نشریه‌ی علمی-پژوهشی شهر ایمن
JOURNAL OF RESILIENT CITY
(JRC)

بررسی جایگاه شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت های شهری در فرآیند چرخه‌ای تاب آوری و در هم کنش آن‌ها از نظر متخصصان

فاطمه کریمی[۱]؛ سمانه جلیلی‌صدرآباد[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی شهری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
Email:fateme.karimi22@yahoo.com
۲- استادیار شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
Email:s_jalili@iust.ac.ir

واژگان کلیدی
تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری
زیرساخت شهری
تداوم عملکرد
وابستگی متقابل
جذب
بازیابی

چکیده

یکی از چالش‌های اصلی در طول زندگی بشر مواجهه با حوادث (طبیعی و انسانی) می‌باشد. در سال‌های اخیر وقوع این‌گونه حوادث، پیکره شهرها به ویژه زیرساخت‌های شهری را با خسارت روبرو کرده است. یکی از رویکردهای مطرح در برابر این حوادث، تاب‌آوری شهری می‌باشد. از این رو، این پژوهش با روش توصیفی – تحلیلی، ابتدا به جمع آوری شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری و سپس به تحلیل و تعیین اهمیت معیارها با استفاده از تکنیک دلفی، روش تحلیل شبکه‌ای (*ANP*) و نرم‌افزار *Super Decision* می‌پردازد. با توجه به نتایج پژوهش، تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری مفهومی نوین و چندجانبه می‌باشد؛ که در کنار توانمندسازی اولیه، به برگشت‌پذیری و تداوم عملکرد توجه دارد. تاب‌آوری از ویژگی‌های ذاتی زیرساخت‌ها و طراحی و برنامه‌ریزی آن‌ها به صورت تاب‌آور جهت دستیابی به شهر تاب‌آور از الزامات می‌باشد؛ زیرا درصورت وقوع تهدیدات، وابستگی متقابل زیرساخت‌ها منجربه اختلال آبشاری کل سیستم می‌شود. تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری دارای چرخه پیش‌گیری، جذب، بازیابی و سازگاری می‌باشد. همچنین از بین شاخص‌ها به ترتیب مدت زمان 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.

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های اساسی در جهت نیل به پایداری در شهرها رخدادهای طبیعی و غیرطبیعی می‌باشد که در صورت عدم آگاهی و آمادگی لازم می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری را به ابعاد مختلف شهرها وارد کند (*Brein et all,2004:193-225*) در سال‌های اخیر، وقوع این‌گونه حوادث در شهرها، پیکره‌ی آن‌ها به‌ویژه زیرساخت‌های شهری را با خسارات فراوانی روبرو کرده است. در این شهرها به دلیل برنامه‌ریزی نامناسب و نبود پشتیبانی فنی امکان بهبود زیرساخت‌های شهری و بازگشت به حالت اولیه وجود ندارد.

* میدان رسالت، خیابان هنگام، دانشگاه علم و صنعت ایران ، دانشکده معماری و شهرسازی، طبقه دوم، شماره تلفن: ۷۳۲۲۸۲۹۷-۰۲۱، یارانامه: s_jalili ATiust.ac.ir

به‌طوری‌که چگونگی رویارویی با این سوانح، محدود و قابل جبران نمودن تبعات آن از مسائل مهم مطرح می‌باشد (بهرامی و همکاران، ۴۶:۱۳۹۶). در این شرایط که این‌گونه خطرات و عدم قطعیت‌ها در حال رشد است، رویکرد تاب‌آوری برای مواجهه با مشکلات شناخته‌شده و ناشناخته مطرح می‌باشد.

تاب‌آوری به‌منزله ارتقا توانایی جامعه، برنامه‌ریزی و آمادگی برای جذب و بهبود وضعیت مقابله با اثرات سوانح و ترمیم جامعه آسیب‌دیده است. یکی از ابعاد ۴ گانه مفهوم تاب‌آوری در شهرها، بعد کالبدی - محیطی که شامل شبکه‌های ارتباطی و جاده‌ای، تأسیسات خطرناک، شریان‌های حیاتی (آب، گاز، برق و مخابرات) و تجهیزات شهری (آتش‌نشانی و غیره) می‌باشد (بهرامی و همکاران، ۴۶:۱۳۹۶). مردم جهت ادامه حیات خود متکی به شبکه پیچیده‌ای از این موارد هستند. به طور معمول انتظار می‌رود این زیرساخت‌ها به صورت مداوم به عملکرد خود ادامه داده و از نظر فنی دچار خلل و مشکلی نشوند. اختلال در هریک از آن‌ها پیامدهای منفی داشته و می‌تواند اقدامات پس از بحران را نیز متوقف کند. برای مثال تخریب شریان‌های حیاتی و راه‌های ارتباطی، ارتباط سکونتگاه‌ها با بیرون را قطع کرده و خسارات مالی- جانی زیادی را به دنبال دارد. از طرفی برای دستیابی به تاب‌آوری می‌توان توانایی زیرساخت‌ها را در ارائه عملکرد خدمات‌رسانی در زمان بحران و پس از وقوع آن افزایش داد. به طوری که قبل، درهنگام و پس از وقوع زیرساخت‌ها به وظیفه‌ی خود عمل کرده و سیستم در بعد فنی از پشتیبانی لازم برخوردار باشد.

سازمان‌های بین‌المللی برای کاهش بلایا راهبردهایی با رویکرد تاب‌آوری جوامع را در زمره اهداف خود قرار داده و آن را در چارچوب هیوگو برای سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۵در نظر گرفته‌اند. به‌رغم تلاش‌های صورت گرفته برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری میزان خسارات مالی- جانی در شهرها ازجمله شهرهای ایران رو به افزایش است (*Zhou,2010:23*). اسکاپ در گزارش سوانح مرتبط با مخاطرات تکنونیکی ایران را جزو ده کشور اول دنیا و از حیث مرگ‌ومیر ناشی از این مخاطرات جایگاه ایران را بین رتبه اول تا سوم جهان ذکر می‌کند (فرزاد بهتاش و همکاران،۳۴:۱۳۹۲). مدیریت سوانح طبیعی پس از رخداد سانحه در ایران در شرایط مطلوبی قرار ندارد و پس از وقوع حوادثی همچون زلزله بم و سیل در استان‌های شمال و شمال غربی کشور آسیب‌های زیادی به مردم وارد شد. از مشکلات اساسی این شهرها پس از حوادث می‌توان تأمین انرژی، آب، غذا و قطعی شبکه‌های مخابراتی، راه‌های ارتباطی و نبود اسکان موقت را نام برد که اقدامات پس از بحران و بازگشت به شرایط متعادل را سخت کرده بود. درواقع زیرساخت‌های شهری به‌عنوان پایه و بستر شکل‌گیری شهرها از اهمیت بالایی برخوردار بوده و ممکن است پس از حوادث، به دلیل نبود زیرساخت‌های مناسب و تأسیسات خطرناک حوادث دیگری همچون آتش‌سوزی و غیره اتفاق بیافتد. به طوری که پژوهش رمضان زاده لسبوئی و همکاران (۱۳۹۲) با شاخص‌های زیرساختی شامل برخورداری از شبکه آب، برق، گاز، دسترسی به مراکز درمانی، آتش‌نشانی، اسکان موقت، نیروی انتظامی، شبکه راه‌ها و مراکز اضطراری، نشان‌دهنده رابطه همبستگی زیرساخت‌های شهری و تاب‌آوری با سطح اطمینان ۹۹٪ می‌باشد. *Ouyang et al(2012)* نیز دست یافته‌اند که تحت منابع محدود، مراحل بازگشت نقش اساسی در بهبود تاب‌آوری دارند و در هنگام وجود منابع کافی، اطمینان از بهبودی و بازگشت سریع، بدون توجه به ترتیب مراحل بازگشت آن‌ها است. اغلب پژوهش‌های صورت گرفته تاکنون تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری را در برابر بلایای طبیعی مورد بررسی قرار داده اند؛ درصورتی‌که می‌توان این موضوع را در دو نوع تهدیدات طبیعی و انسانی مورد بررسی قرارداد. همچنین تاکنون در مطالعات داخلی چرخه تاب‌آوری، چگونگی عملکردآن و جایگاه شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت های شهری در فرآیند آن بررسی نشده است. به همین منظور این پژوهش به دنبال بررسی جایگاه شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در چرخه تاب‌آوری از نظر متخصصان می‌باشد.

۲- تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

مفاهیم و مبانی مرتبط با پژوهش شامل تهدیدات، تاب‌آوری، زیرساخت‌های شهری و تاثیر متقابل آن‌ها، فرآیند، اصول و شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری به شرح زیر می‌باشد.

۲-۱-تهدیدات

تهدیدات در برابر شهرها در ادبیات راهبردی به دو نوع،

تهدید طبیعی و انسانی تقسیم می‌شود. درک نوع و ضریب تأثیر هر تهدید حیاتی است. منشأ تهدیدات طبیعی، طبیعت است که درنتیجه فعل و انفعالات خود تهدیداتی همانند سیل، زلزله، خشک‌سالی، آتش‌فشان و غیره را منجر می‌شوند. منشأ تهدیدات انسانی، یک انسان، یک کشور یا گروهی از انسان‌ها هستند که به‌صورت عمدی یا غیرعمدی تهدیدات همانند انفجار شیمیایی، نشست مواد شیمیایی، آلودگی هوا، بحران‌های سیاسی، حملات هوایی و موشکی و حملات تروریستی را منجر می‌شوند (حق‌جو، ۱۳۹۷)

۲-۲- تاب‌آوری

واژه تاب‌آوری از ریشه لاتین "*Resilio*" به معنای "برگشت به عقب" گرفته‌شده است (*Klein et al,2003*). در سال ۱۹۷۳، هولینگ واژه "تاب‌آوری" را به‌عنوان ظرفیت کاهش یا توانایی یک سیستم برای جذب نابسامانی و یا قدرت جذب تخریباتی که می‌تواند قبل از تغییر ساختارهای یک سیستم در اثر تغییر متغیرها و فرایندهای کنترل رفتار آن جذب شوند، تعریف می‌کند(*Amaratunga & Haigh,2001:1-11*). برونئو و همکاران (۲۰۰۳) تاب‌آوری را افزایش توانایی زیرساخت‌های اجتماع، به‌ویژه زیرساخت‌های حیاتی در روند تداوم فعالیت آن‌ها هنگام وقوع حوادث و پس‌ازآن تعریف کرده‌اند. چنگ (۲۰۱۴) این مفهوم را امکان جذب شوک‌های ناشی از بحران به‌منظور تداوم فعالیت عملکردی زیرساخت‌ها برای خدمات‌دهی به شهروندان تعریف می‌کند(علوی و دیگران، ۹۷۹:۱۳۹۵).

رفیعیان و همکاران (۱۳۸۹) ظرفیت و جذب نیروهای مخرب ناشی از سوانح به‌وسیله پایداری و سازگاری، همچنین حفظ ساختارها و عملکرد اساسی سیستم یا جامعه را به‌عنوان تعریف مفهوم تاب‌آوری مطرح کرده‌اند. مفهوم تاب‌آوری جامعه در برابر سوانح از نظر (*Mayunge, 2007*) ظرفیت یا توانایی جامعه برای پیش‌بینی، آمادگی، پاسخ و بازیابی سریع از اثرات سوانح می‌باشد؛ یعنی نه‌تنها اندازه‌گیری سرعت بازیابی جامعه از اثرات سوانح، بلکه توانایی آموزش، مواجهه و سازگاری با مخاطرات نیز است. همچنین در گزارش سازمان ملل متحد در سال ۲۰۰۹ به نام راهبرد جهانی کاهش خطرپذیری بلایا، تاب‌آوری قابلیت سیستم یا جامعه مواجه با مخاطرات، در جذب، انطباق و پایداری در برابر آثار مخاطرات در مدت زمان مناسب تعریف شده است. یکی از مهم‌ترین کارکردهای تاب‌آوری یک سیستم یا جامعه، توان بازیابی آن پس از شرایط بحرانی است. بازیابی نقطه عطفی در فرایند کارکردی و کارایی سیستم تاب آور است که سرعت عمل و بازگشت به شرایط اولیه را ارزیابی می‌کند. در این فرایند سرعت عمل و زمان سپری‌شده در مانایی و ضعف سیستم‌ها برای ارزیابی توان بازگشت یا بازیابی آن‌ها نقشی اساسی دارد(*Cimellaro, 2016: 94*)

جدول ۱- تعاریف واژه تاب‌آوری

نظریه پرداز	تعریف
هولینگ[۲]،۱۹۷۳	ظرفیت کاهش یا توانایی یک سیستم برای جذب نابسامانی و یا قدرت جذب تخریباتی که می‌تواند قبل از تغییر ساختارهای یک سیستم در اثر تغییر متغیرها و فرایندهای کنترل رفتار آن جذب شوند
Bruneau, M. et al,2003	افزایش توانایی زیرساخت‌های اجتماع، به‌ویژه زیرساخت‌های حیاتی درروند تداوم فعالیت آن‌ها هنگام وقوع حوادث و پس‌ازآن
Mayunge, 2007	ظرفیت یا توانایی جامعه برای پیش‌بینی، آمادگی، پاسخ و بازیابی سریع از اثرات سوانح
گزارش سازمان ملل متحد، ۲۰۰۹	قابلیت سیستم یا جامعه مواجه با مخاطرات، در جذب، انطباق و پایداری در برابر آثار مخاطرات در مدت زمان مناسب
Chang,2014	امکان جذب شوک‌های ناشی از بحران به‌منظور تداوم فعالیت عملکردی زیرساخت‌ها برای خدمات‌دهی به شهروندان

[۲] **Holling**

Cimello,2016	توان بازیابی آن پس از شرایط بحرانی، بازیابی نقطه عطفی در فرایند کارکردی و کارایی سیستم تاب آور است که سرعت عمل و بازگشت به شرایط اولیه را ارزیابی می‌کند. در این فرایند سرعت عمل و زمان سپری شده در مانایی و ضعف سیستم‌ها برای ارزیابی توان بازگشت یا بازیابی آن‌ها نقشی اساسی دارد
رفیعیان و همکاران، ۱۳۸۹	ظرفیت و جذب نیروهای مخرب ناشی از سوانح به‌وسیله پایداری و سازگاری، همچنین حفظ ساختارها و عملکرد اساسی سیستم یا جامعه

در اغلب تعاریف، واژه ظرفیت، توانایی و جذب به کار گرفته شده است. درواقع تاب‌آوری شهری را می‌توان توانایی یا ظرفیت سیستم شهر در جذب خسارات ناشی از وقایع (طبیعی و غیرطبیعی) دانست، به طوری که در تداوم عملکرد و فعالیت اجزای آن (انسان‌ها، زیرساخت و غیره) اختلال وارد نشود. در این فرآیند جذب و برگشت به حالت اولیه، مدت زمان سپری شده یکی از شاخص‌های مهم می‌باشد که هرچه میزان آن کمتر باشد، سیستم شهر تاب‌آور تر است.

۳-۲- زیرساخت‌های شهری

این واژه در منابع مختلف دارای تعاریف و دسته بندی‌های متعددی است؛ که در این قسمت به آن‌ها پرداخته شده است.

امروزه زیرساخت مجموعه‌ای از سیستم‌ها، فعالیت‌های شکل‌دهنده به جوامع و اقتصادهای مدرن تعریف می‌شود و معمولاً برای نامیدن هر منبع و شبکه انسان‌ساز مهم و در مقیاس کلان به کار می‌رود. در سال ۱۹۹۶ کمیته ویژه ریاست جمهوری آمریکا در حفاظت از زیرساخت‌ها مجموعه عملکردها و سرویس‌های شامل: حمل‌ونقل، تولید و ذخیره گاز و نفت، تأمین آب، خدمات اورژانس، خدمات دولتی، بانکداری و سرمایه‌گذاری، انرژی برق، اطلاعات و ارتباطات را به‌عنوان شبکه‌ها و فعالیت‌های حیاتی حوزه زیرساخت معرفی کرد (آل هاشمی و دیگران، ۷:۱۳۹۴)

در تعریفی دیگر زیرساخت‌ها بخش اصلی و پایه‌ای تأسیسات و تجهیزات شهری هستند. تأسیسات و تجهیزات شهری عوامل، عناصر و فرآیندهایی از کالبد و فضای شهری هستند که زندگی شهروندان را تسهیل می‌کنند. می‌توان تأسیسات و تجهیزات شهری را زیرسامانه‌ای دانست که همراه زیرسامانه‌های راه و مسکن، سامانه واحد شهر را تشکیل می‌دهند. این عناصر را به‌تناسب نحوه عملکرد، فرم و رابطه‌ی کالبدی با سکونتگاه‌ها می‌توان به دودسته تاسیسات زیربنائی و روبنائی تقسیم نمود. همچنین زیرساخت‌ها به‌طور عام شبکه حمل‌ونقل شهری را در درون خود دارند (بهزادفر، ۱۳۹۳).

تأسیسات و تجهیزات زیر بنائی به‌طور متداول با یکی از عناوین تأسیسات، تسهیلات و زیرساخت‌های شهری نامیده می‌شوند که عبارت‌اند از: شبکه آب‌رسانی، شبکه دفع فاضلاب و آب‌های سطحی، شبکه برق‌رسانی، شبکه سوخت‌رسانی و توزیع انرژی‌ها (نظیر گازرسانی)، شبکه ارتباطات از راه دور، شبکه جمع‌آوری و دفع پسماندها، شبکه توزیع و نگهداری مواد غذایی، شبکه تأسیسات حفظ و نگهداری محیط‌زیست (بهزادفر،۱۳۹۳)

تأسیسات و تجهیزات رو بنائی به‌طور عمده عبارت‌اند از: اماکن آموزشی، فضاهای ورزشی، فضاهای سبز و باز، اماکن بهداشتی و درمانی، اماکن فرهنگی و مذهبی، مراکز تجاری، مراکز صنعتی و تولیدی، مراکز اداری، اماکن نظامی و انتظامی، اماکن ویژه (گورستان و ...)، متفرقه (مراکز پرورش دام و طیور در محدوده شهرها)(بهزادفر،۱۳۹۳).

در واقع زیرساخت‌های یک سیستم را می‌توان مانند شریان‌های حیاتی آن سیستم دانست که حساسیت فراوانی برای حفاظت و پشتیبانی دارند و نیازمند برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های راهبردی برای تأمین ایمنی فضایی آن‌ها در شهرها هستند. بر این اساس می‌توان زیرساخت‌ها و شریان حیاتی شهر را در دودسته عمده شریان‌های حیاتی مبتنی بر انرژی (برق، آب، گاز) و شریان‌های حیاتی مبتنی بر ارتباطات (حمل‌ونقل و مخابرات) تقسیم‌بندی کرد(*Collier & Venables,2016:322*).

در سند راهبردی پدافند شهری کشور(۱۳۹۸)، مراکز و تاسیسات شهری به عنوان بخشی از زیرساخت‌ها عبارت‌اند از مراکز و تاسیسات زیربنایی اعم از فیزیکی و سایبری مانند آب، برق، گاز، راه، انرژی، ارتباطات و فناوری اطلاعات که تامین نیازهای اساسی مردم، اداره امور شهر، تداوم حیات و استمرار فعالیت مردم به آن وابسته است و به ۳ دسته تاسیسات

کلیدی، ضروری و لازم مطابق زیر تقسیم می‌شود:

تاسیسات کلیدی، تاسیساتی است که نیازهای کلیدی مردم، اداره امور شهر و تداوم حیات مردم به آن وابسته است و فقدان یا اختلال در عملکرد آن زندگی مردم را به مخاطره می‌اندازد؛ مانند تصفیه خانه آب

تاسیسات ضروری عبارت است از مراکز و تاسیساتی که فقدان یا اختلال در عملکرد آن‌ها زندگی مردم را با چالش مواجه می‌کند؛ مانند مراکز آموزشی

تاسیسات لازم، تاسیساتی است که وجود آن‌ها موجب تامین منافع مردم شده و جریان عادی و عمومی مردم بدان وابسته است و فقدان آن سطح درآمد مردم را با چالش مواجه می‌سازد؛ مانند سینما و فرهنگسرا

البته در دسته‌بندی دیگری می‌توان زیرساخت‌ها را به دو دسته زیرساخت‌های حیاتی و غیرحیاتی طبقه بندی کرد. با این تقسیم بندی می‌توان فهمید که اهمیت برخی از زیرساخت ها نسبت به برخی دیگر بیشتر است.

زیرساخت‌های حیاتی، مجموعه عناصر ساختاری به هم پیوسته‌ای که یک سیستم بزرگ را تشکیل داده اند. دارای ابعاد تکنولوژیک گسترده بوده و از ابعاد فیزیکی غیرعامل حرکت برخوردار است. این دسته از زیرساخت‌ها ارائه دهنده خدمات اساسی و بنیادی است. این زیرساخت‌ها و مراکز حیاتی عبارت اند از: زیرساخت حمل و نقل، تولید و انباشت نفت و گاز، تامین آب، خدمات اضطراری، مالی و بانکداری، نیروی برق، اطلاعات و ارتباطات، زیرساخت دفاعی (بخشی شادمهری و دیگران، ۱۰۷:۱۳۹۵).

همچنین وانگ[۳] و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی با موضوع امنیت و تاب آوری زیرساخت‌ها، زیرساخت‌های حیاتی را موارد زیر معرفی کرده اند:

تجهیزات شیمیایی، تجهیزات تجاری، ارتباطات، سدها، پایگاه صنعتی دفاعی، خدمات اورژانسی، انرژی، خدمات مالی، غذا و کشاورزی، امکانات دولتی، مراقبت های بهداشتی و سلامت عمومی، فناوری اطلاعات، راکتورهای هسته ای، مواد و ضایعات، سیستم[۵]های حمل و نقل و سیستم های آب و فاضلاب.

بنابراین زیرساخت‌های شهری را می‌توان یک جزء مهم و اصلی در شهر دانست. این جزء مهم شبکه‌ای انسان ساز از زیرسیتم‌ها، عملکردها و جریانات است که به تولید و توزیع خدمات در شهر می‌پردازند و بدون آن تداوم حیات جوامع ممکن نیست. زیرساخت‌های شهری دارای دسته‌بندی‌های مختلفی بنابر اهمیت، نحوه عملکرد، ماهیت و فرم هستند. این دسته‌بندی‌ها شامل زیرساخت‌های زیربنایی و روبنایی، حیاتی و غیرحیاتی، حیاتی مبتنی بر انرژی و حیاتی مبتنی بر ارتباطات و کلیدی، لازم و ضروری می‌باشد.

به طور کلی زیرساخت‌ها در شهر، شبکه‌های آب و فاضلاب، برق، گاز و سوخت، مخابرات و ارتباطات، دفع پسماند، مراکز و کاربری‌های عمومی (آموزشی، درمانی، فضای سبز و غیره) و شبکه حمل و نقل را در بر می‌گیرد.

۴-۲- اصول تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری دارای اصول چندمنظورگی، فرماندهی واحد، خوداتکایی، جایگزینی، موازی سازی و تداوم کارکردهای ضروری است. این اصول در ادامه توضیح داده شده‌اند.

- چند منظورگی: طراحی و ساخت اماکن، مراکز و تاسیسات به نحوی که قابلیت استفاده چندگانه در شرایط خاص را داشته باشند. این اصل علاوه بر استفاده چندگانه می‌تواند موضوعاتی از جمله صرفه اقتصادی را به همراه داشته باشد.

- فرماندهی واحد: منظور از وحدت فرماندهی آن است که کلیه دستگاه‌های مشارکت کننده در بحران جهت هماهنگی در اقدامات و فعالیت‌ها تحت فرماندهی و مسئولیت واحد قرار بگیرند که این فرمانده هدایت و راهبردی صحنه بحران را بر عهده دارد.

- خوداتکایی: با مفهوم اینکه در عین وابستگی جهت تامین نیازهای اساسی و اداره شهر، قابلیت و پتانسیل اداره شهر (مردم و زیرساخت) در شرایط بحرانی وجود داشته باشد.

- جایگزینی: پیش بینی ظرفیت موازی برای تاسیسات و تجهیزات به شکلی که در صورت آسیب دیدن آن‌ها، امکان استفاده از ظرفیت موازی وجود داشته باشد و فعالیت های مجموعه بی وقفه ادامه پیدا کند.

- موازی سازی: طراحی و ساخت دو سامانه هم تراز به نحوی که به موازات یکدیگر توانایی انجام فعالیت و ایفاء نقش را داشته و در زمان بحران استمرار فعالیت بی وقفه ادامه داشته

[۳] **Wang**

باشد.

- تداوم کارکردهای ضروری: مراکز کلیدی اثر مستقیم بر زندگی مردم و کارکردهای اساسی شهر دارند. در راهبردهای دشمن توقف کارکرد این مراکز از اهمیت خاصی برخوردار است؛ بنابراین تداوم کارکردهای ضروری عبارت اند از مجموعه اقداماتی که تداوم این زیرساخت‌ها را در شرایط وجود تهدید یا بالفعل شدن آن تضمین نمایند (سند راهبردی پدافند شهری کشور،۱۳۹۸).

با توجه به اصول مطرح شده لازم است تاثیر عملکرد هر یک از زیرساخت‌ها بر یکدیگر بررسی شوند. به همین منظور تاثیر عملکرد زیرساخت‌ها بر یکدیگر به شرح زیر می‌باشد.

۵-۲-تاثیر عملکرد زیرساخت‌ها بر یکدیگر

همان گونه که قبلا گفته شد زیرساخت‌ها دارای شبکه‌ای به هم پیوسته و به صورت متقابل وابسته به یکدیگر هستند. وابستگی متقابل عبارت است از ارتباط و وابستگی عملکردها و فرآیندها به یکدیگر که در صورت اختلال در یک سیستم احتمال ایجاد اختلال در مراکز و تاسیسات وابسته به صورت آبشاری وجود دارد (سند راهبردی پدافند شهری کشور،۱۳۹۸). همچنین رینالدی (۲۰۰۱) اندرکنش میان زیرساخت‌ها را به مثابه یک رابطه دو طرفه میان زیرساخت‌ها و یا یک وابستگی یک طرفه میان زیرساخت ها تعریف می‌کند. رابطه دو طرفه بدان معنا است که وضعیت یک زیرساخت سایر زیرساخت‌ها را تحت تأثیر قرار داده و یا با توجه به وضعیت زیرساخت‌های دیگر تحت تأثیر سایر زیرساخت‌ها قرار دارد.

- وابستگی فیزیکی: در این نوع وابستگی خروجی یک سیستم به عنوان ورودی سیستم دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد و بالعکس.

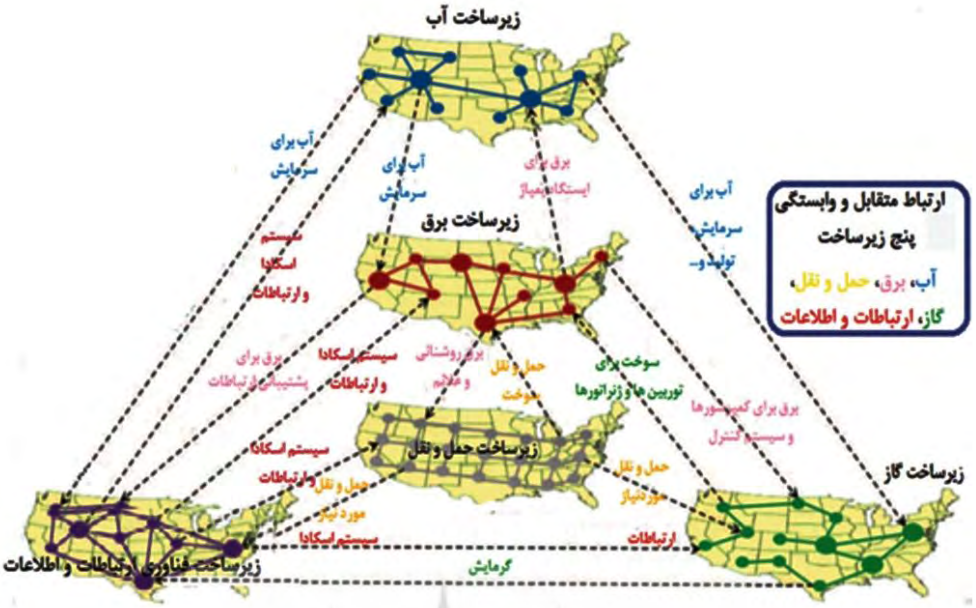
- وابستگی سایبری: در این نوع وابستگی حالت یک سیستم، وابسته به اطلاعاتی است که از طریق یک زیرساخت اطلاعاتی تأمین می‌شود.

- وابستگی جغرافیایی: دو یا تعداد بیشتری از سیستم‌ها به دلیل مجاورت جغرافیایی تحت تأثیر یک رویداد قرار می‌گیرند.

- وابستگی منطقی: این نوع وابستگی، به وابستگی‌هایی که در انواع وابستگی قبلی جای نمی‌گیرد، اطلاق می‌شود.

بولینگر (۲۰۱۱) زیرساخت‌های انرژی شامل برق، گاز طبیعی و شبکه‌های سوخت را به عنوان مهم‌ترین زیرساخت‌ها شناسایی می‌کند؛ زیرا عملکرد تمام بخش‌های دیگر زیرساخت‌ها به آن‌ها وابسته می‌باشد. برای مثال: سیستم‌های آب‌رسانی و فاضلاب برای بهره برداری از ایستگاه‌های پمپ خود به سیستم‌های برق متکی هستند. سیستم‌های اطلاعاتی و ارتباطی برای انجام وظایف انتقال اطلاعات به شبکه‌های برق متکی هستند. سیستم‌های حمل و نقل برای بدست آوردن قدرت برای انواع وسایل نقلیه، به شبکه‌های سوخت متکی هستند، وابستگی سایر زیرساخت‌های مهم به شبکه انرژی می‌تواند به آسیب پذیری و اختلال عملکرد آن‌ها منجرب شود.

در مثال دیگر می‌توان گفت اگر چه ممکن است زیرساخت گاز مستقل از دیگر زیرساخت‌های حیاتی در نظر گرفته شود؛ اما این جدایی در واقعیت محدود است. در شکل ۱ رابطه زیرساخت گاز با چهار زیرساخت حیاتی دیگر نشان داده شده است که در همه موارد از جمله زیرساخت برق، حمل و نقل، آب و ارائه خدمات به زیرساخت فناوری اطلاعات و ارتباطات وابستگی متقابل وجود دارد. افزایش وابستگی متقابل باعث اهمیت این زیرساخت در رابطه با سایر زیرساخت‌های حمایت کننده و در نظر گرفتن رویکرد سیستمی به این زیرساخت با سایر زیرساخت‌های حیاتی می‌شود(سند حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی،۱۳۹۸).

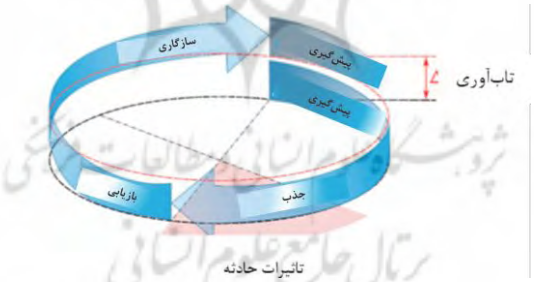


شکل ۱: ارتباط و وابستگی متقابل پنج زیرساخت آب، برق، گاز، حمل و نقل و ارتباطات

ماخذ: سند حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی،۱۳۹۸

۶-۲- فرآیند تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

تاب آوری یک سیستم مهم زیرساختی را باید به عنوان یک فرآیند چرخه ای شامل پیش‌گیری، جذب، بازیابی و سازگاری درک کرد. شکل ۲ چرخه ای را نشان می دهد که در آن تاب‌آوری از سطح اصلی آن (خط سیاه) به چرخه جدید تقویت می شود (خط قرمز). تفاوت بین این دو سطح به عنوان میزان تقویت تاب‌آوری قابل درک است(*Rehak et all 2018:143-171*).



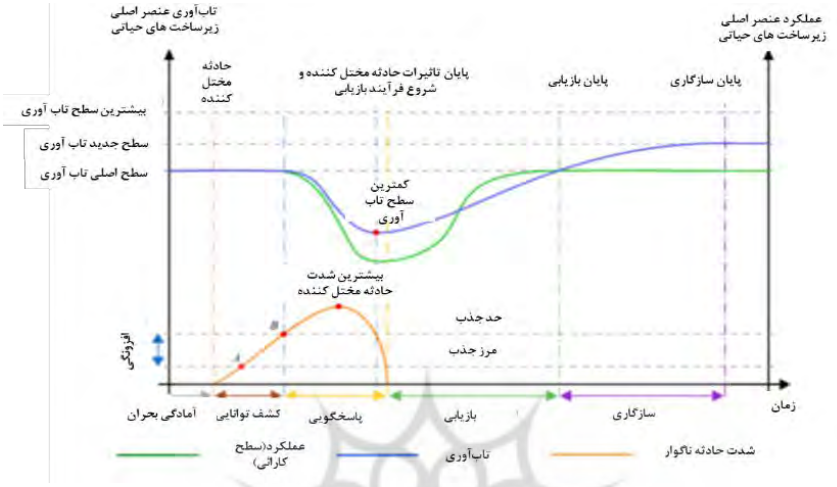
شکل ۲: فرآیند چرخه‌ای تاب آوری زیرساخت ها

ماخذ: Rehak et all, 2018

- **ظرفیت جذب**

تاب آوری عناصر بر پویایی عملکرد خدمات ارائه شده توسط یک عنصر در پاسخ به یک رویداد مخرب تأثیر می‌گذارد (شکل ۳). این پویایی بسته به نوع زیرساخت ها و رویدادهای مختل کننده و نحوه مدیریت آن می‌تواند متفاوت باشد. به محض اینکه یک عنصر تحت تأثیر یک رویداد مخرب قرار گرفت، ظرفیت جذب عنصر به دو مرحله تقسیم می‌شود. در مرحله اول، سیستم قادر است بدون نیاز به استفاده از ظرفیت‌های افزایشی تا مرز توانایی عنصر در جذب کامل اثرات رویداد، اثرات یک رویداد مختل کننده را جذب کند (نقطه *A*). در مرحله دوم، ظرفیت‌های افزایشی موجود در این عنصر به کار گرفته می‌شوند و این عنصر همچنان می‌تواند عملکرد کامل خود را ارائه دهد. در این مرحله، هنوز فرصت برای تشخیص وقایع جانبی و متعاقباً شروع یک پاسخ می‌باشد. پس

از خالی شدن ظرفیت های افزایشی، این عنصر به نهایت توانایی آن در جذب تأثیرات یک رویداد مخرب رسیده است (نقطه B). آیا پیامدهای منفی این رویداد با افت عملکردهایی که توسط عنصر انجام می‌شود، آشکار می‌شود؟ ماهیت افت با قابلیت های عنصر برای دفاع در برابر اثرات رویداد مشخص می‌شود. در صورت وجود چنین قابلیت‌هایی، کاهش عملکرد تدریجی است. با این حال، اگر شدت حوادث بر قابلیت‌ها غلبه کنند، کاهش عملکرد ناگهانی یا حتی فوری خواهد بود(*Rehak et all, 2018:7-8*).

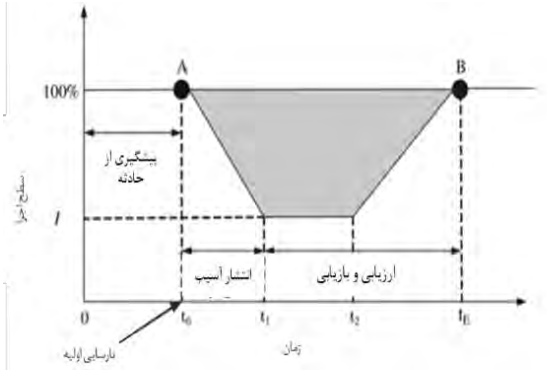


شکل ۳: فرآیند و متغیرهای تعیین کننده تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری در بعد فنی

ماخذ: Rehak et all, 2018: 8

- **عملکرد سه مرحله ای جذب (پاسخ)**

سطح عملکرد زیرساخت‌ها را می‌توان با شاخص‌های مختلف اندازه گیری کرد؛ مانند مقدار جریان یا خدمات ارائه شده، در دسترس بودن امکانات مهم، تعداد افراد خدمت کرده و میزان فعالیت اقتصادی که با ابعاد مختلف تاب آوری مطابقت دارد. فرایند پاسخ عملکرد در شکل ۴ را می‌توان به سه مرحله مختلف تقسیم کرد مرحله اول ($0 < t < t_0$) مرحله پیشگیری از بروز بلایا از عملکرد عادی تا شروع نارسایی اولیه است این مرحله نشان دهنده ظرفیت مقاومت سیستم به عنوان توانایی آن برای جلوگیری از خطرات احتمالی و کاهش سطح آسیب اولیه در صورت بروز خطر است. دو شاخص «فرکانس خطر» و «سطح آسیب اولیه» در کنار هم مفهوم ظرفیت مقاومت را توصیف می‌کنند و به عنوان شاخص همبستگی تاب‌آوری در مرحله اول در نظر گرفته می شود. مرحله دوم ($t_0 < t < t_1$) فرآیند انتشار آسیب پس از تخریب اولیه است. این مرحله نشان دهنده ظرفیت جذب سیستم به عنوان توانایی آن در جذب تأثیر خسارت اولیه و به حداقل رساندن پیامدهای آن می‌باشد. حداکثر سطح ضربه (I) درشکل۴) برای اندازه گیری ظرفیت جذب استفاده می‌شود و به عنوان شاخص همبستگی تاب‌آوری در مرحله دوم در نظر گرفته می شود. مرحله سوم ($t1 < t < t_E$) فرآیند بازیابی است که طی آن اطلاعات آسیب سیستم برای ارزیابی جمع آوری می‌شود و منابع برای بازیابی عملکرد سیستم اختصاص می‌یابد. سطح عملکرد جدید ممکن است بهتر یا بدتر از حالت عملکرد اصلی باشد، این مرحله عمدتا ظرفیت تجدید را نشان می‌دهد، یعنی توانایی سیستم برای تعمیر سریع و کارآمد. زمان و هزینه بازیابی در کنار هم نشان دهنده ظرفیت تجدید است این سه مرحله فرایند پاسخ زیرساخت ها به اختلالات را تشکیل می‌دهند(*Ouyang et all, 2012: 24*)



شکل ۴: منحنی عملکرد پاسخ یک سیستم زیرساختی پس از یک رویداد مختل کننده
ماخذ: **Ouyang et all, 2012: 24**

۲-۷- بسط شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

تاب‌آوری زیرساخت‌های بحرانی توسط سه نوع عامل تعیین می‌شود:

۱- عوامل تعیین کننده تاب آوری (مؤلفه‌ها و متغیرهای تاب آوری فنی و سازمانی)

۲- عوامل محدود کننده تاب‌آوری (تنظیم قانونی بهره برداری از زیرساخت ها یا سطح منابع مالی موجود)

۳-عوامل مؤثر بر تاب آوری (تهدیدها یا ابزارهای تقویت تاب آوری)

تاب‌آوری عناصر در یک سیستم مهم زیرساختی در دو زمینه حفاظت فنی و مدیریت سازمان تعیین می‌شود. از مولفه‌های تاب‌آوری فنی می‌توان استحکام و بازیافت عناصر را نام برد. تاب‌آوری سازمانی با سطح فرآیندهای درونی سازمان تعیین می‌شود که هدف اصلی آن ایجاد شرایط بهینه برای سازگاری عناصر مهم زیرساختی با حوادث مخرب است (*Lovecek et all, 2010*). مولفه‌ها و متغیرهای تاب‌آوری فنی (استحکام و بازیافت) و تاب‌آوری سازمانی (سازگاری) به شرح جدول ۲ می‌باشد

جدول ۲- مؤلفه ها و متغیرهای تعیین کننده تاب‌آوری عناصر مهم زیرساختی

مولفه ها	متغیرها
استحکام	- آمادگی بحران (مجموعه ای از اقدامات طراحی شده برای بهبود آمادگی یک عنصر مهم زیرساخت برای یک رویداد مخرب) - افزونگی (توانایی جایگزینی سریع عملکرد قسمت مختل شده از عنصر یا افزایش ظرفیت آن) - توانایی تشخیص (احتمال دادن یا زمان تشخیص یک رویداد مخرب) - پاسخگویی (احتمال یا زمان پاسخ منجر به حذف دلایل یک رویداد مخرب یا به حداقل رساندن تأثیرات آن‌ها) - مقاومت فیزیکی (مجموعه ای از ابزارهای فنی و اقدامات سازمانی که به منظور تقویت مقاومت فیزیکی یک عنصر مهم زیرساختی در برابر حوادث مخرب طراحی شده اند)
بازیافت	- منابع مواد (در دسترس بودن اجزای مورد نیاز برای تعمیر یا تعویض قطعات آسیب دیده یا تخریب شده از عنصر) - منابع مالی (در دسترس بودن منابع مالی یا ذخایر برای بهبود سریع عنصر) - منابع انسانی (در دسترس بودن نیروی انسانی با سطح صلاحیت لازم) - فرآیندهای بازیابی (فرآیندهای تسهیل بازیابی سریع عملکرد مورد نیاز عنصر)
سازگاری	-سطح مدیریت ریسک -سطح روش ارزیابی ریسک کاربردی -سطح اجرای استانداردهای امنیتی / ایمنی -سطح مشخصات سناریوهای اضطراری که پایه و اساس توسعه برنامه های احتمالی را تشکیل می دهد

ماخذ: برگرفته از Lovecek et al., 2010

جهت ارزیابی و سنجش تحقق تاب‌آوری در حوزه زیرساخت‌های شهری، مولفه ها و شاخص‌های گوناگونی در پژوهش‌های متعدد ارائه و ارزیابی‌شده است؛ که در جدول ۳ جمع‌آوری شده‌اند

جدول ۳- مولفه ها و شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

منبع	مولفه	شاخص‌ها و چارچوب مطالعاتی تاب‌آوری زیرساخت شهری
فرزاد بهتاش و دیگران (۱۳۹۲)	شریان‌های حیاتی و مراکز مهم و حساس	برخورداری از آب و گاز و برق، واحد اسکان موقت، بیمارستان، استقرار و مکان‌یابی بناهای عمومی
رمضان زاده و همکاران (۱۳۹۳)	دسترسی‌پذیری، کیفیت ساختاری	دسترسی به زیرساخت‌های برق، گاز و آب، دسترسی به خدمات ارتباطی و مخابراتی، دسترسی به شریان‌های حمل‌ونقل، کیفیت جذب و تطبیق‌پذیری ساختاری
شکری فیروزجاه (۱۳۹۶)	کیفیت ساختاری، سرانه مصرف، دسترسی‌پذیری	دسترسی به زیرساخت‌های شریانی، کیفیت و استحکام زیرساخت‌های شریانی، قدمت و عمر شبکه زیرساختی، سطح و سرانه مصرف شبکه زیرساختی
نامجویان و همکاران (۱۳۹۶)	ظرفیت تحمل سیستم، ظرفیت واکنش و بازیابی سیستم، کیفیت ساختاری سیستم	توان تحمل‌پذیری در برابر شوک‌های داخلی و خارجی زیرساخت‌ها، ظرفیت جذب شوک‌های خارجی، اختصاص تنوع و برنامه‌های پشتیبانی زیرساختی، مقاومت ساختاری شبکه زیرساختی
شیخی و دیگران (۱۳۹۷)	تأسیسات و تجهیزات شهری	کیفیت و استحکام خطوط گاز، آب و برق
مرادی و محمدی (۱۳۹۷)	تأسیسات و تجهیزات، شبکه حمل‌ونقل، کاربری پشتیبان، مراکز درمانی	میزان خطوط لوله، سطح شبکه ارتباطی، تعداد و دسترسی به بیمارستان، وجود انبار غلات و فروشگاه زنجیره‌ای
EMA, (2001)	تأسیسات و تجهیزات شهری، شبکه حمل‌ونقل	پوشش، دسترسی، قابلیت اطمینان
Bruneau et al. (2006)	سیستم حمل‌ونقل، زیرساخت‌های حیاتی	پایداری، میزان سرانه مصرف ، توزیع برابر در سطح شهر، مقدار جریان یا خدمات داده‌شده، در دسترس بودن امکانات اضطراری، تعداد افرادی که خدمت می‌کنند.
Cutter et al. (2008)	کاربری‌های مهم و حیاتی، شبکه حمل‌ونقل	دسترسی به زیرساخت مرتبط با مدیریت بحران، سن و تعداد خانه‌های مسکونی ذخیره، نحوه استقرار زیرساخت‌های تجاری
Ouyang et al., (2012)	ظرفیت استحکام زیرساختی، ظرفیت جذب زیرساختی، ظرفیت بازتوانی زیرساختی	میزان مقاومت ساختاری زیرساخت‌های شریانی (برق، آب، گاز و مخابرات) در برابر حوادث، میزان جذب و تحمل تغییرات (افزونگی) در زیرساخت‌های شریانی، مدت زمان سپری شده برای بازگشت به حالت اولیه، میزان توانایی و زمان برای بهبود شرایط، میزان منابع در دسترس (مالی، انسان و مواد)
شریفی و یاماگاتا[۴] (۲۰۱۵)	جذب پذیری، انعطاف مندی، تنوع، ظرفیت خارجی سیستم	میزان توانمندی برای سپری کردن حالات بحرانی، میزان ارتباط و هم‌بستگی ساختاری شبکه‌ای، میزان جذب تغییرات و شوک خارجی، تنوع طراحی و عددی، سرعت زمان بازیابی
بنیاد راکفلر[۵] (۲۰۱۵)	کاهش شکنندگی کالبدی، ارتباطات و حمل‌ونقل قابل‌اتکا،	زیرساخت مناسب، کاربری‌های مؤثر، سیستم حمل‌ونقل متنوع و قابل استطاعت و شبکه تکنولوژی اطلاعات و ارتباطات (*ICT*) و برنامه‌ریزی همراه با عدم قطعیت،

[۴] **Yamagata**

[۵] **Rockefeller**

	ادامه حیات خدمات اساسی	تنوع در ارائه، بار (ظرفیت) اضافه، مدیریت فعال و نگهداری محیط‌زیست و زیرساخت و برنامه‌ریزی همراه با عدم قطعیت
گرنای۶ و همکاران (۲۰۱۶)	شبکه زیرساختی، ساختار فیزیکی، هم‌بستگی کارکردی	سطح طراحی و الگوی هندسی طراحی، قدمت و کیفیت ساختاری، اتصال و عملکرد متقابل زیرساختی
نگ۷ و همکاران (۲۰۱۸)	سرانه مصرف، کیفیت ساختاری	میزان پوشش جمعیت، سطح اشغال فضایی شبکه، کیفیت طراحی شبکه زیرساختی، قدمت کارکردی شبکه زیرساختی
هوآنگ۸ و لینگ۹ (۲۰۱۸)	ظرفیت جذب، ظرفیت سازگاری، ظرفیت بازیابی	توزیع فضایی زیرساخت‌ها، توانایی تحمل آسیب‌ها و شوک‌ها، مدیریت و کنترل و پایش شبکه زیرساختی، زمان بازگشت به شرایط اولیه، زمان ارتقای شرایط بهتر از حالت اولیه

ماخذ: محمدی ده چشمه و دیگران، ۳۷۹:۱۳۹۸ و نگارندگان

در شکل ۵ مدل مفهومی تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری بر اساس دسته‌بندی تاسیسات و تجهیزات زیربنایی شامل آب، برق، گاز، مخابرات و ارتباطات، شبکه دفع پسماندها، تاسیسات و تجهیزات روبنایی شامل مراکز درمانی، آتش‌نشانی، آموزشی، فضاهای سبز و باز، شبکه راه و غیره و با توجه به اهمیت شاخص‌ها در منابع مختلف و نظر کارشناسان تدوین شده است. از این مدل مفهومی می‌توان جهت ارزیابی تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری و ارائه راهکارهایی جهت ارتقا آن استفاده کرد

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۶ **Gernay**
۷ **Ng**
۸ **Huang**
۹ **Ling**

شکل ۵- مدل مفهومی تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

۳- روش پژوهش

این پژوهش از نوع توسعه‌ای- کاربری و از نظر روش توصیفی - تحلیلی می‌باشد. ابتدا با مطالعات اسنادی به شرح مبانی نظری پرداخته شده است و معیارها و شاخص‌های تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری جمع‌آوری شده‌اند. سپس جهت تحلیل داده‌ها و تعیین اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر از تکنیک دلفی، روش تحلیل شبکه‌ای(*ANP*) استفاده شده است. بدین منظور پرسشنامه‌ای جهت امتیازدهی به شاخص‌ها و کسب نظرات آن‌ها در اختیار ۹ نفر از متخصصان قرار گرفته‌است، از آن‌ها خواسته شد تا بر اساس اهمیت شاخص‌ها در تاب‌آوری شهر در هنگام وقوع حوادث از ۱تا ۹ امتیاز بدهند و جایگاه هر شاخص را در فرآیند تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری مشخص کنند. سپس نتایج آن در نرم‌افزار *Super Decision* مورد بررسی قرار گرفته و اهمیت شاخص‌ها نسبت به یکدیگر مشخص شد. همچنین با تحلیل نظرات متخصصان جایگاه هر شاخص در فرآیند تاب‌آوری تعیین شد. با توجه به مدل مفهومی (شکل ۵) و هدف این پژوهش، معیارها به شرح زیر تعریف می‌شود:

۱- برخورداری از زیرساخت‌های حیاتی و پشتیبان: این شاخص به معنای بهره مندی و دسترسی به تاسیسات

زیربنایی شامل آب، برق، گاز و مخابرات و کاربری‌های پشتیبان شامل مراکز درمانی و اضطراری، واحد اسکان موقت، آتش نشانی، انبار ذخیره مواد غذایی، فضای باز و غیره می‌باشد.

۲- مدت زمان بازگشت به شرایط اولیه: سرعت بازیابی و مدت زمان طی شده جهت برقراری شرایط عادی می‌باشد.

۳- میزان جذب شوک‌های خارجی: این شاخص نشان دهنده میزان توانایی زیرساخت در جذب تهدیدات و خسارات ناشی از آن می‌باشد.

۴- میزان منابع در دسترس: نشان دهنده میزان منابع مالی، فیزیکی و انسانی در دسترس است.

۵- نحوه توزیع فضایی: این شاخص نشان دهده پراکنش فضایی زیرساخت‌ها می‌باشد؛ که عدالت فضایی و دسترسی عادلانه مردم نسبت به زیرساخت‌ها را فراهم می‌کند.

۶- میزان خدمات رسانی و سرانه مصرف: نشان دهنده میزان جمعیت تحت پوشش هر زیرساخت است.

۷- مقاومت و کیفیت طراحی ساختاری : این شاخص نشان دهنده میزان مقاومت و کیفیت طراحی ساختاری زیرساخت‌ها است و جنس، شکل هندسی، نوع الگوهای هندسی خطوط(به طور مثال الگوهای هندسی شبکه آب‌رسانی شهر سه نوع شاخه‌ای، حلقوی و مختلط را شامل می‌شود (بهزادفر، ۱۶۸:۱۳۹۳))، عمر و قدمت، کیفیت ابنیه و نوع سازه را در بر می‌گیرد.

۸- موقعیت مکانی: این شاخص به معنای موقعیت مکانی زیرساخت‌ها با توجه به نزدیکی به عوامل تهدید آمیز همانند گسل، رودخانه، پمپ بنزین و غیره می‌باشد.

۹- میزان ارتباط و وابستگی متقابل: زیرساخت‌ها دارای شبکه ای به هم پیوسته و به صورت متقابل وابسته به یکدیگرند.

۱۰- میزان توانایی جایگزینی (افزونگی): پیش بینی ظرفیت موازی برای تاسیسات و تجهیزات به شکلی که در صورت آسیب دیدن آن‌ها، امکان استفاده از ظرفیت موازی وجود داشته باشد و فعالیت های مجموعه بی وقفه ادامه پیدا کند

۱۱- میزان امکان استفاده چند منظوره: طراحی و ساخت اماکن، مراکز و تاسیسات به نحوی که قابلیت استفاده چندگانه در شرایط خاص را داشته باشند. این شاخص علاوه بر استفاده چندگانه می‌تواند موضوعاتی از جمله صرفه اقتصادی را به همراه داشته باشد.

۱-۳- فرآیند تحلیل شبکه‌ای

فرآیند تحلیل شبکه‌ای در پنج مرحله کلی انجام می‌گیرد؛ اما در این مقاله جهت تعیین میزان تاثیرگذاری معیارها در تاب‌آوری شهری از آن استفاده شده است؛ به همین دلیل فرآیند تحلیل در چهار مرحله انجام می‌شود و مرحله پنجم که انتخاب گزینه می‌باشد دراین مقاله مطرح نیست. مراحل انجام فرآیند تحلیل شبکه عبارت اند از:

۱- تبدیل موضوع به یک ساختار شبکه‌ای: در این مرحله با توجه به هدف و معیارهای مستخرج روابط و اثرهای متقابل درون معیارها مشخص می‌شود

۲- تشکیل ماتریس مقایسه‌ای دودویی و تعیین بردارهای اولویت: در این مرحله مقایسه زوجی بین معیارها نسبت به هدف و معیارها نسبت به هم با توجه به وابستگی‌های درونی بر اساس نظرات کارشناسی انجام شد که نتیجه آن دو بردار (w_{21}) با ضریب سازگاری ۰/۰۰ و (w_{22}) با ضریب سازگاری ۰/۰۶۳ می‌باشد.

۳- تشکیل سوپرماتریس و تبدیل آن به سوپرماتریس حد: در این مرحله دو ماتریس مقایسه‌ای محاسبه شده در مرحله قبل (w_{21} و w_{22}) در سوپر ماتریس ناموزون قرارگرفته‌اند. سپس سوپر ماتریس موزون از حاصل ضرب سوپر ماتریس ناموزون در ماتریس خوشه‌ها محاسبه و استاندارد شده است. پس از آن برای محاسبه ماتریس حد، سوپرماتریس موزون به توان k (یک عدد بزرگ اختیاری) رسانده شد تا زمانی که تمامی عناصر آن همانند شوند.

۴- یافته‌ها

جدول ۴ ماتربس حد و امتیاز نهایی معیارها نسبت به یکدیگر را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که دو بردار w_{21} و w_{22} ، ماتریس ناموزون و موزون به دلیل عدم ضرورت و محدودیت ارائه مطالب ذکر نشده است.

جدول ۴- ماتریس حد

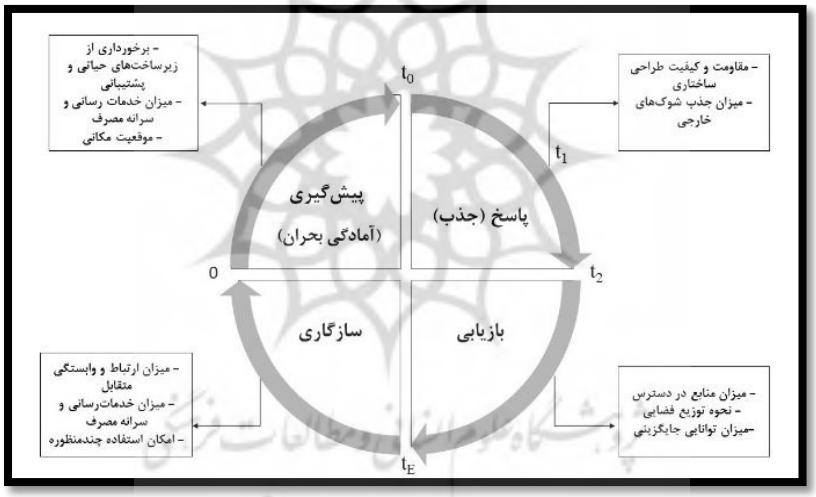
		هدف	معیار									
			۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
هدف		۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
معیار	۱	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶۸
	۲	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷	۰/۲۱۷
	۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳
	۴	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰	۰/۰۶۰
	۵	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴	۰/۰۴۴
	۶	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳
	۷	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴	۰/۰۸۴
	۸	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳	۰/۰۴۳
	۹	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
	۱۰	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴
	۱۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲

یافته‌های حاصل از تحلیل شبکه‌ای (*ANP*) و مصاحبه‌های صورت گرفته با کارشناسان در این زمینه در جدول ۵ جمع‌بندی شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل شبکه‌ای در نرم‌افزار *Super Desion* نشان می‌دهد مدت زمان بازگشت به شرایط اولیه در اولویت اول، میزان جذب و پاسخ در اولویت دوم، میزان وابستگی متقابل در اولویت سوم و پس از آن به ترتیب مقاومت و کیفیت طراحی ساختاری، برخورداری از زیرساخت‌های پشتیبان و حیاتی، منابع در دسترس، توانایی جایگزینی، توزیع فضایی زیرساخت‌ها، موقعیت مکانی، میزان خدمات رسانی و سرانه مصرف و امکان استفاده چندمنظوره دارای اهمیت می‌باشند.

جدول۵- اولویت بندی و تعیین جایگاه شاخص‌ها در فرآیند تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری

شاخص	ضریب اهمیت	مرحله متاثر			
		آمادگی بحران	جذب (پاسخ)	بازیابی	سازگاری (تطبیق)
۱-برخورداری از زیرساخت‌های حیاتی و پشتیبان	۰/۰۶۸	۷	۱	۳	-
۲-مدت‌زمان بازگشت به شرایط اولیه	۰/۲۱۷	-	-	۹	-
۳-میزان جذب شوک‌های خارجی	۰/۲۱۳	-	۹	-	-
۴-میزان منابع (مالی، انسانی و فیزیکی) در دسترس	۰/۰۶۰	۳	-	۶	-
۵-نحوه توزیع فضایی زیرساخت‌ها	۰/۰۴۴	۳	-	۵	۳
۶-میزان خدمات‌رسانی و سرانه مصرف	۰/۰۳۳	۴	-	۱	۴
۷-مقاومت و کیفیت طراحی زیرساخت‌ها	۰/۰۸۴	۲	۶	-	۱
۸-موقعیت مکانی زیرساخت‌ها	۰/۰۴۳	۷	۲	۱	-
۹-میزان ارتباط و وابستگی زیرساخت‌ها	۰/۱۵	۳	-	-	۶
۱۰-میزان توانایی جایگزینی	۰/۰۵۴	-	-	۶	۳
۱۱-میزان امکان استفاده چندمنظوره	۰/۰۲	۳	-	-	۶

همچنین مطابق نظرات کارشناسان اغلب شاخص‌ها در مراحل مختلف فرآیند تاب‌آوری موثر می‌باشند (به طور مثال توانایی جایگزینی در دو مرحله بازیابی و سازگاری تاثیرگذار هستند). مطابق شکل ۶، مدت زمان طی شده در این چرخه (مهم‌ترین شاخص) دارای وابستگی درونی با شاخص‌های موثر در مراحل، همانند مقاومت و کیفیت طراحی، ارتباط و وابستگی متقابل، نحوه توزیع فضایی و غیره می‌باشد. برخورداری از زیرساخت‌های حیاتی و پشتیبان، مکان‌یابی صحیح و میزان سرانه مصرف، می‌توانند منجربه پیش‌گیری و تاب‌آوری ذاتی در برابر تهدیدات شوند. همچنین پاسخ دهی (میزان جذب) متاثر از مقاومت و کیفیت طراحی ساختاری می‌باشد. این شاخص خود به معیارهای گوناگونی همچون: جنس، شکل هندسی، عمر و قدمت لوله‌ها، نوع الگو هندسی شبکه آب‌رسانی، برق‌رسانی و گازرسانی، نحوه قرارگیری در کنار یکدیگر و میزان سطح خطوط زیرساخت‌ها نیز بستگی دارد؛ به طوری که هر چه سطوح در شبکه راه‌ها بیشتر باشد، میزان پاسخ‌دهی نیز بیشتر و فرآیند چرخه‌ای سریع‌تر طی می‌شود. اما درمورد تاسیسات زیربنایی شامل خطوط لوله آب، گاز، برق و مخابرات بالعکس است و هر چه میزان سطح خطوط لوله کمتر باشد، تاب‌آوری شبکه بیشتر می‌شود که این مورد مستلزم توجه در طراحی شبکه است. در ادامه فرآیند هر چه میزان منابع مالی، فیزیکی و انسانی بیشتر، نحوه توزیع فضایی عادلانه‌تر و توانایی جایگزین کردن زیرساخت‌ها بالاتر باشد، بازیابی به شرایط اولیه نیز آسان‌تر صورت می‌گیرد. جهت سازگاری با شرایط، کنترل ارتباط و وابستگی متقابل زیرساخت‌ها، وجود فضاهای چند منظوره و میزان خدمات رسانی از شاخص‌های مهم می‌باشند. هر چه میزان سرانه مصرف و خدمات رسانی کمتر باشد، سازگاری با شرایط سریع‌تر و آسان‌تر صورت می‌گیرد.



شکل ۶- فرآیند تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری و جایگاه شاخص‌ها در آن

۵- نتیجه‌گیری

با استفاده از اصول تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری می‌توان راهکارهایی را جهت ارتقا آن ارائه داد. به طور مثال در راستای اصل چندمنظورگی، طراحی ایستگاه‌های مترو و فضاهای باز و عمومی به صورت پناهگاه‌های ایمن و امکان استقرار مراکز درمانی و اضطراری در آن‌ها می‌تواند در جهت ارتقا تاب آوری شهری موثر باشد. جهت رعایت اصل جایگزینی، ذخیره آب، مواد غذایی، تهیه امکانات جهت تامین انرژی مستقل از شبکه انرژی شهر، دستگاه تولید برق اضطراری و استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر می‌تواند صورت گیرد. موارد گفته شده منجربه اصل خوداتکایی و حداقل وابستگی به تاسیسات شهری نیز می‌شود؛ که تمامی این اصول منجربه اصل تداوم کارکردهای ضروری می‌شود؛ مثلا استفاده از اصل جایگزینی در تامین منابع آب و انرژی منجربه تداوم عملکرد مراکز اضطراری و بیمارستان‌ها می‌شود؛ بنابراین با رعایت این اصول می‌توان به زیرساخت‌های تاب‌آور رسید.

با تطابق دو شکل ۳ و ۴ می‌توان نتیجه گرفت تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری دارای فرآیند چرخه‌ای پیش‌گیری، جذب، بازیابی و سازگاری است. پیش‌گیری یا آمادگی بحران ($0 < t < t_0$)، نشان دهنده ظرفیت و مقاومت سیستم جهت تاب‌آوری در برابر حوادث می‌باشد. ظرفیت سیستم به دو شاخص میزان آسیب اولیه و شدت خطر بستگی داشته و با تقویت شاخص‌ها و عوامل تعیین کننده تاب‌آوری می‌توان آن را افزایش داد. مرحله جذب یا پاسخگویی ($< t < t_1$) نشان دهنده ظرفیت جذب سیستم می‌باشد. این مرحله را می‌توان شامل دو زیرمرحله دانست. در زیرمرحله ۱ عنصر با توانایی خود سعی در حفظ عملکرد و جذب اثرات منفی حادثه دارد (شروع حادثه تا نقطه A) اما در زیرمرحله ۲ عنصر با استفاده از ظرفیت افزونگی تا حد جذب اثرات منفی حادثه پیش می‌رود (نقطه A تا نقطه B). پس از آن حادثه در عملکرد سیستم اختلال و کمترین سطح تاب‌آوری مشاهده می‌شود ($t_1 < t < t_2$).

با پایان فرآیند جذب و شروع مرحله بازیابی سطح عملکرد و تاب‌آوری سیستم افزایش می‌یابد($t_2 < t < t_E$) این مرحله نشان دهنده ظرفیت و سطح جدید تاب‌آوری با دو شاخص همبستگی زمان و هزینه می‌باشد. به طوری که هر چه زمان و هزینه بازیابی کمتر باشد، ظرفیت جدید تاب آوری بیشتر است. با شروع مرحله سازگاری سطح تاب‌آوری جدید و عملکرد به ثبات رسیده و ظرفیت جدید بالاتر از سطح عملکرد می‌باشد. در واقع می‌توان گفت از شروع مرحله بازیابی تا پایان سازگاری فرآیند تاب‌آوری و سطح عملکرد روند افزایشی کندشونده را دارد. یعنی پس از پاسخ به حادثه مختل کننده زیرساخت‌ها باید به وضعیت عادی قبل از بحران برسند.

مطابق جدول ۵، در بین شاخص‌های ارائه شده در منابع مختلف، مدت زمان بازگشت به شرایط اولیه با وزن۰/۲۱۷ دارای بیشترین ضریب اهمیت، پس از آن میزان جذب شوک‌های خارجی با وزن۰/۲۱۳ و سپس ارتباط و وابستگی درونی زیرساخت‌ها با وزن ۰/۱۵ دارای اهمیت است. پس از آن مقاومت و کیفیت طراحی ساختاری، برخورداری از زیرساخت‌های پشتیبان و حیاتی، منابع در دسترس، توانایی جایگزینی، توزیع فضایی زیرساخت‌ها، موقعیت مکانی، میزان خدمات رسانی و سرانه مصرف و امکان استفاده چندمنظوره دارای اهمیت می‌باشند.

درنظرگرفتن زیرساخت‌های پشتیبان و حیاتی و موقعیت مکانی از شاخص‌هایی می‌باشند؛ که ارتقا آمادگی بحران در برابر وقایع را به دنبال دارند. مقاومت و کیفیت طراحی ساختاری زیرساخت‌ها عامل مهم در فرآیند جذب و میزان منابع در دسترس، نحوه توزیع فضایی زیرساخت‌ها و توانایی جایگزینی در بازیابی بیشترین تاثیر را دارد. به منظور تطبیق و سازگاری نیز، کنترل ارتباط و وابستگی متقابل، برنامه‌ریزی زیرساخت‌های جایگزین و چندمنظوره نیازمند توجه می‌باشد.

تاب‌آوری زیرساخت‌های شهری مفهومی نوین و چندجانبه می‌باشد که در کنار توانمندسازی اولیه به برگشت‌پذیری و تداوم عملکرد و فعالیت توجه دارد. تاب‌آوری از ویژگی های ذاتی زیرساخت‌های شهری و طراحی و برنامه‌ریزی زیرساخت‌های شهری به صورت تاب‌آور جهت دستیابی به شهر تاب‌آور از الزامات می‌باشد؛ زیرا درصورت وقوع تهدیدات طبیعی و انسان ساخت، وابستگی متقابل زیرساخت‌ها به یکدیگر منجربه اختلال و شکست آبشاری کل سیستم می‌شود.؛ که جهت پاسخ به این اختلالات می‌توان به ایجاد شبکه‌های محلی و کوچک و رعایت اصول آن همان گونه که قبلا ذکر شد، پرداخت.

۶- مراجع

Al Hashemi, Aida, Mansouri, Sidamir, Barati, Nasser (2016). Urban infrastructure and the need for a change in its definition and planning. Journal of Bagh-e Nazar, 13 (43), 5-16.

Amaratunga, D. Haigh, R. (2011). Post-Disaster Reconstruction of the Built Environment Building for Resilience. Wiley- Blackwell, U.K.

Alavi, Seyed Mohsen, Massoud, Mohammad, Karimi, Asadullah (2018). Evaluation of Resilience of Urban Water Network Infrastructure to Earthquake (Case Study: Tehran District 2). Human Geography Research, 50 (4), 977-991.

Bahrami, Sirvan, Sorour, Asadiyan, Faride. (2017). Analysis of Resilience Status of Sanandaj Neighborhoods (Case Study: Saratpole, Shalman and Hajiabad Neighborhoods). Environmental Studies of Haft Fence, 6(22), 45-62.

Bakhshishadmehri, Fatemeh. Zarqani, Sayedhadi. Kharazmi, Amir Ali (2016). Analysis of passive defense considerations in urban infrastructure with emphasis on water infrastructure. Geographical Research Quarterly, 31 (3), 105-119.

Behzad Far, Mostafa (2014). Urban Infrastructure, Tehran Water and Wastewater. (Third Edition), Tehran: Shahidi Publications.

Bollinger, L. A. (2011). Evolving Climate-Resilient Energy Infrastructures. Delft, Netherlands: TU Delft

Bruneau, M. Et al. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. Earthquake Spectra, 19(4), 733-752.

Cimellaro, G.(2016) .Urban Resilience for Emergency Response and Recovery: Fundamental Concepts and Applications, Springer Publication.

Collier, P., and Venables, a (2016). Urban Infrastructure for Development, Oxford Review of Economic Policy, (32), 391– 409.

Ebrahimi, Amir Hossein. (2017). Evaluation of Resilience of Urban Water Distribution Network and Development of Simultaneous Discrete and Hydraulic Event Simulation Program Based on Resilience Criteria (REWAT) Case Study, Islamshahr Urban Water Distribution Network. Master thesis. Sharif University of Technology. Tehran.

Farzad Behtash, Mohammad Reza, Kaynejad, Mohammad Ali, Pirbabaei, Mohammad Taghi, Asghari, Ali. (2013). Evaluation and analysis of resilience components of Tabriz metropolis. Journal of Fine Arts, 18 (3), 33-42 .

Haghjuo, Mohammad Reza (2018). Basics of passive defense. Educational booklet, University of Mazandaran.

Hokstad, Per, Utne, Ingrid B., Vatn, Jørn. (2012). Risk and Interdependencies in Critical Infrastructures; A Guideline for Analysis, Springer-Verlag London.

Klein, R.G.N. Thomalla, F. (2003). Resilience to Natural Hazard: How Useful is this Concept. Environmental Hazards.

Lovecek, T. Ristvej, J. Simak, L .(2010).CriticalInfrastructureProtectionSystemsEffectivenessEvaluation. J.Homel. Secur. Emerg. Manag. 7(34).

Mayunga, Joseph S(2007). Understanding and applying the concept of community disaster resilience: a capital-based approach, A draft working paper prepared for the summer academy for social vulnerability are resilience building, Munich, Germany.

Mohamadi dehcheshme, Mostafa. Alizadeh, Hadi. Abasigojani, Davoud. (2019). Spatial Analysis of Resilience Explanatory Indicators in Arterial Transport Infrastructure (Case Study: Ahwaz Metropolitan Area). Geographical Planning Research, 7 (2), 375-391

Ouyang, Min, Due as-Osorio, Leonardo, Min, Xing (2012). A three stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems. Structure Safety, (36-37), 23-31.

Passive Defense Organization of the country under the supervision of Deputy of Urban Affairs (2018). Strategic document of urban defense of the country.

Passive Defense Organization of the country under the supervision of Deputy Minister of Urban Affairs (2019). Protecting urban infrastructure. Publication of the Center for Engineering and Technical Studies (1).

Rafieian, Mojtaba, Rezaei, Mohammad Reza, Asgari, Ali, Pahizgar, Akbar, Shayan, Siavash (2010). Conceptual Explanation of Resilience and Its Indexing in Community-Based Disaster Management (CBDM). Journal of Planning and Space Preparation, 15 (4), 19-41.

Ramazanzadeh Lasboi, Mehdi, Asgari, Ali, Badri, Seyed Ali (2014). Infrastructure and Disaster Resilience with Emphasis on Floods in the Study Area: Typical Tourism Areas of Kile Tonekabon Springs and Sardabood Kalardasht. Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards, 1 (1), 35-52.

Rehak, D, Senovsky, P, Slivkova, S (2018).Resilience of Critical Infrastructure Elements and Its Main Factors.

Rehak, D. Senovsky, P. Hromada, M. (2018). Analysis of Critical Infrastructure Network. In Modern and Interdisciplinary Problems in Network Science: A Translation Research Perspective; Chen, Z., Dehmer, M., Emmert-Streib, F., Shi, Y., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USApp. 143–171.

Wang, Jing. Wangda, Zou. Barbarigosb, Landolf, Rhode. Lua, Xing. Wang, Jianhui. Lin, Yanling. (2018). Literature Review on Modeling and Simulation of Energy Infrastructures from a Resilience Perspective. Reliability Engineering and System Safety.

Zhou, Hongjian. iing'ai, Wang. Jinhong, Wan. Huicong, Jia. (2010).Resilience to natural hazards: a geographic perspective, Natural Hazards, 59(1), 4-21.