باینری برای پل‌های انتخاب شده برای تخصیص منبع در دوره‌های مختلف انتخاب شده می‌باشند. مقدار  $x_b^d$  در صورتی که پل (b) در دوره (d) جزو پل‌های با اهمیت بوده و برای تخصیص منبع انتخاب شود، برای آن دوره برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین، در این رابطه، ضریب فوریت ( $\varphi$ ) در نظر گرفته شده است. مقادیر در

جدول ۳. مقادیر ضریب فوریت (دزفولی نژاد و همکاران، ۲۰۲۱)

$\varphi$	سطح فوریت	سطح تنش (محتمل‌ترین دوره وقوع حملات خرابکارانه)
*	اضطراب	در وضعیت فعلی شبکه
۰/۰۵	زیاد	در کوتاه‌مدت (۱ سال)
۰	متوسط	در میان‌مدت (۵ سال)
- ۰/۰۵	کم	در بلندمدت (۱۰ سال)
**	بدون فوریت	پس از تکمیل برنامه توسعه شبکه

\* در شرایط اضطراری، پل‌های با اهمیت در وضعیت فعلی شبکه انتخاب می‌شوند.

\*\* در شرایط بدون فوریت پل‌های با اهمیت در آخرین دوره، انتخاب می‌شوند.

ضرورت داشته باشد، اهمیت نسبی پل‌ها بر اساس رابطه (۵) تعیین می‌شود. در این رابطه،  $I_{ind}$  شاخص امتیاز نسبی اهمیت فردی و  $CI_{ntw}$  شاخص اهمیت تجمعی یک پل می‌باشند.

### ۳-۱. شاخص اهمیت مبتنی بر خصوصیات فردی

با توجه به تمرکز این مقاله بر ریسک‌های امنیتی، در جدول ۴، معیارهای ارائه شده در تحقیقات متمرکز بر این حوزه برای محاسبه پارامتر اهمیت پل‌ها ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که اکثر معیارها بر خصوصیات فردی پل‌های تمرکز داشته و خصوصیات شبکه‌ای کمتر در

### ۳. شاخص اهمیت (I)

برای سنجش و مقایسه اهمیت نسبی پل‌ها (I) هر دو گروه ویژگی‌های ذاتی و شبکه‌ای پل‌های مورد مقایسه به نسبت مساوی (روابط ۴ و ۵) مورد توجه قرار می‌گیرند.

$$I = I_{ind} + I_{ntw} \quad (4)$$

$$I(\varphi) = I_{ind} + CI_{ntw}(\varphi) \quad (5)$$

اگر در رتبه‌بندی پل‌ها برای تخصیص منبع، به تغییرات اهمیت پل‌ها ناشی از توسعه شبکه در آینده توجه نشود، اهمیت نسبی پل‌ها (I) از رابطه (۴) تعیین می‌شود. اما در صورتی که اهداف تخصیص منبع بلندمدت بوده و توجه به تغییرات شبکه در آینده

<sup>1</sup> - Weighted independent pathways

حوزه ریسک‌های امنیتی مورد توجه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که جزییات روش‌های محاسبه خصوصیات فردی پل در این مقاله مورد بررسی قرار نمی‌گیرد و فرض می‌شود که شاخص اهمیت مبتنی بر خصوصیات فردی ( $I_{ind}$ ) با استفاده از رویکردهای ارائه شده در سایر تحقیقات (جدول ۴) محاسبه شده و مقدار آن برای پل‌ها در اختیار است. لذا، در ادامه، صرفاً توضیحات مرتبط با شاخص‌های ( $I_{intw}$ ) و نحوه محاسبه آن‌ها ارائه می‌شود.

جدول ۴. سنجش پارامتر اهمیت پل

محققین	معیارهای اجتماعی - اقتصادی مؤثر در اهمیت پل (I)
آشتو (۲۰۰۲)	میزان تلفات جانی، اهمیت زیست محیطی، هزینه بازسازی مجدد، زمان بازسازی مجدد، اهمیت نظامی، وجود یا عدم وجود جایگزین، اهمیت اجتماعی، اهمیت اقتصادی، اهمیت نمادین، کارکرد خدمات اضطراری
اداره ترابری نگزاس (۲۰۰۲)	اهمیت تجاری (ترافیک سنگین)، اهمیت کاربری روزانه (ترافیک سبک و طول مسیر جایگزین)، اهمیت مسیر جاده‌ای متقاطع (ترافیک مسیر متقاطع و بین ایالتی بودن)، اهمیت مسیر دریای متقاطع (در صورت وجود)، اهمیت بین المللی (مسیرهای مرزی)، اهمیت نظامی (مسیرهای استراتژیک)، اهمیت بازسازی (پیچیدگی سازه و بزرگی طول دهانه)
اداره بزرگراه‌های ایالتی آمریکا (۲۰۰۳)	ارزش تاریخی و نمادین، هزینه بازسازی (احتمال آسیب)، اهمیت از جهت مسیر تخلیه اضطراری، اهمیت اقتصادی منطقه‌ای، اهمیت بر حمل و نقل منطقه‌ای، نرخ درآمد سالانه (هزینه‌های توقف)، (اهمیت برای مراکز متصل و وابسته به پل)، اهمیت نظامی، میزان جمعیت در معرض آسیب به پل
لئونگ (۲۰۰۴)	اهمیت ملی پل، اهمیت منطقه‌ای / محلی پل، اهمیت اقتصادی، اهمیت امنیتی، اهمیت ایمنی، مسیر بزرگراهی، مسیر استراتژیک، مسیر تأمین انرژی، مسیر عبور نیروی نظامی، مسیر ترابری سنگین، مسیر حمل مصالح پر خطر، مسیر تخلیه اضطراری، میران ترافیک عبوری، اهمیت مراکز پیشبینی شونده.
ری (۲۰۰۷)	اهمیت سازه‌ای، اهمیت تاریخی/نمادین، هزینه بازسازی در صورت تخریب، زمان بازسازی در صورت تخریب، طول بزرگترین دهانه
والثو (۲۰۱۲)	میزان ترافیک عبوری، طول بزرگترین دهانه، اهمیت از جهت مسیر تخلیه اضطراری، ارزش تاریخی و نمادین، وجود تأسیسات صنعتی و شیمیایی در نزدیکی، نزدیکی به مراکز مهم
دوخاژک و اسکوروپکا (۲۰۱۳)	میزان ترافیک عبوری، طول دهانه اصلی (بزرگتر از ۳۰ متر)، جنس مصالح (فولادی، بتنی، چوبی و ...)، نوع سازه پل (کابلی، معلق و ...)، ارتفاع دسترسی به زیر پل، امنیت پل (دوری از نقاط شلوغ و مرکز شهر)
لی و همکاران (۲۰۱۵)	هزینه بازسازی در صورت تخریب، زمان بازسازی در صورت تخریب، اهمیت اجتماعی
دوخاژک و اسکوروپکا (۲۰۱۶)	میزان ترافیک عبوری، طول دهانه اصلی (بزرگتر از ۳۰ متر)، جنس مصالح (فولادی، بتنی، چوبی و ...)، نوع سازه پل (کابلی، معلق و ...)، ارتفاع دسترسی به زیر پل، امنیت پل (دوری از نقاط شلوغ و مرکز شهر)، تعداد خطوط عبوری از روی پل، تعداد ستون هم‌ردیف، وجود یا عدم وجود مسیر جایگزین
اداره بزرگراه‌های ایالتی آمریکا (۲۰۱۷)	اهمیت اقتصادی، اهمیت اجتماعی، اهمیت دفاعی - امنیتی (منطقه‌ای، ایالتی، ملی)، میزان ترافیک عبوری، فاصله تا نزدیک‌ترین مسیر جایگزین، اهمیت نمادین

### ۳-۲. شاخص اهمیت مبتنی بر خصوصیات

#### شبکه‌ای

جامعه به عنوان استفاده‌کنندگان از شبکه جهت فعالیت‌های روزمره شخصی و (۲) حاکمیت به عنوان استفاده‌کننده از شبکه جهت فعالیت‌های راهبردی و در شرایط ویژه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. اهمیت شبکه‌ای پل‌ها با استفاده از رابطه (۶) تعیین می‌شود. در این رابطه، ( $I_{sci}$ ) شاخص اهمیت از دید عموم جامعه و ( $I_{str}$ ) شاخص اهمیت پل از دید راهبردی می‌باشد. ضریب ( $\eta$ )

اهمیت شبکه‌ای پل ( $I_{intw}$ ) بیانگر آثار و تبعات شکست پل بر کاهش توانمندی شبکه برای خدمت رسانی می‌باشد. در این مقاله، آثار شبکه‌ای شکست پل از دیدگاه دو گروه استفاده‌کننده شبکه شامل: (۱) مردم عادی

(جیروان و نیومن، ۲۰۰۲).

$$I_{BCW}(b_i) = \sum_{i,j \in V} \frac{N_{SHP_{ij}}(b_i)}{N_{SHP_{ij}}} \quad (8)$$

شاخص ( $I_{EMG}$ ) تبعات اجتماعی ناشی از افزایش مسافت دسترسی به مراکز مهم برای عموم جامعه در شبکه (مانند مراکز درمانی، امداد رسانی، آتش نشانی) در اثر حذف پل بوده که با از دست رفتن زمان طلایی دسترسی به این مراکز، زندگی مردم جامعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (مرشمن و همکاران، ۲۰۲۰). شاخص‌های ( $I_{TTD}$ )<sup>۲</sup> و ( $I_{MTD}$ )<sup>۳</sup> نیز بیانگر مجموع افزایش مسافت سفر به دلیل شکست پل به ترتیب در تمامی کوتاه‌ترین مسیرها و در طولانی‌ترین کوتاه‌ترین مسیرها (قطر شبکه)، برای گره‌های شبکه می‌باشد (مرشمن و همکاران، ۲۰۲۰). این دو شاخص ( $I_{TTD}$ ) و ( $I_{MTD}$ ) میزان نارضایتی اجتماعی ناشی از طولانی‌تر شدن مسافت سفر و ایجاد اختلال در زندگی رومزه به دلیل شکست پل را به ترتیب در دو سطح محلی و سرتاسری شبکه منعکس می‌کنند. به منظور شناخت پل‌هایی که شکست آن‌ها تبعات اجتماعی گسترده‌تری را ایجاد می‌کند، پارامترهای مؤثر در محاسبه این شاخص‌ها در دو حالت قبل و بعد از حذف پل (روابط ۹، ۱۰ و ۱۱)، محاسبه می‌شوند.

$$I_{EMG}(b_i) = \sum_{j=1}^n L_{EMG}^{b_i} - \sum_{j=1}^n L_{EMG}^0 \quad (9)$$

$$I_{TTD}(b_i) = \sum_{j=1}^n L_{TTD}^{b_i} - \sum_{j=1}^n L_{TTD}^0 \quad (10)$$

$$I_{MTD}(b_i) = \sum_{j=1}^n L_{MTD}^{b_i} - \sum_{j=1}^n L_{MTD}^0 \quad (11)$$

در رابطه (۹)، ( $L_{EMG}^0$ ) و ( $L_{EMG}^{b_i}$ ) طول کوتاه‌ترین مسیر بین هر یک از گره‌های شبکه و نزدیک‌ترین گره حاوی مرکز حیاتی به ترتیب قبل و بعد از شکست پل ( $b_i$ )، در رابطه (۱۰)، ( $L_{TTD}^0$ ) و ( $L_{TTD}^{b_i}$ ) طول کوتاه‌ترین مسیر بین هر یک از گره‌های شبکه و سایر گره‌ها به

یک عد بین صفر و یک بوده که ارجحیت نسبی این دو شاخص را بیان می‌کند. مقادیر زیاد این ضریب سبب می‌شود که پل‌هایی که در زندگی روزمره مردم عادی مهم هستند در اولویت انتخاب برای تخصیص منبع قرار گیرند و در مقابل مقادیر کم این ضریب سبب می‌شود تا پل‌های مهم در برنامه‌های راهبردی حاکمیت، شانس بیشتری برای انتخاب داشته باشند.

$$I_{ntw} = \eta \cdot I_{scl} + (1 - \eta) \cdot I_{Str} \quad (6)$$

### ۳-۲-۱. اهمیت پل از دید عموم جامعه

پلی که شکست آن تبعات اجتماعی گسترده‌تری را ایجاد کند، از دیدگاه مهاجمان جذابیت بیشتری برای انتخاب به عنوان هدف را دارد. در این مقاله، برای محاسبه اهمیت پل از دید عموم جامعه از معیارهای زیر (رابطه ۷) استفاده می‌شود. برای محاسبه شاخص ( $I_{scl}$ ) ابتدا مقادیر شاخص‌های ( $I_{BCW}$ ،  $I_{EMG}$ ،  $I_{TTD}$ ،  $I_{MTD}$ ) محاسبه شده، سپس مقادیر این شاخص‌ها را به روش آنتروپی ترکیب نموده و ( $I_{scl}$ ) محاسبه می‌شود.

$$I_{scl} = f(I_{BCW}, I_{EMG}, I_{TTD}, I_{MTD}) \quad (7)$$

که شاخص ( $I_{BCW}$ ) برابر است با مرکزیت میانی<sup>۱</sup> شاخه‌ای که پل روی آن قرار دارد. استفاده‌کنندگان شبکه حمل و نقل به طور منطقی، کوتاه‌ترین مسیر ارتباطی بین گره‌های مبدأ و مقصد را انتخاب می‌کنند. پل‌هایی که مرکزیت میانی بزرگتری داشته باشند، تعداد بیشتری از کوتاه‌ترین مسیرهایی که توسط استفاده‌کنندگان از شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند به آن‌ها وابسته‌اند (گو و همکاران، ۲۰۱۷) و در صورت شکست این پل‌ها نارضایتی بیشتری بین عموم مردم ایجاد می‌شود. رابطه (۸)، نحوه محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد. در این رابطه،  $N_{SHP_{ij}}$  تعداد کل کوتاه‌ترین مسیرهای موجود بین دو گره  $i$ ،  $j$  و  $N_{SHP_{ij}}(b_i)$  تعداد کوتاه‌ترین مسیرهای بین این دو گره که دارای پل ( $b_i$ ) می‌باشند

<sup>3</sup>- Maximum travel distance

<sup>1</sup>- Betweenness centrality

<sup>2</sup>- Total travel distance

حذف پل از شبکه. منظور از یک درخت پوشا، درختی است که شامل همه رئوس یک شکل بوده ولی فقط بعضی از شاخه‌های آن را در برگیرد. منظور از درخت پوشای کمینه درختی است که بین درخت‌های پوشای آن شکل، مجموع وزن شاخه‌های آن، کمترین مقدار ممکن باشد. برای به دست آوردن درخت پوشای بهینه یک شکل می‌توان از الگوریتم‌های متفاوتی استفاده نمود. چهار الگوریتم معروف پیدا کردن درخت پوشای کمینه عبارتند از: الگوریتم کروسکال، الگوریتم پریم، الگوریتم بروکا (سولین) و الگوریتم حذف معکوس. در هنگام جستجوی درخت پوشای کمینه، اگر طول شاخه به عنوان وزن شاخه‌های شکل مورد بررسی در نظر گرفته شود، درخت حاصل عبارت است از کوتاه‌ترین شبکه فراگیر و متصل‌کننده تمام گره‌های شبکه (شاهین و جعفری، ۲۰۱۵). حفظ چنین شبکه‌ای برای ایجاد دسترسی سریع به تمام گره‌ها از نظر لجستیک برای حاکمیت مهم است (شنگ، ۲۰۰۹). حذف برخی از پل‌های شبکه باعث می‌شود که درختی با مجموع وزن شاخه‌های بزرگتر به عنوان درخت پوشای کمینه انتخاب شود. لذا، از دیدگاه این معیار، هر پلی که میزان افزایش مجموع طول شاخه‌های درخت پوشای کمینه در اثر حذف آن بزرگتر شود به عنوان پل با اهمیت‌تر در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه این شاخص از رابطه (۱۳) استفاده می‌شود. در این رابطه،  $(MST^0)$  و  $(MST^{b_i})$  به ترتیب برابرند با مجموع طول شاخه‌های درخت پوشای کمینه قبل و بعد از حذف شاخه  $(b_i)$ .

$$I_{MST}(b_i) = MST^{b_i} - MST^0 \quad (13)$$

در خصوص پل‌هایی که به دلیل نداشتن مسیر جایگزین، در اثر حذف شاخه حاوی آنها، اتصال برخی از گره‌ها به طور کامل قطع شده و درخت پوشا کمینه به دو درخت پوشا مجزا تفکیک می‌شود، دو برابر طول

ترتیب قبل و بعد از شکست پل  $(b_i)$  و در رابطه (۱۱)،  $(L_{MTD}^0)$  و  $(L_{MTD}^{b_i})$  طول طولانی‌ترین کوتاه‌ترین مسیر بین هر یک از گره‌های شبکه و سایر گره‌ها به ترتیب قبل و بعد از شکست پل  $(b_i)$  می‌باشند.

### ۲-۲-۳. اهمیت پل از دید حاکمیت

پل‌هایی که شکست آن‌ها موجب اختلال در عملکرد برنامه‌های راهبردی حاکمیت شده و توانمندی‌های راهبردی حاکمیت را تضعیف کند، از دیدگاه مهاجمان جذابیت بیشتری دارند. در این مقاله اهمیت پل از دید حاکمیت بر مبنای معیارهای رابطه (۱۲) تعیین می‌شود. برای محاسبه شاخص  $(I_{Str})$  ابتدا مقادیر شاخص‌های  $(I_{EER}, I_{MLT}, I_{MST}, I_{IPW})$  با استفاده از روابط ارائه شده محاسبه کرده، سپس مقادیر این شاخص‌ها را به روش آنتروپی ترکیب نموده و  $(I_{Str})$  را محاسبه می‌کنیم.

$$I_{Str} = f(I_{EER}, I_{MLT}, I_{MST}, I_{IPW}) \quad (12)$$

در رابطه فوق، شاخص‌های  $(I_{EER})$  و  $(I_{MLT})$  به ترتیب عبارتند از امتیاز فرارگیری پل روی مسیرهای پیش‌بینی شده برای تخلیه اضطراری شهر و مسیرهای پیش‌بینی شده در شرایط عملیات نظامی. شبکه تخلیه اضطراری اغلب دارای سه سطح مسیر شامل بزرگراه اصلی تخلیه، مسیرهای جمع‌آوری اصلی و مسیرهای جمع‌آوری ثانویه می‌باشند. در صورت فرارگیری یک پل روی هر یک از این سه سطح مسیر و یا سایر مسیرها، مقدار شاخص  $(I_{EER})$  برای آن پل به ترتیب برابر ۱۰، ۵، ۳ و ۱ در نظر گرفته می‌شود. همچنین، در صورت فرارگیری یک پل روی یک مسیر دارای کاربرد نظامی در سطح ملی، منطقه‌ای، محلی و یا سایر مسیرها، مقدار شاخص  $(I_{MLT})$  برای آن پل به ترتیب برابر ۱۰، ۵، ۳ و ۱ در نظر گرفته می‌شود.

شاخص  $(I_{MST})$  برابر است با میزان افزایش مجموع طول شاخه‌های درخت پوشای کمینه  $(MST)$  در اثر

<sup>3</sup> - Minimum spanning tree

<sup>1</sup> - Emergency evacuation route

<sup>2</sup> - Military

چند شاخص هدف با یکدیگر می‌باشد (گو و همکاران، ۲۰۱۷). مطابق این روش، ابتدا برای کل شبکه یک ماتریس شاخص‌های مؤثر بر اهمیت ساخته می‌شود،  $(r = [\tilde{r}_{ij}]_{m,n})$  که در آن  $m$  تعداد شاخص‌های مؤثر بر اهمیت و  $n$  تعداد کل پل‌های مورد مقایسه در شبکه می‌باشد. چون افزایش تمامی شاخص‌های مورد بررسی در این مقاله باعث افزایش اهمیت پل می‌شود، برای ترکیب آن‌ها، ابتدا با استفاده از رابطه (۱۵) به صورت پارامترهای بدون بعد استانداردسازی می‌شوند.

$$\tilde{r}_{ij} = r_{ij} - \min(r_{ij}) / \max(r_{ij}) - \min(r_{ij}) \quad (15)$$

$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$   
 که  $r_{ij}$  برابر است با مقدار شاخص  $i$ ام در پل  $j$ ام، نسبت شاخص‌های مؤثر بر اهمیت طبق رابطه  $(= P_{ij})$  نیز با  $(\tilde{r}_{ij} / \sum_{j=1}^n \tilde{r}_{ij})$  تعریف می‌شود و مقدار آنتروپی  $P_{ij}$  نیز با استفاده از رابطه  $(S_i = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}))$  محاسبه می‌شود (گو و همکاران، ۲۰۱۷). در این رابطه، در صورتی که مقدار  $P_{ij} = 0$  باشد،  $P_{ij} \ln(P_{ij}) = 0$  در نظر گرفته می‌شود (گو و همکاران، ۲۰۱۷). هر چه مقدار  $S_i$  کوچکتر باشد به این معناست که شاخص  $i$ ام از اهمیت نسبی کمتری برخوردار است. بنابراین وزن هر یک از شاخص‌های مؤثر بر اهمیت طبق رابطه  $(= \omega_i)$  قابل محاسبه است. از طرفی، وزن هر یک از شاخص‌های مؤثر بر اهمیت را بر اساس قضاوت تصمیم‌سازان و نیز  $\lambda_i$  باید در نظر گرفت. لذا، وزن نهایی هر شاخص مطابق رابطه  $(= \kappa_i)$   $(\kappa_i = \lambda_i \omega_i / m - \sum_{i=1}^m \lambda_i \omega_i)$  در نظر گرفته خواهد شد (گو و همکاران، ۲۰۱۷). لازم به ذکر است که در این مقاله، وزن تمامی شاخص‌های مؤثر بر اهمیت یکسان و برابر  $(= \lambda_i)$  0.25 در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، شاخص اهمیت پل در شبکه با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$I(j) = \frac{n \sum_{i=1}^m \kappa_i \tilde{r}_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \kappa_i \tilde{r}_{ij}} \quad (16)$$

شاخه حذف شده به مقدار  $MST^{b_i}$  افزوده می‌شود. زیرا فرض می‌شود برای ایجاد اتصال بین دو بخش مجزا شده درخت پوشا، یک مسیر دیگر که طول آن حداکثر دو برابر شاخه حذف شده است ایجاد شده است. در نظر گرفتن این فرض سبب افزایش نسبی اهمیت راهبردی پل‌های فاقد مسیر جایگزین می‌شود.

شاخص  $(IPW)$  در رابطه فوق برابر است با تبعات حذف از پل شبکه بر کاهش آمادگی شبکه برای مواجهه با سایر بحران‌هایی نظیر سیل یا زلزله که به‌طور همزمان کل شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، می‌باشد. در این مقاله، میزان آمادگی شبکه برای امدادسانی در شرایط بحرانی بر اساس تعداد مسیرهای مستقل آن سنجیده می‌شود (ژانگ و وانگ، ۲۰۱۶). هر چه تعداد مسیرهای مستقل یک شبکه بیشتر باشد، آمادگی شبکه برای مواجهه با رویدادهای مخرب بیشتر خواهد بود. برای محاسبه شاخص  $I_{IPW}(b_i)$  یکبار تعداد کل مسیرهای مستقل موجود در شبکه  $(IPW^0)$  مطابق فرآیند شمارش می‌شود. سپس شاخه حاوی پل  $(b_i)$  از شبکه حذف شده و مجدداً تعداد کل مسیرهای مستقل موجود در شبکه  $(IPW^{b_i})$  شمارش می‌شود. تعداد مسیرهای مستقل کاهش یافته در اثر حذف شاخه  $(b_i)$  از شبکه به عنوان اهمیت آن پل در شرایط بحران در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۱۴). لازم به ذکر است مسیرهای موجود بین یک جفت گره زمانی مستقل تلقی می‌شوند که هیچ شاخه مشترکی با یکدیگر نداشته باشند. مفهوم مسیرهای مستقل جزء شاخص‌های توپولوژیک متداول در نظریه گراف نبوده، بلکه یک مفهوم نوآورانه بوده و برای اولین بار توسط آی پی و وانگ (۲۰۱۱) ارائه شده است.

$$I_{IPW}(b_i) = IPW^0 - IPW^{b_i} \quad (14)$$

### ۳-۲-۳. روش آنتروپی

روش آنتروپی یک روش علمی و منطقی برای ترکیب

ساله اول (۱۴۰۰) و ۵ ساله دوم (۱۴۰۵) توسعه یافته تا در سال ۱۴۰۵، چشم‌اندازی مطابق شکل ۳ محقق گردد. شکل ۴-الف، مسیرها و پل‌های موجود در شبکه مبنا و مسیرها و پل‌هایی که طی برنامه‌های توسعه به این شبکه اضافه می‌شوند را با رنگ‌های مختلف نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که شبکه مبنا (رنگ سبز) در سال ۱۳۹۵ دارای ۷ پل درون شهری روی رودخانه کارون بوده که دو بخش شرقی و غربی شهر اهواز را به یکدیگر متصل می‌کنند (شکل ۴-ب). مطابق برنامه‌ریزی و اولویت‌بندی انجام شده توسط متولیان این شبکه، در افق ۵ سال اول، به منظور کاهش گره‌های ترافیک و روان‌سازی ترافیک مرکز شهر، بر توسعه توپولوژی نواحی مرکزی شبکه تمرکز شده (رنگ زرد) و سپس در افق ۵ سال دوم بر توسعه مسیر کمربندی و انتقال تردد کامیون‌ها و تریلرها به خارج از شهر پرداخته می‌شود (رنگ بنفش).

با توجه به این که در این مقاله در سنجش اهمیت هر دو شاخص  $I_{SCI}$  و  $I_{STR}$  چهار شاخص مختلف مورد استفاده هستند، رابطه فوق برای این شاخص‌ها به شکل زیر بازنویسی می‌شود (روابط ۱۷ و ۱۸).

$$I_{SC1}(h_i) = \frac{n \cdot (s_{1100} \cdot I_{SC1}(h_i) + s_{1000} \cdot I_{SC1}(h_i) + s_{1001} \cdot I_{SC1}(h_i) + s_{1002} \cdot I_{SC1}(h_i))}{\sum_{i=1}^n (I_{SC1}(h_i) + I_{SC1}(h_i) + I_{SC1}(h_i) + I_{SC1}(h_i))} \quad (17)$$

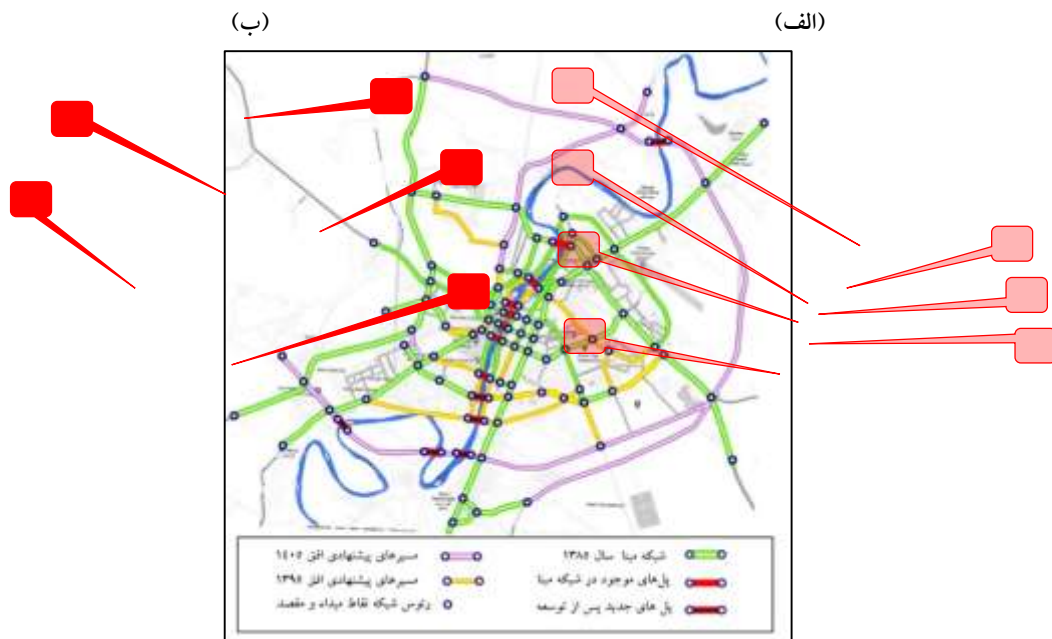
$$I_{STR}(h_i) = \frac{n \cdot (s_{1100} \cdot I_{STR}(h_i) + s_{1000} \cdot I_{STR}(h_i) + s_{1001} \cdot I_{STR}(h_i) + s_{1002} \cdot I_{STR}(h_i))}{\sum_{i=1}^n (I_{STR}(h_i) + I_{STR}(h_i) + I_{STR}(h_i) + I_{STR}(h_i))} \quad (18)$$

#### ۴. مطالعه موردی

در این بخش، جهت بیان نحوه استفاده از رویکرد ارائه شده، یک مطالعه موردی انجام شده است. در این مطالعه، توپولوژی توسعه نیافته شبکه حمل و نقل درون شهری اهواز در سال ۱۳۹۵ (آغاز برنامه توسعه) به عنوان شبکه مبنا در نظر گرفته می‌شود. مطابق سیاست‌گذاری انجام شده توسط مالکان و متولیان، توپولوژی این شبکه می‌بایست طی دو برنامه بلندمدت، در افق‌های زمانی ۵



شکل ۳. چشم‌انداز تعریف شده برای شبکه حمل و نقل درون شهری اهواز در سال ۱۴۰۵



شکل ۴. الف) شبکه مینا، مسیرها و پل‌های موجود و پیشنهادی طی افق‌های توسعه و ب) نمایی از پل‌های اهواز

در جدول ۵، برخی اطلاعات مربوط به ۷ پل موجود در شبکه مینا در سال ۱۳۹۵ ارائه شده است. همچنین، امتیاز نسبی اهمیت این پل‌ها مبتنی بر ویژگی‌های فردی (Ind)، مطابق روش ارائه شده در تحقیق دوخاژک و اسکوروپکا (۲۰۱۶) محاسبه شده و در ستون آخر این جدول اشاره شده است.

جدول ۵. اطلاعات پل‌های موجود در شبکه مبنا در سال ۱۳۹۵

کد	نام پل	سال ساخت	ترافیک	لرزش نمادین	نوع سازه	طول	عرض	دهانه اصلی	مسیر نظامی	مسیر تخریب	Ind
B <sub>1</sub>	پل شهید قزاقی (پل کیانیارس)	۱۳۴۹	H	-	تیر-دال	۴۹۶	۱۴/۵۰	۳۱	مقطعه‌ای	سطح ۲	۱/۰۷
B <sub>2</sub>	پل علی ابن مهزیار	۱۳۷۵	H	-	بالکسی-بتنی	۴۹۰	۱۶	۱۴۰	سایر	سطح ۳	۰/۸۴
B <sub>3</sub>	پل سفید (هلالی)	۱۳۱۵	L	✓	قوسی-فلزی	۵۰۲	۹/۸	۱۳۶	سایر	سایر	۱/۱۲
B <sub>4</sub>	پل نادری (سلمان فارسی)	۱۳۵۴	M	-	تیر-دال	۵۷۶	۱۶/۷۱	۴۱	سایر	سطح ۳	۰/۶۳
B <sub>5</sub>	پل غدیر (کابلی)	۱۳۸۵	M	✓	کابلی-بتنی	۱۰۱۴	۲۱/۷	۲۱۲	سایر	سایر	۱/۵۴
B <sub>6</sub>	پل شهید هاشمی (پل دانشگاه)	۱۳۷۵	M	-	تیر-دال	۴۸۰	۳۰/۷۰	۳۶	محلّی	سطح ۲	۰/۷۷
B <sub>7</sub>	پل صنایع فولاد	۱۳۸۳	M	-	تیر فولادی	۷۴۰	۳۰/۴۰	۷۵	مقطعه‌ای	سطح ۲	۱/۰۳

H سنگین، L سبک، M متوسط، مقادیر طول، عرض و دهانه اصلی پل به متر می‌باشند.

رویدادهای مخرب از جمله حملات خرابکارانه، ترسیم منحنی شکنندگی<sup>۱</sup> پیشنهاد شده است (یو و همکاران، ۲۰۱۸؛ کشتا، ۲۰۱۹؛ کیم و لی، ۲۰۲۰). جدول ۷، معیارهای شدت‌های<sup>۲</sup> مختلف مورد استفاده در ترسیم منحنی شکنندگی برخی رویدادهای مخرب را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که تمرکز این مقاله بر پارامتر اهمیت پل (I) بوده و پارامتر آسیب‌پذیری پل‌ها (V) در این مقاله مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. بنابراین، ترسیم منحنی شکنندگی جزء اهداف این مقاله نمی‌باشد. اما با توجه به این که در طراحی هیچکدام از این ۷ پل، الزامات و ملاحظات امنیتی پیش‌بینی نشده، تمامی این پل‌ها در برابر حملات خرابکارانه آسیب‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند و ضروری است قابلیت اطمینان این پل‌ها را در برابر حملات خرابکارانه احتمالی در آینده افزایش داد.

در این مطالعه، یک حمله خرابکارانه به عنوان رویداد مخرب در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که در تقسیم‌بندی انجام شده در تحقیقات مختلف، حملات خرابکارانه به پل‌ها دارای انواع شیوه‌های تهاجم 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)، بوده که رایج‌ترین آن‌ها شیوهی تهاجم انفجار با وسایل نقلیه از طریق زمینی (VBIED)<sup>۱</sup> است. این شیوه تهاجم نیز از طریق سناریوهای مختلفی پیاده‌سازی می‌شود که در جدول ۶ به برخی از آن‌ها اشاره شده است (فریزر و همکاران، ۲۰۰۹).

در تحقیقات مختلف برای تحلیل آسیب‌پذیری و تعیین قابلیت اطمینان پل‌ها در برابر انواع مختلف

<sup>3</sup>- Intensity measure (IM)

<sup>1</sup>- Vehicle-borne improvised explosive device

<sup>2</sup>- Fragility curve



جدول ۶. انواع شیوه تهاجم (VBIED) (فریزر و همکاران، ۲۰۰۹)

جرم مواد منفجره (kg معادل TNT)*	نوع وسیله نقلیه زمینی
۲۲۷	خودروی سواری کامپکت
۴۵۴	خودروی سواری سدان
۸۱۴/۱	ون مسافری
۵۳۶/۴	کامیون متوسط باربری درون شهری
۶۸۰/۱۳۰	کامیون بزرگ / تانکر حمل آب
۲۱۶/۲۷	کامیون کشنده / تریلر

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

جدول ۷. معیارهای مختلف شدت در ترسیم منحنی شکنندگی

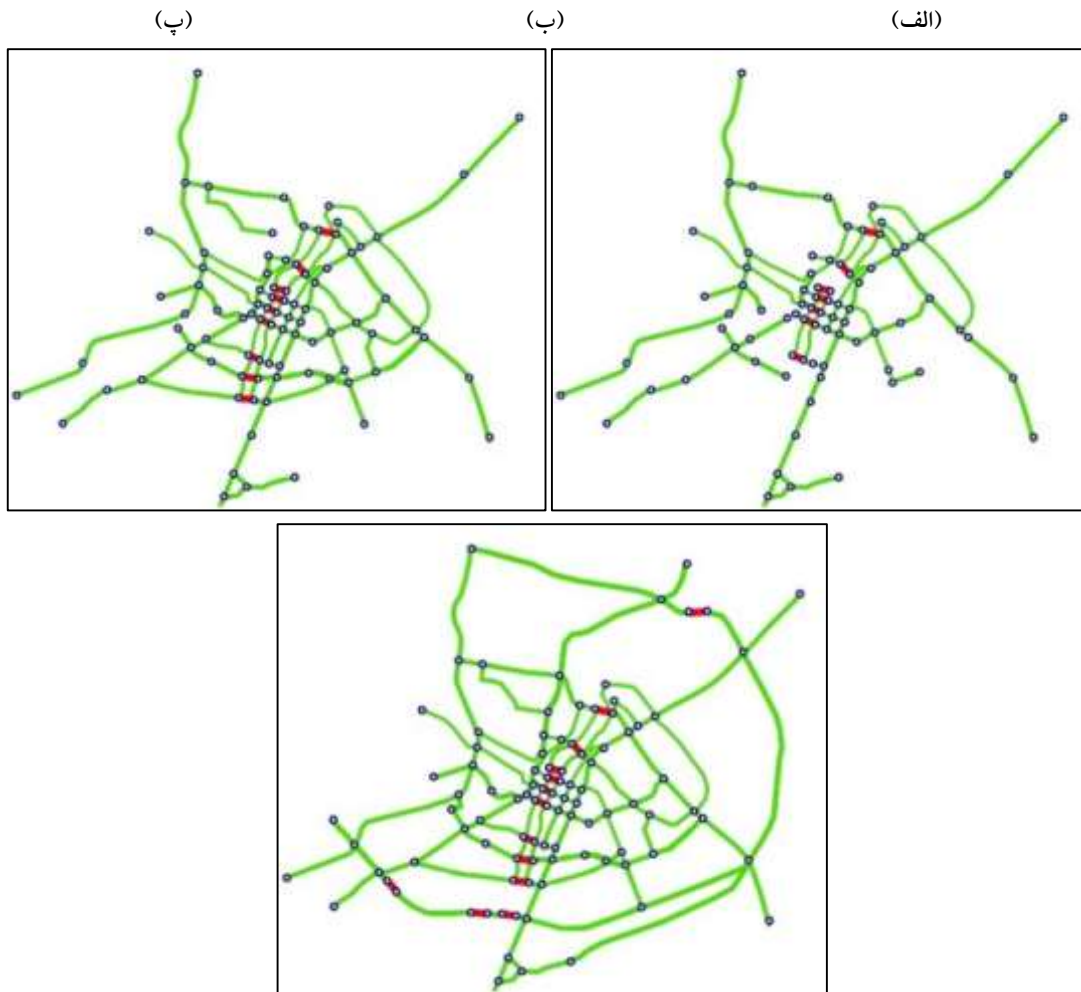
معیار شدت (IM)	تهدید مورد بررسی
حداکثر شتاب زمین	زلزله
ارتفاع موج	سیل
فاصله مقیاس شده	حمله خرابکارانه (انفجار)
سرعت کامیون	حمله خرابکارانه (برخورد کامیون)
دمای سازه	حمله خرابکارانه (آتش)

شبکه این احتمال وجود دارد که هر یک از این پلها مورد حمله قرار بگیرد. اما مهاجمان در هر دوره فقط پل های آسیب پذیر را به عنوان هدف انتخاب کرده و از بین آنها به با اهمیت ترین پل حمله خواهند کرد. با این استثناء که مهاجمان از حمله به پل های جدید و پل هایی که منابع مورد نیاز به آن تخصیص یافته باشد، منصرف می شوند. لذا، با اتخاذ رویکرد کمترین تبعات در برابر بدترین حالت ممکن<sup>۱</sup> (اصل کم پیشینه<sup>۲</sup> نظریه بازی ها) ابتدا می بایست پل های شبکه را بر اساس شاخص اهمیت رتبه بندی کرده و سپس ۴ پلی که جزو با اهمیت ترین پل ها قرار می گیرند را برای تخصیص منبع انتخاب نمود.

در این مطالعه موردی فرض می شود که با توجه به حداکثر بودجه در اختیار، فقط بهسازی چهار پل از بین هفت پل آسیب پذیر امکان پذیر است. از طرفی، مطابق برنامه ریزی صورت گرفته، طی دو برنامه توسعه تا سال ۱۴۰۵، شش پل جدید نیز به این شبکه اضافه می شود. اما این پل ها جدیدالاحداث بوده و مطابق الزامات امنیتی به روز طراحی خواهند شد. بنابراین، جزو پل های آسیب پذیر و نیازمند تخصیص منبع در نظر گرفته نمی شوند. شکل های ۵ (الف، ب و پ) به ترتیب نمایش دهنده وضعیت های فعلی و توسعه یافته آن طی افق های زمانی اول و دوم می باشند. موعد دقیق زمان وقوع تهدید مشخص نیست و در تمامی وضعیت های

<sup>2</sup> - Minimax

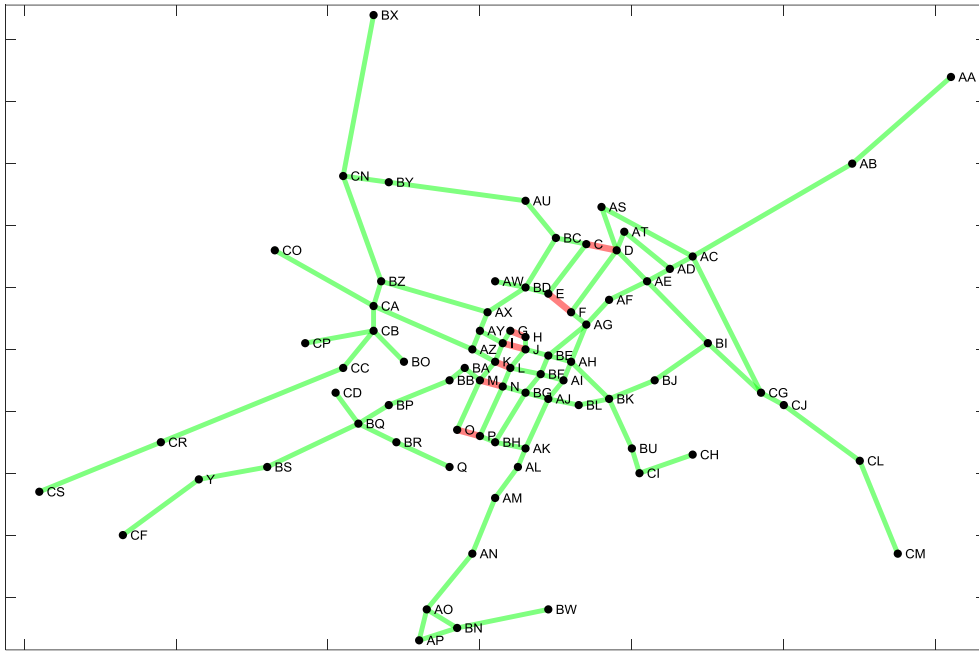
<sup>1</sup> - Worst-case scenario



شکل ۵. توپولوژی شبکه مبنا و تغییرات آن: الف) وضعیت مبنا سال ۱۳۹۵، ب) توسعه ۱۴۰۰ و پ) توسعه ۱۴۰۵

اروند، مهر، امیرالمومنین، امیرکبیر، طالقانی و بقایی می‌باشند. در جداول ۸ الی ۱۰ نیز نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های مؤثر بر اهمیت شبکه‌ای و اهمیت شبکه‌ای ( $I_{ntw}$ ) برای پل‌های مورد بررسی در این مطالعه موردی در وضعیت‌های مختلف شبکه ارائه شده است. نتایج مندرج در این جداول به خوبی نشان می‌دهد که شاخص‌های مبتنی بر ویژگی‌های شبکه‌ای در دوره‌های مختلف توسعه شبکه تغییر خواهند کرد.

برای انجام محاسبات مربوط به شاخص‌های مؤثر در محاسبه اهمیت شبکه‌ای از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. شکل ۶، مدل‌سازی شبکه مبنا به صورت یک شکل ترسیمی در نرم‌افزار MATLAB را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که در این مدل‌سازی، گره‌های CH, AX, AC, BC, BZ, AC, AO, M, G, AE, AG, Y, AK, AZ به عنوان گره‌های اضطراری و به ترتیب معرف بیمارستان‌ها و مراکز درمانی شهر اهواز با نام‌های امام خمینی، ابوذر، رازی، گلستان، سینا، نفت، آپادانا، آریا،



شکل ۶. مدل سازی شبکه مبنا به صورت یک گراف در نرم افزار MATLAB

شده برای تخصیص منبع با هر دو رویکرد انجام گرفته است.

با توجه به این که نتایج اشاره شده در جداول فوق با فرض احتمال وقوع تهدید در میان مدت و فوریت متوسط ( $\phi=0$ ) به دست آمده، به منظور بررسی تأثیر تغییر فوریت بر پل های انتخاب شده، شاخص اهمیت برای پل ها در فوریت های مختلف محاسبه و مقایسه شده است. در جدول ۱۴، به مقایسه نتایج پل های انتخاب شده در فوریت های مختلف پرداخته شده است.

برای بیان نحوه انتخاب ۴ پل با اهمیت از بین ۷ پل موجود و بررسی تأثیرات تغییرات شبکه بر این انتخاب، ابتدا یک بار بدون در نظر گرفتن تغییرات اهمیت پل ها در آینده، مقدار شاخص اهمیت برای هر ۷ پل آسیب پذیر محاسبه شده، سپس مجدداً با استفاده از شاخص تجمعی و با در نظر گرفتن تغییرات اهمیت پل ها در آینده، اولویت بندی پل ها انجام می شود. در جداول ۱۱ و ۱۲ نتایج محاسبه شاخص های اهمیت در شرایط به ترتیب بدون و با در نظر گرفتن تغییرات شبکه در آینده ارائه شده است. در جدول ۱۳، مقایسه ای بین پل های انتخاب

جدول ۸. اهمیت شبکه ای پل و مقادیر شاخص های مؤثر بر آن در سال ۱۳۹۵ برای  $\phi=0/0$

کد	شاخه	I <sub>EMG</sub>	I <sub>TTD</sub>	I <sub>MTD</sub>	I <sub>EEER</sub>	I <sub>MLT</sub>	I <sub>MST</sub>	I <sub>IPW</sub>	I <sub>scl</sub>	I <sub>Str</sub>	I <sub>ntw</sub>
B <sub>1</sub>	CD	۲۵۰/۱۵	۰/۰۰	۵۵۸/۳۳	۱/۹۹	۵/۰۰	۵/۰۰	۸۰/۰۰	۱/۱۴	۲/۰۵	۱/۵۹
B <sub>2</sub>	EF	۲۲۴/۷۰	۰/۵۰	۳۹۰/۴۷	۲/۴۳	۱/۰۰	۳/۰۰	۵۸/۰۰	۱/۰۲	۰/۵۲	۰/۷۷
B <sub>3</sub>	GH	۳۱/۱۶	۱/۲۶	۱۸/۹۷	۰/۰۴	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۰۸/۰۰	۰/۷۱	۰/۱۵	۰/۵۸
B <sub>4</sub>	IJ	۱۹۰/۴۲	۰/۰۰	۱۰۵/۷۲	۱/۲۹	۱/۰۰	۳/۰۰	۲۴/۰۰	۰/۳۵	۰/۶۸	۰/۵۲
B <sub>5</sub>	KL	۳۱۸/۱۴	۰/۰۹	۲۹۸/۹۹	۱۲/۱۹	۱/۰۰	۱/۰۰	۳۳/۰۰	۱/۶۴	۰/۱۲	۰/۸۸
B <sub>6</sub>	MN	۴۱۶/۱۱	۲/۲۵	۳۶۲/۱۲	۰/۷۷	۳/۰۰	۰/۰۹	۴۰/۰۰	۲/۰۴	۱/۰۱	۱/۵۲
B <sub>7</sub>	OP	۸۱/۰۲	۰/۰۰	۷۱/۵۷	۰/۰۱	۵/۰۰	۱/۰۸	۹۹/۰۰	۰/۱۰	۲/۱۸	۱/۱۴

جدول ۹. اهمیت شبکه‌ای پل و مقادیر شاخص‌های مؤثر بر آن در سال ۱۴۰۰ برای  $\eta=0/5$

کد	شاخه	$I_{BWC}$	$I_{EMG}$	$I_{TTD}$	$I_{MTD}$	$I_{EER}$	$I_{MLT}$	$I_{MST}$	$I_{IPW}$	$I_{scl}$	$I_{Str}$	$I_{ntw}$
B <sub>1</sub>	CD	۲۶۳/۶۰	۰/۰۰	۲۷۹۹/۱۰	۲۱/۵۵	۵/۰۰	۵/۰۰	۴/۸۲	۸۸/۰۰	۱/۱۶	۲/۲۷	۱/۷۲
B <sub>2</sub>	EF	۲۹۵/۸۵	۰/۷۴	۱۸۰۸/۳۰	۸/۰۵	۱/۰۰	۳/۰۰	۲/۰۸	۶۹/۰۰	۰/۸۶	۰/۵۹	۰/۷۲
B <sub>3</sub>	GH	۵۳/۲۱	۶/۳۲	۱۵۸/۵۰	۰/۲۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۲	۱۰۱/۰۰	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹
B <sub>4</sub>	IJ	۱۸۷/۷۱	۰/۰۰	۴۷۲/۳۴	۱/۱۵	۱/۰۰	۳/۰۰	۶/۳۲	۵۳/۰۰	۰/۲۳	۰/۶۷	۰/۴۵
B <sub>5</sub>	KL	۳۳۱/۱۹	۰/۴۷	۶۱۳/۵۸	۱۴/۴۱	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۳۷	۵۴/۰۰	۰/۵۵	۰/۰۹	۰/۳۲
B <sub>6</sub>	MN	۱۷۴/۹۸	۱۱/۲۷	۲۰۸۵/۷۸	۸۸/۹۳	۳/۰۰	۳/۰۰	۰/۴۵	۵۳/۰۰	۳/۲۳	۰/۹۰	۲/۰۶
B <sub>7</sub>	OP	۱۹۱/۱۷	۰/۰۰	۳۲۰/۷۸	۰/۰۵	۵/۰۰	۵/۰۰	۲/۹۲	۶۱/۰۰	۰/۱۸	۱/۷۰	۰/۹۴

جدول ۱۰. اهمیت شبکه‌ای پل و مقادیر شاخص‌های مؤثر بر آن در سال ۱۴۰۵ برای  $\eta=0/5$

کد	شاخه	$I_{BWC}$	$I_{EMG}$	$I_{TTD}$	$I_{MTD}$	$I_{EER}$	$I_{MLT}$	$I_{MST}$	$I_{IPW}$	$I_{scl}$	$I_{Str}$	$I_{ntw}$
B <sub>1</sub>	CD	۲۳۰/۳۶	۰/۰۰	۲۰۵۷/۷۴	۱/۰۸	۵/۰۰	۵/۰۰	۴/۴۲	۶۷/۰۰	۰/۷۲	۱/۶۳	۱/۱۷
B <sub>2</sub>	EF	۲۷۳/۲۵	۰/۷۴	۲۲۲۴/۰۰	۲۲/۸۲	۱/۰۰	۳/۰۰	۲/۰۸	۶۷/۰۰	۱/۵۱	۰/۳۲	۰/۹۲
B <sub>3</sub>	GH	۵۴/۵۲	۶/۳۲	۱۶۴/۴۲	۱/۱۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۲	۱۳۱/۰۰	۰/۸۰	۱/۸۳	۱/۳۲
B <sub>4</sub>	IJ	۱۷۲/۰۹	۰/۰۰	۴۸۸/۴۲	۸/۷۰	۱/۰۰	۳/۰۰	۶/۳۲	۶۷/۰۰	۰/۴۶	۰/۶۴	۰/۵۵
B <sub>5</sub>	KL	۲۱۲/۶۳	۰/۴۷	۶۹۱/۳۴	۱۷/۱۳	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۳۷	۶۷/۰۰	۰/۸۵	۰/۰۷	۰/۴۶
B <sub>6</sub>	MN	۱۶۶/۷۴	۱۱/۲۷	۱۹۰۲/۵۰	۱۷/۴۴	۳/۰۰	۳/۰۰	۰/۴۵	۶۷/۰۰	۲/۴۵	۰/۸۷	۱/۶۶
B <sub>7</sub>	OP	۱۷۲/۳۱	۰/۰۰	۴۳۶/۱۸	۰/۰۵	۵/۰۰	۵/۰۰	۲/۹۲	۷۱/۰۰	۰/۲۰	۱/۶۳	۰/۹۲

جدول ۱۱. پل‌های انتخاب شده بدون در گرفتن تغییرات شبکه مبنا در آینده برای  $\eta=0/5$

$I(G_{1395})=I_{ind}+ I_{ntw} (G_{1395})$	$I_{ntw} (G_{1385})$	$I_{ind}$	Bi
۲/۶۶۰	۱/۵۹	۱/۰۷۰	B <sub>1</sub>
۱/۶۱۰	۰/۷۷	۰/۸۴۰	B <sub>2</sub>
۱/۷۰۰	۰/۵۸	۱/۱۲۰	B <sub>3</sub>
۱/۱۵۰	۰/۵۲	۰/۶۳۰	B <sub>4</sub>
۲/۴۲۰	۰/۸۸	۱/۵۴۰	B <sub>5</sub>
۲/۲۹۰	۱/۵۲	۰/۷۷۰	B <sub>6</sub>
۲/۱۷۰	۱/۱۴	۱/۰۳۰	B <sub>7</sub>

جدول ۱۲. پل‌های انتخاب شده با در گرفتن تغییرات شبکه مبنا در آینده برای  $\eta=0/5$  و  $\varphi=0$

$I(\varphi=0) = I_{ind} + CI_{ntw}(\varphi=0)$	$CI_{ntw}(\varphi=0)$	$X_b^d$			$I_{ntw}$			$I_{ind}$	$b_i$
		(d=3)	(d=2)	(d=1)	$G_{1405}$	$G_{1395}$	$G_{1385}$		
0/55	1/48	1	1	1	1/17	1/72	1/59	1/070	B <sub>1</sub>
1/76	0/92	1	0	0	0/92	0/72	0/77	0/840	B <sub>2</sub>
3/23	2/11	1	1	0	1/32	0/79	0/58	1/120	B <sub>3</sub>
0/63	0/00	0	0	0	0/55	0/45	0/52	0/630	B <sub>4</sub>
2/42	0/88	0	0	1	0/46	0/32	0/88	1/540	B <sub>5</sub>
701	5/24	1	1	1	1/66	2/06	1/52	0/770	B <sub>6</sub>
1/03	3/00	1	1	1	0/92	0/94	1/14	1/030	B <sub>7</sub>

جدول ۱۳. مقایسه نتایج رویکردهای مختلف تصمیم‌گیری در انتخاب پل‌ها

پل‌های انتخاب شده	مبنای تصمیم‌گیری
B <sub>1</sub> , B <sub>5</sub> , B <sub>6</sub> , B <sub>7</sub>	بدون در نظر گرفتن تغییرات در آینده بر مبنای $I(G_{1395})=I_{ind} + I_{ntw}(G_{1395})$
B <sub>1</sub> , B <sub>3</sub> , B <sub>6</sub> , B <sub>7</sub>	با در نظر گرفتن تغییرات در آینده بر مبنای $I(\varphi=0)=I_{ind} + CI_{ntw}(\varphi=0)$

جدول ۱۴. مقایسه پل‌های انتخاب شده در فوریت‌های مختلف

$I = (I_{ind} + CI_{ntw})$			$CI_{ntw}$			$b_i$
$=0/05\varphi$	$=0\varphi$	$-0/05\varphi$	$=0/05\varphi$	$=0\varphi$	$-0/05\varphi$	
5/155	5/55	6/014	4/085	4/48	4/944	B <sub>1</sub>
1/635	1/76	1/913	0/795	0/92	1/073	B <sub>2</sub>
2/977	3/23	3/535	1/857	2/11	2/415	B <sub>3</sub>
0/630	0/63	0/630	0/000	0/00	0/000	B <sub>4</sub>
2/378	2/42	2/466	0/838	0/88	0/926	B <sub>5</sub>
5/520	6/01	6/589	4/750	5/24	5/819	B <sub>6</sub>
3/763	4/03	4/345	2/733	3/00	3/315	B <sub>7</sub>

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، از بین پارامترهای مؤثر در ارزیابی ریسک‌های امنیتی پل‌ها، پارامتر اهمیت پل (I) و تغییرات آن در بلندمدت به دلیل عدم قطعیت در توپولوژی شبکه بررسی شده است. برای سنجش و مقایسه‌ی اهمیت نسبی پل‌ها (I) دو گروه شاخص‌های اهمیت فردی و اهمیت شبکه‌ای پل‌ها مورد توجه قرار گرفتند. اهمیت شبکه‌ای پل‌ها از دیدگاه دو گروه استفاده‌کننده شبکه شامل: (۱) مردم عادی جامعه به عنوان استفاده‌کنندگان از شبکه جهت فعالیت‌های روزمره شخصی و (۲) حاکمیت به عنوان استفاده‌کننده از شبکه جهت فعالیت‌های راهبردی و در شرایط ویژه، مورد بررسی قرار گرفت. اهمیت از دید مردم عادی بر مبنای چهار شاخص اهمیت استفاده رومزه، اهمیت در خدمت‌رسانی درمانی، اهمیت در زمان سفرهای محلی و اهمیت در زمان سفرهای سرتاسری شبکه مورد سنجش قرار گرفت. اهمیت از دید حاکمیت نیز بر مبنای چهار شاخص اهمیت در قرارگیری در مسیر تخلیه، قرارگیری در میسر نظامی، قرارگیری در مسیر امداد رسانی و در نهایت اهمیت پل از نظر تاب‌آوری شبکه، محاسبه گردید. برای ترکیب این شاخص‌ها از روش آنتروپی استفاده شد.

جهت بیان تفاوت تصمیم‌گیری برای حفاظت در شرایط محدودیت منابع، دو رویکرد انتخاب پل‌های حیاتی: الف) بدون در نظر گرفتن تغییرات اهمیت شبکه‌ای پل‌ها در آینده و ب) با در نظر گرفتن تغییرات اهمیت شبکه‌ای پل‌ها در آینده، در قالب یک مطالعه موردی، مقایسه شدند. مسأله مورد بررسی در این مطالعه شناسایی ۴ پل حیاتی از بین ۷ پل موجود در شبکه با توجه به محدودیت بودجه در اختیار، برای تخصیص منبع و محافظت در برابر حملات خرابکارانه بود. در این مطالعه موردی، شبکه حمل و نقل درون شهری اهواز مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه رویکردهای الف و ب در انتخاب پل‌های حیاتی نشان داد که در نظر گرفتن تغییرات اهمیت شبکه‌ای پل‌ها

در آینده سبب تغییر در سبب پل‌های انتخاب شده خواهد شد. به عنوان نمونه پل B3 که در وضعیت اولیه شبکه جزو پل‌های با اهمیت نبود، طی روند توسعه جزو پل‌های با اهمیت قرار گرفت. در مقابل، پل B5 در ابتدا دارای اهمیت نسبی بالایی بود. اما طی روند توسعه اهمیت نسبی آن کاهش یافته و از سبب پل‌های حیاتی خارج شد. همچنین، ملاحظه شد که شماری از پل‌ها مانند B1، B6 و B7 همواره با اهمیت هستند و در هیچ دوره‌ای از سبب پل‌های با اهمیت خارج نمی‌شوند. در مقابل، پلی مثل B4 همواره کم‌اهمیت محسوب می‌شود و تغییرات شبکه در هیچ دوره‌ای سبب قرارگیری آن در بین پل‌های با اهمیت نمی‌شود. نتایج مقایسه دو رویکرد: الف) بدون در نظر گرفتن تغییرات اهمیت شبکه‌ای پل‌ها در آینده و ب) با در نظر گرفتن تغییرات اهمیت شبکه‌ای پل‌ها، ضرورت توجه به تغییرات شبکه را در تصمیم‌گیری نمایان می‌سازد. زیرا اگر مالکان شبکه بدون توجه به تغییرات اهمیت شبکه‌ای پل‌ها در آینده، پل B3 را جزو پل‌های حیاتی در نظر گرفته و مورد محافظت قرار ندهند، اگر حمله خرابکارانه در شرایط توسعه یافته شبکه رخ دهد، پل B3 به دلیل افزایش اهمیت آن طی توسعه شبکه و عدم محافظت از آن به یک هدف جذاب برای مهاجمان برای حمله تبدیل خواهد شد.

در این مطالعه موردی، همچنین، تأثیر استفاده از ضریب فوریت‌های مختلف بر تغییر پل‌های انتخاب شده در سبب پل‌های با اهمیت مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است با توجه به این که اکثر پل‌های انتخاب شده در سبب پل‌های با اهمیت در این مطالعه موردی جزو پل‌های همواره مهم بودند، تغییر فوریت تأثیری بر پل‌های انتخاب شده در سبب نداشت. اما استفاده از ضریب فوریت در تصمیم‌گیری در این مقاله سبب می‌شود تا در فوریت‌های زیاد، پل‌های با اهمیت در کوتاه‌مدت، در فوریت‌های متوسط، پل‌های با اهمیت در میان‌مدت و در فوریت کم، پل‌های با اهمیت در بلندمدت در اولویت

اما در بسیاری از موارد، به ویژه در ایران، به دلایل متعددی نظیر عدم جذب بودجه مورد نیاز برای توسعه شبکه و تغییرات مکرر مدیریت‌های شهری، برنامه‌های راهبردی شبکه به‌طور کامل مطابق چشم‌انداز از قبل تعریف شده توسعه نمی‌یابند. این میزان تا حدودی باعث کاهش کیفیت تصمیم‌گیری برای انتخاب سبد پل‌های با اهمیت می‌شود. هر چه میزان انحراف شبکه توسعه‌یافته از شبکه در واقعیت، از چشم‌انداز ترسیم شده برای آن بیشتر باشد، کیفیت تصمیم‌گیری در این خصوص بیشتر کاهش می‌یابد. لذا، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، علاوه بر توجه به عدم قطعیت در توپولوژی شبکه ناشی از توسعه آن در آینده، موضوع عدم قطعیت در پیاده‌سازی برنامه توسعه شبکه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

انتخاب قرار بگیرند. باید دقت نمود در صورتی که سطح تهدیدات امنیتی برای شبکه بسیار پایین بوده و شبکه برای محافظت از پل‌ها در شرایط بدون فوریت باشد، می‌بایست از مقادیر اهمیت نسبی در آخرین دوره توسعه برای اولویت‌بندی پل‌ها استفاده نمود. در مقابل، در صورتی که سطح تهدیدات امنیتی برای یک شبکه بسیار بالا بوده و شبکه در شرایط اضطرار برای محافظت از پل‌ها باشد، می‌بایست وضعیت فعلی شبکه مبنای تصمیم‌گیری برای اولویت‌بندی قرار گیرد و از تغییرات اهمیت پل‌ها در آینده صرف‌نظر نمود در پایان، می‌بایست اشاره نمود که عدم قطعیت مورد بررسی در این مقاله مربوط به توپولوژی شبکه و تغییر آن در آینده بود و فرض شد که برنامه‌های توسعه شبکه، دقیقاً مطابق چشم‌انداز تعریف شده پیاده‌سازی می‌شوند.

## ۶. مراجع

- Al Kazimi, A. and MacKenzie, C. A. 2016. "The economic costs of natural disasters, terrorist attacks, and other calamities: An analysis of economic models that quantify the losses caused by disruptions". IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS).
- Chipley, M., Lyon, W., Smilowitz, R., Williams, P., Arnold, C., Blewett, W., Hazen, L. and Krimgold, F. 2012. "Primer to design safe school projects in case of terrorist attacks and school shootings". Buildings and Infrastructure Protection Series, FEMA-428/BIPS-07/January 2012, Edition 2, US Department of Homeland Security.
- Cooper, J. D., Smith, M. C. and Ernst, S. L. 2010. "Blue Ribbon Panel recommendations for bridge and tunnel security". Council, N. R.
- Davis, C., Sammarco, E. and Williamson, E. 2017. "Bridge security design manual". FHWA.
- Dezfuli Nezhad, M., Raufi, R. and Dalvand, A. 2021. "Impact of network density on optimizing budget allocation to bridges for improving the resilience of the transportation network". J. Transport. Infrastruct. Eng., 6(4): 81-99.
- Dezfuli Nezhad, M., Raufi, R. and Dalvand, D. 2022. "A network-based importance measurement index for bridge security risk assessment and prioritisation". The Baltic J. Road Bridge Eng., 17(1): 1-30.
- Diaz, E. E. M., Moreno, F. N. and Mohammadi, J. 2009. "Investigation of common causes of bridge collapse in Colombia". Practice Period. Struct. Design Constr., 14(4): 194-200.
- Duchaczek, A. and Skorupka, D. 2013. "Evaluation of probability of bridge damage as a result of terrorist attack". Arch. Civ. Eng., 59(2): 215-227.
- Duchaczek, A. and Skorupka, D. 2016. "A risk assessment method of bridge facilities damage in the aspect of potential terrorist attacks". Period. Polytech. Civ. Eng., 60(2): 189-198.
- Duwadi, S. R. and Chase, S. B. 2006. "Multiyear plan for bridge and tunnel security research, development, and deployment". Publication No. FHWA-HRT-06-072.
- Ede, A., Nwankwo, C., Oyebisi, S., Olofinnade, O., Okeke, A. and Busari, A. 2019. "Failure trend of transport infrastructure in developing nations: Cases of bridge collapse in Nigeria". IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng., 640: 012102.
- Federal Emergency Management Agency. 2003a. "Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings". FEMA-426, US Department of Homeland Security.
- FEMA. 2003b. "FEMA 428: Primer to design safe school projects in case of terrorist attacks". Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

- FEMA. 2003c. "Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks". Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- FEMA. 2007. "FEMA 430: Site and urban design for security: Guidance against potential terrorist attacks". Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Frangopol, D. M., Sause, R. and Kusko, C. S. 2010. "Bridge maintenance, safety, management and life-cycle optimization". Proceedings of the Fifth International IABMAS Conference, Philadelphia, USA, 11-15 July, CRC Press.
- Frazier, E. R., Nakanishi, Y. J. and Lorimer, M. A. 2009. "Surface transportation security". Volume 14: Security 101, a physical security primer for transportation agencies, No. 0309117933. NCHRP Report, 223 p.
- Garg, R. K., Chandra, S. and Kumar, A. 2020. "Analysis of bridge failures in India from 1977 to 2017". Struct. Infrastruct. Eng., 18(3): 295-312.
- Girvan, M. and Newman, M. E. 2002. "Community structure in social and biological networks". Proc. National Academy of Sci., 99(12): 7821-7826.
- Guo, A., Liu, Z., Li, S. and Li, H. 2017. "Seismic performance assessment of highway bridge networks considering post-disaster traffic demand of a transportation system in emergency conditions". Struct. Infrastruct. Eng., 13(12): 1523-1537.
- Haardt, J. and Rothenpieler, S. 2013. "Europeanising transport security: Policy and research recommendations for improving transport infrastructure security in Europe". In: Infrastruct. Risk Resilience: Transport., pp. 17-21.
- Harvey, J. and Kumar, S. 2020. "A survey of intelligent transportation systems security: Challenges and solutions". 2020 IEEE 6<sup>th</sup> Intl Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE International Conference on High Performance and Smart Computing (HPSC) and IEEE International Conference on Intelligent Data and Security (IDS).
- Hatem, W. A. and Al-Tmeemy, S. M. H. 2015. "The impact of terrorism on construction industry in Iraq". Wasit J. Eng. Sci., 3(2): 69-84.
- Ip, W. H. and Wang, D. 2011. "Resilience and friability of transportation networks: Evaluation, analysis and optimization". IEEE Syst. J., 5(2): 189-198.
- Issa, L. 2008. "Development of an inspection checklist for risk assessment of bridges in New Jersey". Rutgers University, Graduate School, New Brunswick.
- Jenkins, B. M. 2001. "Protecting public surface transportation against terrorism and serious crime: An executive overview". NCJRS, No. 193964.
- Kaundinya, I., Krieger, J., Mayer, G. and Rothenpieler, S. 2014. "Security of road transport networks: Identifying and assessing critical road infrastructure". Transportation Research Board 93<sup>rd</sup> Annual Meeting, 12-16 Jan., Washington, DC.
- Kim, K. and Lee, J. 2020. "Fragility of bridge columns under vehicle impact using risk analysis". Adv. Civ. Eng., 2020: 713910.
- Leung, M., Lambert, J. H. and Mosenthal, A. 2004. "A risk-based approach to setting priorities in protecting bridges against terrorist attacks". Risk Anal.: An Int. J., 24(4): 963-984.
- Li, Y., Wang, T., Song, X. and Li, G. 2016. "Optimal resource allocation for anti-terrorism in protecting overpass bridge based on AHP risk assessment model". KSCE J. Civ. Eng., 20(1): 309-322.
- 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.
- Qeshta, I. 2019. "Fragility and resilience of bridges subjected to extreme wave-induced forces". RMIT University, Melbourne.
- Ray, J. C. 2007. "Risk-based prioritization of terrorist threat mitigation measures on bridges". J. Bridge Eng., 12(2): 140-146.
- Rezaei, S., Mirzaei, Z., Khalighi, M. and Bahrami, J. 2021. "Review and classification of the indicators and trends used in bridge performance modeling". Int. J. Urban Civ. Eng., 15(2): 116-125.
- Richardson, H. W., Park, J., Moore II, J. E. and Pan, Q. 2014. "National economic impact analysis of terrorist attacks and natural disasters". Edward Elgar Publishing.
- Roberts, J. E. 2003. "Recommendations for bridge and tunnel security". Prepared by The Blue Ribbon Panel on Bridge and Tunnel Security.
- Rummel, T., Hyzak, M. D. and Ralls, M. L. 2002. "Transportation security activities in Texas". Vital Links in Securing Our Mobility, International Bridge Conference, 19<sup>th</sup> Annual IBC Engineers' Society of Western Pennsylvania.



- Shahin, A. and Jaferi, F. 2015. "The shortest route for transportation in supply chain by minimum spanning tree". *Int. J. Logist. Syst. Manag.*, 22(1): 43-54.
- Sheng, T. 2009. "Logistics node location and route optimization based on minimum spanning tree". *Transport Standardization*, 9.
- Smith, M. C., Rowshan, S., Krill Jr., S., Seplow, J. and Sauntry, W. 2002. "A guide to highway vulnerability assessment for critical asset identification and protection". Science Applications International Corporation.
- Valeo, M. M. 2010. "Using the analytic hierarchy process to improve the Rutgers simple bridge security checklist". Rutgers University Graduate School, New Brunswick.
- Valeo, M., Nassif, H., Issa, L., Capers Jr., H. and Ozbay, K. 2012. "Analytic hierarchy process to improve simple bridge security checklist". *Transportat. Res. Record*, 2313(1): 201-207.
- Yu, R., Chen, L., Fang, Q. and Huan, Y. 2018. "An improved nonlinear analytical approach to generate fragility curves of reinforced concrete columns subjected to blast loads". *Adv. Struct. Eng.*, 21(3): 396-414.
- Zhang, W. and Wang, N. 2016. "Resilience-based risk mitigation for road networks". *Struct. Safety*, 62: 57-65.