نشریه‌ی علمی شهر ایمن
JOURNAL OF RESILIENT CITY
(JRC)

تحلیل تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهری با رویکرد چرخه سازگاری در برابر مخاطرات نمونه موردی کلان‌شهر تبریز

محمدتقی پیربابایی[1]؛ پیمان مهرنژاد بور[2]؛ یاسر شهبازی[3]

۱- استاد دانشگاه هنر اسلامی تبریز
۲- دانشجوی دکتری شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز (نویسنده مسئول)
۳- دانشیار دانشگاه هنر اسلامی تبریز

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

واژگان کلیدی

تاب‌آوری، زیرساخت‌های حیاتی، چرخه سازگاری تاب‌آوری، کلان‌شهر تبریز، *FTOPSIS*

چکیده

تاب‌آوری به‌عنوان پاسخی سازگار و انعطاف‌پذیر در برابر شوک‌ها و مخاطرات بحران‌زا قلمداد می‌شود که به سیستم‌های پیچیده از جمله سیستم‌های زیرساختی حیاتی اجازه برنامه‌ریزی، جذب، بازیابی و سازگاری با شرایط جدید را می‌دهد. با علم به این موضوع و با توجه به اهمیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی به‌خصوص در مناطق کلان‌شهری که حجم بزرگی از جمعیت و سیستم‌های بزرگی از شبکه‌های زیرساختی حیاتی را شامل می‌شوند، پژوهش حاضر تلاش کرده است تا با بهره‌گیری از مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری (*RAC: Resilience Adaptive Cycle*) به تحلیل ظرفیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی کلان‌شهر تبریز بپردازد. در این راستا، با تحلیل ظرفیت تاب‌آوری زیرساختی در پنج زیرساخت برق، گاز، آب، حمل‌ونقل و مخابرات در قالب مدل چهار مرحله‌ای چرخه سازگاری تاب‌آوری در کلان‌شهر تبریز پرداخته شده است. بدین‌منظور به روش دلفی هدفمند و با ابزار مصاحبه، پرسشنامه و با استفاده از دیدگاه ۳۰ کارشناس به گردآوری داده‌های تحلیلی اقدام شد. برای تحلیل داده‌ها از مدل شباهت به گزینه ایده‌آل فازی (*FTOPSIS: Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity of an Ideal Solution*) استفاده شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که بر اساس چهار مرحله مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری، زیرساخت‌های انرژی در کلان‌شهر تبریز یعنی برق و گاز نیازمند ایجاد ظرفیت مانایی و بازیابی به خاطر ضعف‌های اساسی موجود و با توجه به سنجه‌های تحلیلی در دو مرحله اول فروپاشی و سازمان‌دهی مجدد می‌باشند. از سوی دیگر زیرساخت حیاتی آب نیازمند ایجاد ظرفیت تاب‌آوری مبتنی بر رشد و توسعه به خاطر اولویت آن در مراحل بهره‌وری و تعادل در مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری است.

۱- مقدمه

جهان امروز به‌سرعت در حال شهری شدن است و این روند به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه شتاب بیشتری دارد. طبق گزارش‌های سازمان ملل متحد، انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ نزدیک به ۷۰ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی کنند (*Zhang et al., 2016: 242*). در واقع شهرها به‌عنوان مکان‌های نوآوری، با دارا بودن امکانات و فرصت‌های بی‌بدیل توسعه، همواره جاذب جمعیت بوده‌اند. هرچند این شهرنشینی و شهرگرایی شتاب فراوان به خود می‌گیرد، از سوی دیگر، تقاضا برای امکانات و تسهیلات در شهرها و مدیریت این نیازها صورت جدی و البته چالش‌گونه به خود می‌گیرد (امان‌پور و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۰). این مسئله، به‌خصوص در زمینه تأمین زیرساخت‌های حیاتی و داشتن یک شبکه پایدار در زمینه زیرساخت‌های حیاتی در

* نویسنده مسئول: رایانامه: *pirbabaei@tabriziau.ac.ir*

شهرهای بزرگ امری حیاتی محسوب می‌گردد (علیزاده و دامن باغ، ۱۴۰۰).

زیرساخت‌های حیاتی در کشورهای مختلف تقسیم‌بندی‌های مختلفی دارند ولی به‌صورت عمده زیرساخت‌های انرژی نظیر شبکه برق و گاز، زیرساخت‌های شبکه آب، حمل‌ونقل و مخابرات را در بر می‌گیرد (*Alizadeh & Sharifi, 2020: 3*). این زیرساخت‌ها بدان‌جهت حیاتی هستند که به‌عنوان شریان‌های حیاتی شهرها عمل کرده و هرگونه اختلال در آنها عملکرد سایر کاربری‌ها و زیرساخت‌ها و روساخت‌ها را نیز دچار اختلال و بحران می‌کند. این مسئله به‌خصوص در مناطق کلان‌شهری که اندازه بزرگی از جمعیت و کاربری‌ها را دارند موضوعی حیاتی و بسیار حساس می‌باشد (*Pursiainen, 2018: 632; Osei-Kyei et al., 2021:2*).

با توجه به آسیب‌پذیری بالا و حساس بودن جایگاه و نقش زیرساخت‌های حیاتی در حیات و توسعه شهرها، این زیرساخت‌ها همواره با مخاطرات طبیعی و انسانی دست‌وپنجه نرم می‌کنند (عسگرپور و همکاران، ۱۳۹۶: ۲). از منظر طبیعی، تغییرات اقلیمی به‌عنوان یک تهدید شناخته شده و فراگیر برای این زیرساخت‌ها به شمار می‌رود و سالانه در اقصی نقاط جهان خسارات جبران‌ناپذیری را به بار می‌آورد (*Silvast et al., 2021: 80*)؛ اما از سوی دیگر، تهدیدات انسانی از قبیل اقدامات تروریستی و جنگ به‌خصوص در یک دهه اخیر منجر به آسیب‌های جدی به این زیرساخت‌ها و شبکه‌های تأمین انرژی شده است (*Andrew, 2020:18*).

با در نظر گرفتن اهمیت زیرساخت‌های حیاتی برای حیات و توسعه شهرها از یک سو و آسیب‌پذیری بالای آنها؛ توجه برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران توسعه شهری به رویکردهای حفاظتی، در راستای ارزیابی آسیب‌پذیری و ارتقای ظرفیت ماندگاری این زیرساخت‌ها بیش از پیش جلب شده است. یکی از رویکردهای اساسی در راستای ارتقای ظرفیت مانایی و قدرت انعطاف‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی در برابر شوک‌ها و تهدیدات، رویکرد تاب‌آوری عنوان شده است.

هرچند برای تاب‌آوری تعریف مشخص و همه‌شمولی ارائه نشده است ولی مطابق با تعریف آکادمی علمی ایالات متحده آمریکا (*The National Academy of Science*) تاب‌آوری، توانایی و ظرفیت یک سیستم برای برنامه‌ریزی و آمادگی، جذب و کاهش، بازیابی و سازگاری موفق با آثار و تهدیدات مخرب ناشی از شوک‌ها و بحران‌های درونی و بیرونی می‌باشد (*Alizadeh & Sharifi, 2020: 3*). این رویکرد می‌تواند توانایی مانایی و مقاومت در برابر آثار مخرب و انعطاف‌پذیری بالا و ظرفیت مانایی و سازگاری زیرساخت‌های حیاتی را در برابر مخاطرات ارزیابی نماید (بسطامی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۱۰). در واقع فراتر از حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی، رویکرد تاب‌آوری، ارزیابی، پایش و اصلاح سیستم را از منظر بهبود ظرفیت مقاومت، ظرفیت بازیابی و ظرفیت انطباق‌پذیری مورد تأکید قرار می‌دهد. به همین خاطر و با توجه به عملکرد خاص و حیاتی زیرساخت‌های حیاتی، تاب‌آوری آنها برای شهر بسیار مهم و اساسی است (*Rocchetta, 2022: 2*).

با توجه به اهمیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی به‌خصوص در مناطق کلان‌شهری که حجم بزرگی از جمعیت و سیستم‌های بزرگی از شبکه‌های زیرساختی حیاتی را شامل می‌شوند، پژوهش حاضر تلاش کرده است تا ظرفیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی را در کلان‌شهر تبریز مورد تحلیل و ارزیابی قرار دهد. در این راستا، پژوهش حاضر در پی آن است تا به تحلیل ظرفیت تاب‌آوری زیرساختی در پنج زیرساخت برق، گاز، آب، حمل‌ونقل و مخابرات در قالب مدل چهار مرحله‌ای چرخه سازگاری تاب‌آوری در کلان‌شهر تبریز بپردازد. در نتیجه، نتایج این مطالعه می‌تواند در راستای برنامه‌ریزی برای ایجاد تفکر تاب‌آوری و ارتقای ظرفیت آن در زیرساخت‌های حیاتی کلان‌شهر تبریز مورد توجه سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در کلان‌شهر تبریز قرار بگیرد.

۲- پیشینه تحقیق

مطالعات متعددی در راستای تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی به انجام رسیده است که در ادامه، گزیده‌ای از این مطالعات تشریح می‌شود. در زمینه مطالعات داخلی، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

کریمی و جلیلی صدرآباد (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان

بررسی جایگاه شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در فرآیند چرخه‌ای تاب‌آوری و درهم‌کنش آنها از نظر متخصصان نتیجه‌گیری کرده‌اند که تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری دارای چرخه پیش‌گیری، جذب، بازیابی و سازگاری می‌باشد. در بین شاخص‌های تبیین‌کننده تاب‌آوری زیرساختی به‌ترتیب مدت‌زمان بازگشت به شرایط اولیه، میزان جذب، میزان وابستگی متقابل، مقاومت و کیفیت طراحی ساختاری، برخورداری از زیرساخت‌های پشتیبان و حیاتی، منابع در دسترس، توانایی جایگزینی، توزیع فضایی، موقعیت مکانی، میزان سرانه مصرف و امکان استفاده چندمنظوره دارای اهمیت می‌باشند.

یوسفی شهیر و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان سنجش تاب‌آوری مکانی کاربری‌های حیاتی با تأکید بر شبکه ارتباطی در برابر خطر وقوع زمین‌لرزه (مورد مطالعه: کلان‌شهر تبریز) این‌گونه نتیجه گرفته‌اند که شهر تبریز در بخش تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی در عمده شاخص‌های مربوط به مانایی، جذب و بازیابی دارای ضعف بوده و تاب-آوری مناسبی ندارد.

علیزاده (۱۴۰۰) در پژوهشی با عنوان تحلیل و شناخت ظرفیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهری بر اساس مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری در کلان‌شهر اهواز زیرساخت‌های حیاتی کلان‌شهر اهواز را از منظر مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری بررسی کرده و ظرفیت‌های تاب‌آوری و نیازهای تاب‌آورانه آنها را در چهار مرحله فروپاشی، سازمان‌دهی مجدد، بهره‌وری و تعادل برنامه‌ریزی و تشریح کرده است.

جلالی فراهانی و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای با عنوان تاب‌آوری زیرساخت‌های آب شرب کشور با رویکرد پدافند غیرعامل با تمرکز بر زیرساخت حیاتی آب این‌گونه نتیجه‌گیری کرده‌اند که مؤلفه مقاومت، بالاترین اثرگذاری بر بعد تاب‌آوری زیرساخت‌های آب شرب کشور دارد و بعد از آن به‌ترتیب مؤلفه ترمیم و آمادگی و پایداری به‌ترتیب بیشترین تأثیر را دارند و باید در تاب‌آوری زیرساخت حیاتی آب کشور مورد تأکید و توجه قرار گیرند.

در بخش مربوط به مطالعات خارجی به‌طور گزیده می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

پورساینن (۲۰۱۸) در پژوهشی با عنوان تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی: به تجربه کشورهای اسکاندیناوی در تاب‌آورسازی زیرساخت‌های حیاتی و نحوه برنامه‌ریزی، جذب، بازیابی و سازگاری آنها پرداخته و آن را الگویی در حال توسعه برای تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی معرفی کرده است.

رهاک و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی با عنوان رویکرد پیچیده برای ارزیابی تاب‌آوری عناصر زیرساخت حیاتی به ارائه مدلی به نام *CIERA* پرداخته‌اند که به تحلیل و تشریح تاب‌آوری و نحوه توسعه آن در زیرساخت‌های حیاتی در حالت مختلف و در فرآیندهای مختلف مواجه به شوک و بحران در این زیرساخت‌ها می‌پردازد.

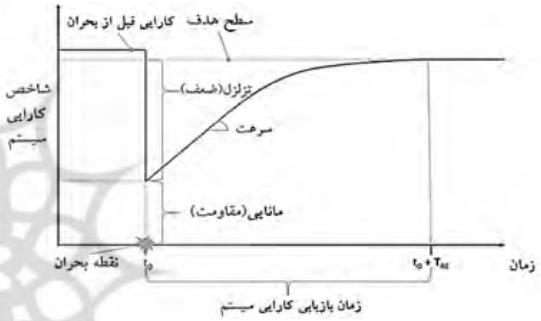
علیزاده و شریفی (۲۰۲۰) در پژوهشی با عنوان تحلیل تاب‌آوری شبکه زیرساخت‌های حیاتی شهری با مطالعه‌ای در اهواز، با تحلیلی فضایی به ارزیابی میزان تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی آب، گاز، برق و حمل‌ونقل در کلان‌شهر اهواز پرداخته‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که پهنه‌های مرکزی شهر دارای تاب‌آوری مناسبی برای زیرساخت‌های حیاتی نیستند.

ولز و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی تحت تهدیدات ترکیبی، طی مروری بر ادبیات سیستماتیک، این‌گونه جمع‌بندی کرده‌اند که ادبیات بر جذب تهدیدات ترکیبی و آبشاری توسط زیرساخت‌های حیاتی، به‌ویژه در حوزه‌های فیزیکی و اطلاعاتی متمرکز شده است. نتایج، شکاف بالقوه‌ای را در ترکیب مدل‌های علم شبکه از مراحل تاب‌آوری، آماده‌سازی و انطباق شناسایی می‌کند که نشان‌دهنده فرصتی بالقوه برای روش‌های علم شبکه برای ادغام هر چهار مرحله در مدل‌های انعطاف‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی است.

۳- چارچوب نظری

تاب‌آوری روشی جدید و مکمل برای ایجاد محیطی با آمایش پایدار شامل مطالعه مناطق شهری از نظر سیستم‌های اجتماعی- محیطی و اجتماعی-تکنیکی و زیرساخت‌های آن است. در چنین رویکردی، دارایی‌های سیستم پیچیده‌ای به نام شهر قادر به مواجهه با خطرات و سختی‌های پیش‌بینی

نشـده اسـت (علیـزاده، ۱۴۰۰: ۱۱۰۴). تـاب‌آوری عمـدتاً مبحثی است که برای شناخت عدم قطعیت‌ها و ناشناخته‌هـا کـاربرد دارد (فـرزاد بهتـاش و همکـاران، ۱۳۹۲: ۳۲). ایـن رویکرد، مکمل و پشتیبان دستیابی به آمایش پایدار شـهری است؛ زیـرا رویکـرد راهبـردی تـاب‌آوری در فراینـد ارتقـای ظرفیت مانایی، توانـایی بازیـابی و برگشـت‌پـذیری منـابع و دارایی‌های حیاتی و حساس شهرها منطبق با اصول پایداری شهری است (*Sharifi, 2016:260*). در حقیقـت هنـر یـک سیستم زیرساختی در صورت تاب‌آور بـودن آن، کـم کـردن مدت‌زمان بازیابی بعد از حادثه و مقاومت در برابر شوک‌های بیرونی خواهد بود (شکل ۱).



شکل ۱- منحنی فرایند تاب‌آوری سیستم در برابر خطرات و تهدیدات. منبع: محمدی ده‌چشمه و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۷۸.

تبیین تاب‌آوری در برابر تهدیدات، در واقع شناخت نحوه تأثیرگذاری ظرفیت‌های اجتماعی، اقتصادی، نهادی، سیاسی و زیرساختی جوامع شهری در مواجهه با عـدم قطعیـت‌هـا و پیچیدگی‌هاسـت (بهتـاش و همکـاران، ۱۳۹۲: ۳۴). امـروزه رفاه اجتماعی و فراتر از آن حیات شـهرها هرچـه بیشـتر بـه عملکـرد صـحیح زیرسـاخت‌هـای حیـاتی وابسـته اسـت و بحران‌هایی که بر این زیرساخت‌ها تأثیر مـی‌گذارنـد معمـولاً تأثیر آنها را بر جامعـه تشـدید مـی‌کننـد؛ بنـابراین، ارتقـای تاب‌آوری‌ها مهم‌ترین هـدف مـدیران بحـران امـروزی اسـت (*Labaka et al., 2016: 21*). در ایـن راسـتا، تفـاوت بـین زیرساخت‌های تاب‌آور و غیر تاب آور در این است کـه هـدف یک زیرساخت حیاتی معمـولی تـأمین تقاضـاها و حفـظ آن به‌طورمعمول اسـت، درحـالی‌کـه یـک سیسـتم زیرسـاختی تاب‌آور، عملکرد عـادی را هـم در شـرایط معمـول و هـم در زمان استرس و ضربه به سیستم حفـظ مـی‌کنـد (برینگـر و همکاران، ۱۴۰۰: ۳۴). این هدف با شناسایی عناصـر حیـاتی سیستم زیرساختی و فراهم کردن ظرفیت هـر دارایـی بـرای دستیابی به سطوحی از عملکرد در مواقع اسـترس سیسـتم، مانند سطوح بالای ازدحام (مصرف)، یا در زمان شوک، مانند یـک رویـداد شـدید آب‌وهـوایی یـا شـوک ناشـی از انسـان (به‌عنوان‌مثال، حمله سایبری به زیرساخت) قابـل دسـتیابی است (محمـدی ده‌چشـمه و همکـاران، ۱۳۹۸: ۳۷۹). نکتـه مهم این است که عناصر حیاتی سیستم در معرض خطـرات مختلفی قرار دارند کـه سیسـتم بایـد بتوانـد بـا اسـتفاده از ظرفیت‌های درون خود به آنها پاسخ دهد. هنگـامی‌کـه یـک سیستم زیرساختی تاب‌آور، هـم در شـرایط عـادی و هـم در زمان استرس یا شوک، به‌درستی عمل می‌کند، سیستم‌هـای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی به آرامـی بـه کـار خـود ادامه می‌دهند و هنگامی‌که این سیستم‌ها به کار خود ادامـه می‌دهند، مزایای خاصی را نیز تولیـد مـی‌کننـد و هزینـه‌هـا افزایش نمی‌یابد. اینها نتایج سیستم زیرساختی تاب‌آور است (*Alizadeh & Sharifi, 2020: 2*).

یکی از مهم‌ترین مدل‌ها و چارچوب‌های ارائه شده بـرای اندازه‌گیری ظرفیت تاب‌آوری یک سیستم چرخـه سـازگاری تاب‌آوری می‌باشد. آنچه در این مـدل اهمیـت دارد ظرفیـت سیستم، شدت متـأثر شـدن و کیفیـت ایـن تأثیرپـذیری از خطرات در کنار سـیر گـذار از شـرایط بحرانـی و در نهایـت رسیدن به مقاومت و سازگاری با خطرات است که منجـر بـه تاب‌آور بودن سیسـتم یـا غیـر تـاب‌آور بـودن آن مـی‌شـود (*Peng et al., 2017: 91*). مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری برای اولین بار در مطالعات تاب‌آوری نظام‌های اکولوژیکی و با بهره‌گیری و بسط نظریه هولینگ (*Holling*)، زیست‌شـناس کانادایی- آمریکایی ارائه شد. در ایـن مـدل، در قالـب چهـار مرحله سازگاری و ظرفیت تاب‌آوری منـابع و سیسـتم‌هـا در برابر شوک‌ها و مخاطرات بیرونی تشریح و ارزیابی مـی‌گـردد (شکل ۲) (علیزاده، ۱۴۰۰: ۱۱۰۹).

در مدل چرخه سازگاری تـاب‌آوری بـرای انـدازه‌گیـری ظرفیت تاب‌آوری یک سیستم، منطقه (*r*)؛ اشاره به ظرفیـت رشد دارد که برای موفقیت در این مرحله نیـاز بـه عملکـرد موفقیت‌آمیز منابع است. منطقه (*K*)؛ ظرفیت توسعه را بیـان

شکل ۲- مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری (*RAC*). منبع: *Kharrazi et al., 2016: 6*؛ علیزاده و دامن باغ، ۱۴۰۰: ۶.

می‌کند که قرارگیری در این مرحله نیاز به خودسازماندهی اطلاعات و دارایی‌ها می‌باشد. منطقه (Ω')؛ ظرفیت زنده ماندن یا مانایی را نشان می‌دهد. برای موفقیت در این مرحله حفاظت از اطلاعات و کارکردهای اساسی سیستم مورد نیاز است و منطقه (α)؛ ظرفیت بازیابی و تجدید ساختارها را گوشزد می‌کند. موفقیت در این مرحله نیازمند یادگیری و تلاش برای احیا ساختارهای ناکارآمد می‌باشد (علیزاده، ۱۴۰۰: ۱۱۰۸). در واقع، در چرخه سازگاری تاب‌آوری خروجی حاصل از مواجهه با بحران و البته کیفیت مواجهه با بحران سه نوع دستاورد را در پی خواهد داشت. اولین دستاورد، دسترسی و فهم از ارزش‌های اساسی و کلیدی سیستم که بایستی به‌خاطر آنها شرایط بحرانی را تحمل کند، می‌باشد. دستاورد دوم دسترسی به یک تعادل جدید در وضعیت سیستم یا نظام اجتماعی است و دستاورد سوم سازگار نمودن ظرفیت‌های سیستم با خطرات بعدی می‌باشد. همان‌طور که بیان شد، تحلیل منابع سیستم در این مدل، چهار نوع وضعیت و متعاقب آن چهار نوع ظرفیت را طلب خواهد کرد (*Fath et al., 2015: 6*).

در حالت سلسله‌مراتبی بدترین شرایط در مرحله (Ω') می‌باشد که به مرحله فروپاشی معروف است. در این مرحله که آغاز قرارگیری سیستم در بحران است، منابع و دارایی‌های سیستم نیازمند ایجاد ظرفیت مانایی (*Survive*) هستند. بعد از این مرحله، مرحله (α) قرار دارد که به مرحله سازمان‌دهی مجدد اشاره دارد. در این مرحله سیستم و منابع آن نیازمند بازیابی و ساختاردهی مجدد به شرایط و امکانات ساختاری می‌باشند. مرحله (r) به مرحله بهره‌وری شهرت دارد. در این مرحله، بعد از بازیابی، سیستم، منابع و اجزای تشکیل‌دهنده آن، رشد کارکردی و ساختاری خود را آغاز می‌کنند؛ بنابراین این مرحله نیازمند ایجاد ظرفیت‌های مبتنی بر رشد و تقویت کمّی ساختاری می‌باشد. مرحله نهایی (k) مرحله تعادل است. در این مرحله، ساختار در نهایت اوج قرار داشته و به‌نوعی منابع سیستم تعادل و پایداری در عملکرد و ساختار خود دارند. ظرفیت مورد نیاز ارتقای بنیان‌های توسعه و توانمندی‌های مبتنی بر توسعه که فراتر از رشد است، خواهد بود (*Kharrazi et al., 2016: 5-6; Fath et al., 2015: 5*).

۴- روش‌شناسی تحقیق

مطالعه حاضر با هدف‌گذاری کاربردی و با روش‌شناسی «توصیفی- تحلیلی» به انجام رسیده است. داده‌های بخش توصیفی پژوهش از طریق خوانش محتوایی اسناد و مراجع کتابخانه‌ای معتبر در زمینه موضوع پژوهش بوده است. علاوه بر گردآوری رویکردها و تشریح مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری، مهم‌ترین اقدام در بخش توصیفی، گردآوری سنجه‌های تحلیلی و شاخص‌های تبیین کننده این مدل بود. داده‌های بخش تحلیل پژوهش نیز به روش دلفی هدفمند و از دیدگاه کارشناسان و متخصصان مرتبط با موضوع تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهری در کلان‌شهر تبریز بوده است. در این بخش از دیدگاه ۳۰ کارشناس (کارشناسان پژوهش ۳۰ نفر از اساتید دانشگاه در رشته‌های مهندسی شهرسازی، حمل‌ونقل، انرژی و جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشجوی دکترای شهرسازی و جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری و کارشناسانی از شهرداری تبریز بوده‌اند). در دو مرحله؛ تأیید اولیه سنجه‌های تحلیلی و همچنین اجماع نهایی بر روی آنها استفاده شد و سپس با استفاده از دیدگاه آنها به ارزش‌دهی به هرکدام از سنجه‌ها و مراحل چهارگانه مدل مطابق با وضعیت زیرساخت‌های حیاتی در کلان‌شهر تبریز اقدام شد. شایان ذکر است که برای ارتباط با کارشناسان پژوهش از سه شیوه حضوری، به‌صورت ایمیلی و همچنین ارتباط از طریق شبکه‌های اجتماعی (روبیکا، ایتا و واتسپ) استفاده شد. برای تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده

جهت شناخت اولویت و ظرفیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی کلان‌شهر تبریز بر اساس مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری از مدل شباهت به گزینه ایده‌آل فازی (*FTOPSIS*) استفاده شد.

۵- مشخصه‌های توصیفی کارشناسان پژوهش

همان‌طور که در بالا ذکر شد ۳۰ کارشناس و متخصص در فرآیند پیمایش میدانی و نظرسنجی پژوهش مشارکت داشتند که در جدول ۱ مشخصات توصیفی آنها تشریح شده است.

جدول ۱- مشخصه‌های توصیفی کارشناسان پژوهش

دسته	تشریح	فراوانی	درصد فراوانی
رشته شغلی	استاد دانشگاه	۸ نفر	۲۷
	کارشناس شهرداری	۱۲ نفر	۴۰
	دانشجوی دکترا	۱۰ نفر	۰/۳۳
جنسیت	زن	۶ نفر	۲۰
	مرد	۲۴ نفر	۸۰
تحصیلات	کارشناس ارشد	۱۲ نفر	۴۰
	دکترا	۱۸ نفر	۶۰

۶- سنجه‌های تحلیلی پژوهش

سنجه‌های تحلیلی پژوهش بر اساس مدل سازگاری تاب‌آوری و بر مبنای چهار مرحله تشکیل‌دهنده این چرخه تدوین و گردآوری شده است. در این راستا ابتدا با خوانش ادبیات نظری و منابع مرتبط با موضوع سنجه‌های مورد نظر برای تشریح و تبیین چهار مرحله فروپاشی، سازمان‌دهی مجدد، بهره‌وری و تعادل گردآوری شد. سپس برای تأیید نهایی آنها، از روش دلفی هدفمند و دیدگاه هشت کارشناس که از اساتید دانشگاه بودند در دو مرحله استفاده شد که مرحله اول مربوط به بررسی اولیه سنجه‌های تحلیلی و مرحله دوم اجماع نهایی بر روی سنجه‌ها بود. برای محاسبه توافق یا اجماع نهایی نظرات کارشناسان بر روی سنجه‌ها از ضریب توافقی کندال استفاده شد. در این راستا سنجه‌های تحلیلی مورد استناد قرار گرفتند که در ضریب توافق کندال میزانی برابر با ۰/۷ و بیشتر از آن داشتند. در مرحله آخر از نظرات ۳۰ کارشناس برای ارزش‌دهی به سنجه‌های تحلیلی استفاده شد. در این مرحله پرسشنامه‌ای از سنجه‌های تحلیلی در قالب طیف لیکرت پنج مقیاسی از خیلی ضعیف تا خیلی مناسب تشکیل شد. جدول ۲، سنجه‌های تحلیلی نهایی پژوهش برای چهار مرحله مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مراحل و سنجه‌های تحلیلی تبیین کننده مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری. منبع: علیزاده و دامن باغ،۱۴۰۰، *Fath et Salvia & Quaranta, 2015 ،Holling, 2002 Sundstrom & ،Kharrazi et al., 2016 ،al., 2015 Liu et al., 2022 ،Allen, 2019*

مرحله	سنجه‌های تحلیلی
فروپاشی (Ω')	توانایی جلوگیری از گسترش بحران و اختلالات دومینویی در سراسر سیستم‌های زیرساختی از طریق تشخیص زودهنگام
	وجود بازیگران و مدیران کلیدی که شرایط اختلال و بحران را کنترل و به مانایی سیستم‌های زیرساختی کمک بکنند.
	شناسایی و حفظ کارکردهایی که برای ادامه حداقل سطح مطلوبیت اجتماعی ضروری هستند.
	وجود استراتژی‌ها و برنامه‌های استراتژیک خلاقانه برای برآورده‌سازی نیازهای فوری بهنگام فروپاشی سیستم‌های زیرساختی حیاتی هنگام بحران
سازمان‌دهی مجدد (α)	میزانی که مدیریت و ساختار (سیستم زیرساختی حیاتی) می‌تواند شبکه و عناصر زیرمجموعه را بازسازی کند و سازمان‌های جدید را از درون توسعه دهد.
	دسترسی به منابع اضطراری در قالب سرمایه طبیعی، ساخته شده، انسانی، اقتصادی و اجتماعی در طول و پس از بحران.
	یادآوری تجربیات بحران و موفقیت‌های گذشته و داشتن ظرفیت یادگیری در منابع انسانی هدایت-کننده زیرساخت‌های حیاتی
	مجموعه‌ای از گره‌های متصل متراکم که به‌طور آزاد به زیرمجموعه‌های دیگر گره‌ها متصل هستند و هنگام تهدیدات توانایی جایگزینی دارند.

ادامه جدول ۲- مراحل و سنجه‌های تحلیلی تبیین کننده مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری. منبع: علیزاده و دامن باغ،۱۴۰۰، *Salvia & Quaranta, 2015 ،Holling, 2002 Kharrazi et al., 2016 ،Fath et al., 2015 Liu et al., 2022 ،Sundstrom & Allen, 2019*

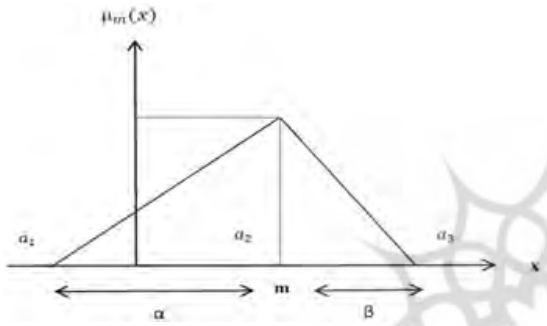
مرحله	سنجه‌های تحلیلی
بهره‌وری (r)	تغییر راهبردی در یک متغیر از سیستم‌های زیرساختی حیاتی، تغییرات بعدی مورد نیاز از همان نوع را تقویت می‌کند.
	شفافیت و جریان انعطاف‌مند اطلاعات در رده‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی سیستم برای تسهیل در تقویت و نیرومندسازی ضعف‌های سیستم‌های زیرساختی حیاتی
	ظهور و همکاری تعامل با سازمان‌ها و نهادهای ذینفع و غیر ذینفع برای تدوین چشم‌انداز تاب-آورانه سیستم زیرساختی حیاتی
	توانایی سازگاری با شرایط بحرانی و درس گرفتن از آسیب‌های گذشته برای انجام اقدامات سازنده در راستای تاب‌آوری سیستم‌های زیرساختی حیاتی
تعادل (k)	توسعه شبکه زیرساخت‌های حیاتی مبتنی بر ارتقای کیفیت و نوآوری و به‌روز بودن اجزای شبکه
	تنوع در ساختار، عملکرد و گزینه‌های ارائه شده توسط زیرساخت‌های حیاتی به شهروندان
	عدم اختلال در عملکرد شبکه زیرساختی حیاتی در صورت بروز اختلال و شوک‌های بیرونی
	داشتن نیروی انسانی و ساختار خلاق برای ارائه گزینه های متنوع و راه‌حل‌های پایدار برای زیرساخت‌های حیاتی

۷- ساختار ریاضی مدل شباهت به گزینه ایده‌آل فازی

تکنیک به کار رفته در پژوهش حاضر مدل شباهت به گزینه ایده‌آل فازی یا تاپسیس فازی می‌باشد که اولین بار توسط محققانی بنام چن و هوانگ برای تصمیم‌گیری درباره n معیار با m گزینه ارائه گردیده است. این مدل از چند مرحله برای تجزیه و تحلیل داده‌ها بهره می‌برد (عطایی، ۱۳۸۹). مرحله اول در این مدل تشکیل ماتریس تصمیم خواهد بود که به‌صورت زیر تشکیل می‌گردد.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix}$$

با توجه به سهولت محاسبه و دقت بالا از اعداد فازی مثلثی برای تحلیل در این تکنیک استفاده شد و عملکرد آن به‌صورت $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ خواهد بود.



شکل ۳- تابع عضویت اعداد مثلثی در محیط فازی (عطایی، ۱۳۸۹: ۴۸).

مرحله دوم در این مدل تعیین ماتریس وزن معیارها خواهد بود که از روابط زیر جهت حصول به این امر استفاده می‌گردد.

$$w_{j1} = min_k \{w_{jk1}\}$$

$$w_{j2} = \frac{\sum_{k=1}^{k} w_{jk2}}{k}$$

$$w_{j3} = max_k \{c_{jk1}\}$$

مرحله سوم بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم فازی می‌باشد که این مرحله با توجه به روابط زیر به انجام می‌رسد.

$$\tilde{r}_{ij} = \left[\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*}\right]$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left[\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{c_{ij}}\right]$$

در روابط بالا $c_j^* = max_i c_{ij}$ و $a_j^- = min_i a_{ij}$ خواهد بود. با توجه به روابط بالا ماتریس بی‌مقیاس شده فازی $(\tilde{R})$ به دست خواهد آمد که در مجموع با استفاده از رابطه زیر تشکیل می‌گردد:

$$\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{m\times n} \qquad I = 1,\ 2...,\ m$$

مرحله چهارم در بین شاخص‌های مورد محاسبه شاخص‌هایی با جنبه مثبت و شاخص‌هایی با جنبه منفی می‌باشد که در مدل پژوهش برای محاسبه وزن‌های اختصاص داده شده به آنها به‌ترتیب از روابط زیر استفاده می‌گردد.

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij}\tilde{w}_{ij} = \left\{\frac{a_{ij}}{c_i^*}.\frac{b_{ij}}{c_j^*}.\frac{c_{ij}}{c_j^*}\right\}.$$

$$(w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}) = \left\{\frac{a_{ij}}{c_j^*}, w_{i1}\frac{b_{ij}}{c_j^*}, w_{i2}\frac{c_{ij}}{c_j^*}, w_{i3}\right\}$$

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij}\tilde{w}_{ij} = \left\{\frac{a_j^-}{c_{ij}}.\frac{a_j^-}{b_{ij}}.\frac{a_j^-}{a_{ij}}\right\}.$$

$$(w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}) = \left\{\frac{a_j^-}{c_{ij}}, w_{i1}\frac{a_j^-}{b_j^*}, w_{i2}\frac{a_j^-}{a_{ij}}, w_{i3}\right\}$$

مرحله پنجم در این مدل محاسبه نزدیکی به ایده‌آل فازی (*FNIS: Fuzzy Negative Ideal Solution*) و ضد ایده‌آل فازی (*FNIS: Fuzzy Negative Ideal Solution*) است. این حالات به‌ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$A^* = \left[\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \ldots \tilde{v}_n^*\right]$$

$$A^- = \left[\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \ldots \tilde{v}_n^-\right]$$

در این روابط $\tilde{v}_1^*$ بهترین مقادیر شاخص‌ها و $\tilde{v}_1^-$ بدترین مقدار برای شاخص‌ها خواهد بود.

مرحله ششم محاسبه فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی خواهد بود که به‌ترتیب از روابط زیر برای آنها استفاده شده است.

$$S_i^* = \sum_{j=1}^{n} d = (\tilde{v}_{ij}, v_j^*)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^{n} d = (\tilde{v}_{ij}, v_j^-)$$

مرحله آخر در این مدل محاسبه شاخص شباهت خواهد بود که با استفاده از رابطه زیر خواهد بود.

$$cc_i = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}$$

۸-یافته‌های پژوهش

در این مرحله از پژوهش تلاش شد تا با استفاده از مدل شباهت به گزینه ایده‌آل فازی داده‌های به‌دست‌آمده از نظرات کارشناسان و متخصصان نسبت به اولویت و اهمیت هر یک از مراحل چهارگانه مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری در زیرساخت‌های حیاتی کلان‌شهر تبریز در پنج بعد آب، گاز، برق، مخابرات و حمل‌ونقل مشخص شود. در این راستا با به‌کارگیری مدل فازی در تحلیل داده‌ها، ابتدا تلاش شد تا وزن‌ها و ارزش‌گذاری انجام شده توسط کارشناسان به اعداد فازی مثلثی تبدیل شود. در جدول ۳ نحوه تبدیل و به‌کارگیری اعداد فازی مثلثی تشریح شده است.

جدول ۳- متغیرهای کلامی و اعداد متناظر مثلثی فازی.

متغیرهای کلامی (طیف لیکرت)	اعداد متناظر مثلثی فازی
خیلی ضعیف	۳، ۱، ۱
ضعیف	۵، ۳، ۱
متوسط	۷، ۵، ۳
مناسب	۹، ۷، ۵
خیلی مناسب	۹، ۷، ۷

در ادامه با توجه به ساختار مدل فازی تلاش شد تا ابتدا ماتریس بی‌مقیاس فازی و سپس ماتریس بی‌مقیاس شده موزون فازی برای سنجه‌های تحلیلی هر چهار مرحله مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری در زیرساخت‌های حیاتی پنج‌گانه کلان‌شهر تبریز تشریح شود. جداول مربوط ماتریس بی‌مقیاس شده موزون فازی برای چهار مرحله مدل در ادامه تشریح شده است. در جداول مربوطه اعداد فازی با توجه به جدول ۳ و تبدیل و تحلیل صورت گرفته به‌صورت مثلثی و در قالب حداقل وزن فازی (*Fuzzy min*) کارشناسان و متخصصان، میانگین وزن فازی (*Fuzzy mean*) کارشناسان و متخصصان و حداکثر وزن فازی (*Fuzzy max*) کارشناسان و متخصصان تشریح شده‌اند.

جدول ۴- ماتریس بی‌مقیاس شده موزون فازی برای سنجه‌های تحلیلی مرحله فروپاشی (Ω').

	برق	آب	گاز	مخابرات	حمل‌ونقل
Fuzzy Min	0.3333	0.5556	0.1111	0.5556	0.5556
Fuzzy Mean	2.456	5.0655	1.1234	4.6667	5.0256
Fuzzy Max	7	9	5	9	9
Fuzzy Min	0.3333	0.5556	0.1111	0.5556	0.5556
Fuzzy Mean	2.034	3.4701	1.1852	4.1083	4.2877
Fuzzy Max	7	9	5	9	9
Fuzzy Min	0.3333	0.5556	0.1111	0.5555	0.1111
Fuzzy Mean	2.12	3.2108	1.245	3.094	1.7009
Fuzzy Max	7	9	5	9	5
Fuzzy Min	0.3333	0.1111	0.1111	0.5555	0.1111
Fuzzy Mean	2.209	1.9829	1.0085	3.1197	1.735
Fuzzy Max	7	5	5	9	5

جدول ۵- ماتریس بی‌مقیاس شده موزون فازی برای سنجه‌های تحلیلی مرحله سازمان‌دهی مجدد (α).

	برق	آب	گاز	مخابرات	حمل‌ونقل
Fuzzy Min	0.1111	0.3333	0.1111	0.3333	0.3333
Fuzzy Mean	1.6781	1.9088	1.8376	3.1624	4.0741
Fuzzy Max	5	7	5	7	7
Fuzzy Min	0.1111	0.3333	0.1111	0.3333	0.3333
Fuzzy Mean	1.7607	2.8917	2.9772	3.0342	3.2051
Fuzzy Max	5	7	5	7	7
Fuzzy Min	0.1111	0.556	0.1111	0.556	0.556
Fuzzy Mean	1.9724	3.1069	1.2498	2.6823	3.0985
Fuzzy Max	5	9	5	9	9
Fuzzy Min	0.1111	0.556	0.556	0.556	0.556
Fuzzy Mean	1.1658	3.0901	1.3339	3.4012	3.5189
Fuzzy Max	5	9	5	9	9

جدول ۶- ماتریس بی‌مقیاس شده موزون فازی برای سنجه‌های تحلیلی مرحله بهره‌وری (r).

	برق	آب	گاز	مخابرات	حمل‌ونقل
Fuzzy Min	0.3333	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
Fuzzy Mean	2.354	1.312	1.718	1.774	1.873
Fuzzy Max	5	5	5	5	5
Fuzzy Min	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333
Fuzzy Mean	2.609	1.678	1.811	3.009	3.023
Fuzzy Max	7	7	7	7	7
Fuzzy Min	0.556	0.556	0.556	0.556	0.556
Fuzzy Mean	3.3255	3.1279	3.3928	3.1237	3.2751
Fuzzy Max	9	9	9	9	9
Fuzzy Min	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111
Fuzzy Mean	2.541	1.256	1.309	1.291	1.401
Fuzzy Max	5	9	5	9	9

جدول ۷- ماتریس بی‌مقیاس شده موزون فازی برای سنجه‌های تحلیلی مرحله تعادل (k).

	برق	آب	گاز	مخابرات	حمل‌ونقل
Fuzzy Min	0.1111	0.3333	0.1111	0.1111	0.5555
Fuzzy Mean	2.099	3.001	1.718	1.774	3.873
Fuzzy Max	5	5	5	5	9
Fuzzy Min	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.5555

ادامه جدول ۷- ماتریس بی‌مقیاس شده موزون فازی برای سنجه‌های تحلیلی مرحله تعادل (k).

	برق	آب	گاز	مخابرات	حمل‌ونقل
Fuzzy Mean	2.210	1.312	1.718	1.774	3.456
Fuzzy Max	5	5	5	5	9
Fuzzy Min	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.5555
Fuzzy Mean	2.045	1.312	1.718	1.774	3.567
Fuzzy Max	5	5	5	5	9
Fuzzy Min	0.1111	0.1111	0.1111	0.1111	0.5555
Fuzzy Mean	2.045	1.312	1.718	1.774	3.567
Fuzzy Max	5	5	5	5	9

بعد از تشریح ماتریس بی‌مقیاس موزون فازی حاصل از نظرات کارشناسان در مورد کیفیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی کلان‌شهر تبریز که برای هر چهار مرحله در قالب سنجه‌های تحلیلی انجام شده، کمترین وزن فازی، میانگین وزن فازی و حداکثر وزن فازی برای هر پنج زیرساخت حیاتی نشان‌دهنده کیفیت ظرفیت آنها در قالب مراحل یاد شده از دیدگاه کارشناسان بوده است. برای درک صحیح از فرایند و ظرفیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی مطابق با مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری در ادامه تلاش شد شاخص فاصله از ایده‌آل مثبت (D^+) و شاخص ایده‌آل منفی (D^-) و همچنین شاخص شباهت فازی نهایی (CC_i) برای زیرساخت‌های حیاتی در چهار مرحله مدل تشریح شود. در این راستا با تجمیع وزن سنجه‌های تحلیلی، اولویت‌های هر چهار مرحله برای زیرساخت‌های حیاتی بر اساس وزن نهایی که از شاخص شباهت فازی نهایی مطابق با آخرین مرحله مدل فازی استنباط می‌شود تشریح شده است.

تحلیل نهایی فازی وضعیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی کلان‌شهر تبریز در مرحله اول چرخه سازگاری

جدول ۸- اولویت‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهری در مرحله فروپاشی (Ω').

زیرساخت‌ها	D^+	D^-	CC_i	اولویت نهایی
برق	26.278	27.704	0.5132	2
آب	27.123	32.593	0.5457	3
گاز	20.438	19.987	0.4944	1
مخابرات	30.219	36.196	0.5449	4
حمل‌ونقل	23.153	29.079	0.5567	5

تاب‌آوری یعنی مرحله فروپاشی که اولین مرحله بعد از رخداد شوک یا تهدید یا بروز بحران در سیستم‌های زیرساختی است نشان می‌دهد که زیرساخت حیاتی گاز با کسب کمترین وزن نهایی فازی (۰/۴۹۴۴)، از دیدگاه متخصصان و کارشناسان پژوهش دارای اولویت بیشتری نسبت به سایر زیرساخت‌ها برای توجه و برنامه‌ریزی در راستای ارتقای ظرفیت مانایی برای تاب‌آوری در مرحله فروپاشی است.

علت این مسئله این است که این زیرساخت و سیستم ساختاری و کارکردی مربوط به آن بر اساس توانایی جلوگیری از گسترش بحران، وجود بازیگران و مدیران کلیدی برای هدایت و کنترل بحران در سیستم‌های توزیع و کنترل فشار، شناسایی و حفظ کارکردهایی که برای ادامه حداقل سطح مطلوبیت و همچنین وجود برنامه‌های استراتژیک و خلاقانه برای حفظ کارکرد و ادامه جریان در شبکه در وضعیت مناسبی در کلان‌شهر تبریز قرار ندارد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از دیدگاه متخصصان و کارشناسان پژوهش، زیرساخت برق در این مرحله در رتبه دوم اهمیت و زیرساخت آب در رتبه سوم اولویت قرار گرفته‌اند.

نتیجه‌ای که نشان می‌دهد فرایند برنامه‌ریزی تاب‌آورانه در اولین مرحله از رخداد شوک در سیستم‌های زیرساختی به‌خصوص در بخش انرژی در کلان‌شهر تبریز با ضعف‌های اساسی و پیچیدگی روبه‌روست و نیازمند تفکر اساسی در زمینه ارتقای ظرفیت‌های مانایی و مقاومت با توجه به سنجه‌های تحلیلی یاد شده است.

جدول ۹- اولویت‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهری در مرحله سازمان‌دهی مجدد (α).

زیرساخت‌ها	D^+	D^-	CC_i	اولویت نهایی
برق	18.605	20.526	0.5045	2
آب	28.607	31.628	0.5250	3
گاز	17.390	20.383	0.5396	1
مخابرات	27.585	32.053	0.5374	4
حمل‌ونقل	26.371	32.670	0.5533	5

نتایج نهایی به‌دست‌آمده برای مرحله دوم مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری که همان مرحله سازمان‌دهی مجدد است، نشان می‌دهد که از دیدگاه کارشناسان پژوهش، زیرساخت حیاتی برق با کمترین وزن فازی (۰/۵۰۴۵) در این مرحله مواجه شده است. این مرحله که نیازمند ارتقای ظرفیت بازیابی برای تاب‌آوری است نشان می‌دهد که سیستم زیرساختی برق برای بازیابی بعد از شوک دچار چالش‌های جدی است و زمان بازیابی آن طولانی‌تر از سازگاری مد نظر برای تاب‌آوری این زیرساخت در کلان‌شهر تبریز است. این نتیجه بیانگر این مهم است که زیرساخت حیاتی برق به لحاظ کارکردهای تاب‌آورانه در مرحله سازمان‌دهی مجدد یعنی دسترسی به منابع اضطراری در قالب سرمایه طبیعی، مصنوع، انسانی، اقتصادی و اجتماعی، ظرفیت یادگیری از تجربه شوک‌های گذشته در منابع انسانی هدایت کننده زیرساخت حیاتی برق و افزونگی ساختاری بهینه و پایدار برای رفع نیازهای شبکه هنگام شوک و بعد از آن دچار چالش جدی است و در این مرحله از اولویت بالایی برای بهبود ضعف‌ها برای ارتقای ظرفیت بازیابی در کلان‌شهر تبریز برخوردار است.

در این مرحله، مطالب با دیدگاه کارشناسان پژوهش، زیرساخت حیاتی آب و مخابرات نیز به‌ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار دارد و نشان می‌دهد که تنوعی از زیرساخت‌ها از منظر انرژی، زیرساخت‌های فنّاورانه دچار چالش در بحث بازیابی بعد از شوک یا حادثه اختلال‌گر در سیستم زیرساختی است.

نتایج تحلیل فازی مربوط به مرحله بهره‌وری که سومین مرحله از مراحل چهارگانه مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری است، نشان می‌دهد که از منظر کارشناسان پژوهش، زیرساخت حیاتی آب با کسب کمترین وزن فازی (۰/۵۰۲۹) در این مرحله که نیازمند ایجاد ظرفیت تاب‌آوری مبتنی بر رشد است، دچار چالش است. این مرحله شبیه آن است که بعد از رخداد شوک و سپری شدن مرحله بازیابی سیستم بایستی چه ویژگی‌هایی از خود نشان دهد تا به سمت پایداری و رفع نواقص و آسیب‌ها بپردازد. نتایج این مرحله گویای این واقعیت است که زیرساخت حیاتی آب در کلان‌شهر تبریز در برآورده ساختن تغییرات راهبردی برای داشتن جهش در رشد ساختاری و کیفیت عملکردی، شفافیت و جریان انعطاف‌پذیر اطلاعات در رده‌های مدیریتی سیستم زیرساختی آب‌رسانی کلان‌شهر تبریز، تعامل با سازمان‌ها و نهادهای ذینفع و غیر ذینفع برای تدوین چشم‌انداز تاب‌آورانه و توانایی سازگاری با شرایط بحرانی و درس گرفتن از آسیب‌های گذشته برای انجام اقدامات سازنده مبتنی بر رشد در راستای تاب‌آوری سیستم دچار چالش و عقب‌افتادگی است.

جدول ۱۰- اولویت‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهری در مرحله بهره‌وری (γ).

زیرساخت‌ها	D^+	D^-	CC_i	رتبه نهایی
برق	23.411	26.312	0.5291	4
آب	25.377	25.683	0.5029	1
گاز	24.6493	25.916	0.5125	2
مخابرات	23.370	26.202	0.5285	3
حمل‌ونقل	23.076	26.312	0.5327	5

جدول ۱۱- اولویت‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهری در مرحله تعادل (k).

زیرساخت‌ها	D^+	D^-	CC_i	رتبه نهایی
برق	20.533	19.968	0.4930	4
آب	20.734	19.921	0.4899	1
گاز	18.383	20.584	0.5282	2
مخابرات	18.189	20.655	0.5317	3
حمل‌ونقل	20.643	19.946	0.4914	5

نتایج نهایی تحلیل فازی برای مرحله چهارم چرخه سازگاری تاب‌آوری که با کیفیت‌ترین مرحله در مدل یاد شده است نشان می‌دهد که از دیدگاه کارشناسان پژوهش، زیرساخت حیاتی آب با کسب کمترین وزن در این مرحله

نیز به‌مانند مرحله قبلی دارای اولویت اساسی است. نتایج این مرحله گویای این مهم است که کمیت و کیفیت در رشد زیرساختی و در نهایت توسعه زیرساختی چه از بُعد ساختاری و چه از بُعد عملکرد شبکه برای زیرساخت حیاتی آب در کلان‌شهر تبریز ضروری است؛ بنابراین می‌توان گفت که زیرساخت حیاتی آب در کلان‌شهر تبریز از منظر توسعه شبکه‌ای مبتنی بر ارتقای کیفیت و نوآوری، تنوع در ساختار، عملکرد و گزینه‌های ارائه شده، عدم اختلال در عملکرد شبکه زیرساختی حیاتی در صورت بروز اختلال و شوک‌های بیرونی و داشتن نیروی انسانی و ساختار خلاق برای ارائه گزینه‌های متنوع و راه‌حل‌های پایدار دچار چالش و ضعف برای رسیدن به ظرفیت رشد و توسعه در قالب تاب‌آورانه آن در کلان‌شهر تبریز است.

۹- بحث و نتیجه‌گیری

تاب‌آوری رویکردی مانا و انعطاف‌مند در مواجهه با تهدیدها، بحران‌ها و شوک‌های مخرب برای سیستم‌های کلان اکولوژیکی-اجتماعی مانند شهرها و زیرساخت‌های حیاتی آنها مانند زیرساخت‌های انرژی و منابع طبیعی و حمل‌ونقل می‌باشد. مطالعات پیشین تأکید گسترده‌ای بر استراتژیک بودن رویکرد تاب‌آوری و قلمداد شدن آن به‌عنوان پاسخی سازگار در برابر تهدیدات و مخاطرات کرده‌اند. علیزاده و شریفی (۲۰۲۰)، ضمن تأکید بر پیچیدگی زیرساخت‌های حیاتی چه از بعد ساختاری و چه از بعد عملکردی تاب‌آوری را رویکردی انعطاف‌پذیر و سازگار برای این زیرساخت‌ها جهت مواجهه با مخاطرات قلمداد کرده‌اند. با توجه به اهمیت رویکرد تاب‌آوری در سیستم‌های مهندسی و اکولوژیکی-اجتماعی و زیرساختی، چارچوب‌های تحلیلی و مدل‌های متعددی برای سنجش و برآورد آن در قالب سیستم‌های مختلف صورت پذیرفته است. یکی از این مدل‌ها چرخه سازگاری تاب‌آوری است که توسط هالینگ با رویکرد اکولوژیکی ارائه شده است. در این راستا مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که فث و همکاران (۲۰۱۵) از این مدل برای تحلیل زیرساخت‌ها و سیستم‌های پیچیده اجتماعی برای شناخت ظرفیت تاب‌آوری آنها در چهار مرحله فروپاشی، سازمان‌دهی مجدد، بهره‌وری و تعادل استفاده کرده‌اند. علیزاده (۱۴۰۰) از این مدل برای ارزیابی تاب‌آوری و ظرفیت ساختاری زیرساخت‌های حیاتی برای مواجهه با بحران در زیرساخت‌های حیاتی در کلان‌شهر اهواز استفاده کرده است. گرون بورن و همکاران (۲۰۱۷) از این مدل برای ارزیابی تاب‌آوری اجتماعی در نواحی کشاورزی اروپای مرکزی بهره برده‌اند. همچنین، ژیو و همکاران (۲۰۲۳) نیز از این مدل برای ارزیابی تاب‌آوری فرم شهری در برابر تغییرات اقلیمی در چین بهره برده‌اند. مطالعات یاد شده بر اهمیت این مدل در شناخت ظرفیت تاب‌آوری در سیستم‌های مختلف تأکید کرده‌اند. در این راستا پژوهش حاضر تلاش کرد تا با استفاده از مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری نشان دهد که ظرفیت تاب‌آوری زیرساخت‌های تاب‌آوری بر اساس چهار مرحله فروپاشی، سازمان‌دهی مجدد، بهره‌وری و تعادل چگونه می‌باشد. با نظرسنجی از متخصصان و به‌کارگیری مدل شباهت به گزینه ایده‌آل فازی (*FTOPSIS*) نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که زیرساخت‌های انرژی یعنی گاز و برق به‌ترتیب در مراحل اولیه مدل سازگاری تاب‌آوری یعنی فروپاشی و سازمان‌دهی مجدد که نیازمند ظرفیت مقاومت و بازیابی است، دچار ضعف و چالش هستند و اولویت اول برنامه‌ریزی برای بهبود شرایط هستند. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، در مطالعه علیزاده (۱۴۰۰) بر روی زیرساخت‌های حیاتی کلان‌شهر اهواز با رویکرد چرخه سازگاری تاب‌آوری نیز، زیرساخت‌های انرژی در مراحل اول و دوم چرخه سازگاری تاب‌آوری (فروپاشی و بازیابی) دچار ضعف بودند. این مسئله نشان از اهمیت و البته چالش اساسی شهر از منظر زیرساخت‌های انرژی برای ساخت سیستم تاب‌آور و سازگار با مخاطرات به‌خصوص در حین وقوع حادثه و توان بازیابی بعد از آن است. نکته بعدی این بود که زیرساخت حیاتی آب مطابق با دیدگاه کارشناسان در کلان‌شهر تبریز در دو مرحله بعدی مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری یعنی بهره‌وری و تعادل دچار چالش بوده و دارای اولویت اساسی برای برنامه‌ریزی در راستای تاب‌آورسازی آن است. این نتیجه در مطالعه لیو و همکاران (۲۰۲۲) نیز مورد تأیید قرار گرفته است. این چالش می‌تواند در عدم برآورده شدن نیاز واقعی این زیرساخت برای ایجاد ظرفیت رشد و توسعه جستجو کرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده،

پیشنهادهای زیر برای ارتقا و بهبود ظرفیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی کلان‌شهر تبریز پیشنهاد می‌شود:

- توجه ویژه برای ایجاد ظرفیت ماندگاری از طریق کنترل رخدادهای دومینویی با ارائه آمادگی و خلاقیت ساختاری و خلق گره‌گاهای جایگزین در زیرساخت حیاتی گاز در کلان‌شهر تبریز برای مواجهه سازگارانه به هنگام وقوع تهدیدات و قرارگیری در مرحله فروپاشی ساختاری و عملکردی؛
- برنامه‌ریزی برای تقویت ظرفیت بازیابی در زیرساخت حیاتی برق برای کاهش زمان برگشت به فعالیت و جریان شبکه‌ای مداوم در شهر از طریق دسترسی به منابع اضطراری لازم و ظرفیت یادگیری از تجربیات مشابه مواجهه با بحران؛
- سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی برای ارتقای ظرفیت رشد و توسعه در زیرساخت حیاتی آب از طریق رشد کمی و پایدار شبکه و توجه به نوآوری‌های دانش‌بنیان، خلاقانه و هوشمند در توسعه زیرساخت حیاتی آب در کلان‌شهر تبریز.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱۰- مراجع

[۱] امان‌پور، سعید، صفایی‌پور، مسعود، ملکی، سعید و علیزاده، هادی. (۱۳۹۸). تبیین چالش‌های ساختاری در طرح‌ریزی راهبردی توسعهٔ شهری کلان‌شهر اصفهان. آمایش سرزمین، ۱۱(۱)، ۲۹-۵۶.

[۲] بتی‌ای. بیرینگر، اریک‌دی. ووگرین، دریک‌ای. وارن (۱۴۰۰). امنیت و تاب‌آوری شبکه زیرساخت‌های حیاتی، ترجمه غلامرضا جلالی فراهانی، محمدعلی نکوئی، آرش علی عباس زاده، محمدحسین توفیقی، زهرا تقی‌پور، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر. تهران.

[۳] بسطامی‌نیا امیر، رضایی محمدرضا، سرایی محمدحسین (۱۳۹۷). تبیین و تحلیل تاب‌آوری اجتماعی برای مقابله با سوانح طبیعی. دانش پیشگیری و مدیریت بحران. ۸(۳): ۲۰۹-۲۲۴

[۴] جلالی فراهانی، غلامرضا، محمدعلی نکویی، احمد آب‌پرور (۱۴۰۱). تاب‌آوری زیرساخت‌های آب شرب کشور با رویکرد پدافند غیرعامل، فصلنامه مطالعات دفاعی استراتژیک، ۲۰(۹۰)، ۱۱۵-۱۳۶.

[۵] عسکرپور، علی و کازرونی، محمدعلی و مؤمنی رق‌آبادی، مهدی (۱۳۹۶). مروری بر دیدگاه‌های تاب‌آوری در شریان‌های حیاتی شهری (با تأکید بر تاب‌آوری شریان‌های حیاتی شهر کرمان)، اولین کنفرانس ملی تاب‌آوری شریان‌های حیاتی و زیرساخت‌های عمرانی، کرمان

[۶] عطایی، محمد (۱۳۸۹). تصمیم‌گیری چند معیاره فازی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۷] علیزاده، هادی (۱۴۰۰). تحلیل و شناخت ظرفیت تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی شهری بر اساس مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری (RAC) در کلان‌شهر اهواز. پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری، ۹(۴)، ۱۱۰۳-۱۱۲۳.

[۸] علیزاده، هادی و دامن‌باغ، صفیه (۱۴۰۰). تحلیل ظرفیت تاب‌آوری در سیستم حمل‌ونقل شهری بر اساس مدل چرخه سازگاری تاب‌آوری (RAC) مطالعه‌ای در کلان‌شهر اهواز، چهارمین کنفرانس بین‌المللی و پنجمین کنفرانس ملی عمران، معماری، هنر و طراحی شهری، تبریز.

[۹] فرزاد بهتاش، محمدرضا، کی‌نژاد، محمدعلی، پیربابایی، محمد تقی و عسگری، علی (۱۳۹۲). ارزیابی و تحلیل ابعاد و مؤلفه‌های تاب‌آوری کلان‌شهر تبریز، نشریه هنرهای زیبا، ۱۸(۳)، ۳۳-۴۲.

[۱۰] کریمی، فاطمه و سمانه جلیلی صدرآباد (۱۳۹۸). بررسی جایگاه شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در فرآیند چرخه‌ای تاب‌آوری و در هم کنش آن‌ها از نظر متخصصان، مجله شهر ایمن، ۲(۸)، ۶.

[۱۱] محمدی ده‌چشمه، مصطفی، علیزاده، هادی و عباسی گوجانی، داود (۱۳۹۸). تحلیل فضایی شاخص‌های تبیین‌کننده‌ی تاب‌آوری در زیرساخت شریانی حمل‌ونقل (مطالعه‌ی موردی: کلان‌شهر اهواز). پژوهش‌های جغرافیای برنامه‌ریزی شهری، ۷(۲)، ۳۷۵-۳۹۱.

[۱۲] یوسفی شهیر، هانیه، محمدرضا پورمحمدی، حسین کریم زاده دلیر (۱۳۹۸). سنجش تاب‌آوری مکانی کاربری‌های حیاتی با تأکید بر شبکه ارتباطی در برابر خطر وقوع زمین‌لرزه (مورد مطالعه: کلان‌شهر تبریز)، نشریه مدیریت شهری، ۱۸(۵۶)، ۱۹-۳۳.

[13] Alizadeh, H., & Sharifi, A. (2020). Assessing resilience of urban critical infrastructure networks: A case study of Ahvaz, Iran. Sustainability, 12(9), 3691.

[14] Andrew, L. (2020). The vulnerability of vital systems: how 'critical infrastructure' became a security problem. In Securing ‘the Homeland’ (pp. 17-39). Routledge.

[15] Fath, B.D., Dean, C.A., & Katzmair, H. (2015). Navigating the adaptive cycle: an approach to managing the resilience of social systems. Ecology and Society, 20(2).

[16] Gronenborn, D., Strien, H.C., & Lemmen, C. (2017). Population dynamics, social resilience strategies, and Adaptive Cycles in early farming societies of SW Central Europe. Quaternary International, 446, 54-65.

[17] Kharrazi, A., Fath, B.D., & Katzmair, H. (2016). Advancing empirical approaches to the concept of resilience: A critical examination of panarchy, ecological information, and statistical evidence. Sustainability, 8(9), 935.

[18] Liu, H., Gao, C., & Wang, G. (2022). Considering the adaptive cycle and resilience of the ecosystem to define reference conditions for wetland restoration. Earth's Future, 10(4), e2021EF002419.

[19] Osei-Kyei, R., Tam, V., Ma, M., & Mashiri, F. (2021). Critical review of the threats affecting the building of critical infrastructure resilience. International Journal of Disaster Risk Reduction, 60, 102316.

[20] Peng, C., Yuan, M., Gu, C., Peng, Z., & Ming, T. (2017). A review of the theory and practice of regional resilience. Sustainable Cities and Society, 29, 86-96.

[21] Pursiainen, C. (2018). Critical infrastructure resilience: A Nordic model in the making?. International Journal of Disaster Risk Reduction, 27, 632-641.

[22] Rehak, D., Senovsky, P., Hromada, M., & Lovecek, T. (2019). Complex approach to assessing resilience of critical infrastructure elements. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 25, 125-138.

[23] Rocchetta, R. (2022). Enhancing the resilience of critical infrastructures: Statistical analysis of power grid spectral clustering and post-contingency vulnerability metrics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 159, 112185.

[24] Salvia, R., & Quaranta, G. (2015). Adaptive cycle as a tool to select resilient patterns of rural development. Sustainability, 7(8), 11114-11138.

[25] Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2016). Urban resilience assessment: Multiple dimensions, criteria, and indicators. Urban resilience: A transformative approach, 259-276.

[26] Silvast, A., Kongsager, R., Lehtonen, T.K., Lundgren, M., & Virtanen, M. (2021). Critical infrastructure vulnerability: a research note on adaptation to climate change in the Nordic countries. Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography, 121(1), 79-90.

[27] Sundstrom, S.M., & Allen, C.R. (2019). The adaptive cycle: More than a metaphor. Ecological Complexity, 39, 100767.

[28] Wells, E.M., Boden, M., Tseytlin, I., & Linkov, I. (2022). Modeling critical infrastructure resilience under compounding threats: a systematic literature review. Progress in Disaster Science, 100244.

[29] Xie, W., Sun, C., & Lin, Z. (2023). Spatial-temporal evolution of urban form resilience to climate disturbance in adaptive cycle: A case study of Changchun city. Urban Climate, 49, 101461.

[30] Zhang, X.Q. (2016). The trends, promises and challenges of urbanization in the world. Habitat International, 54, 241-252.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی