# ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه معابر شهری و شناسایی نقاط بحرانی (مطالعه موردی: شبکه معابر شهری اصفهان)

**مقاله علمی - پژوهشی**

سروش معمارمنتظرین*، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
میثم اکبرزاده، استادیار، گروه مهندسی راه آهن، دانشکده مهندسی حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
شیدا سلیمانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی راه آهن، دانشکده مهندسی حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s.memarmontazerin@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۰- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶
صفحه ۳۷۸-۳۶۹

**چکیده**

***شبکه معابر شهری، یکی از زیرساخت‌های حیاتی شهرها است. اهمیت و گستردگی شبکه معابر، امکان وقوع حملات هدفمند و بروز اختلالات تصادفی در آن را افزایش می‌دهد. توانایی شبکه در تداوم کارکرد مناسب در شرایط گوناگون از جمله وقوع بحران واختلال از اهمیت به سزایی برخوردار است که از آن با عنوان استواری یاد می‌شود. مفهوم آسیب‌پذیری نقطه مقابل مفهوم استواری است. با توجه به گستردگی شبکه معابر شهری و محدودیت‌های مالی و عملیاتی برای بهبود استواری آن، شناسایی نقاط بحرانی برای اولویت‌بندی پروژه‌های تقویت شبکه امری ضروری است. نقاط بحرانی نقاطی هستند که اختلال عملکرد آن‌ها اثر قابل توجهی در همبندی[1] شبکه شهری دارد. در این پژوهش، رفتار شبکه در مواجهه با حملات هدفمند و اختلالات تصادفی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که شبکه معابر شهری در مواجهه با حملات هدفمند، آسیب پذیر هستند. علاوه بر این، شناسایی گره‌های بحرانی که اختلال در عملکرد آن‌ها موجب افت چشمگیر همبندی شبکه می‌گردد، توسط یک شاخص واحد امکان‌پذیر نبوده و بر اساس شدت اختلالات باید از شاخص‌های مختلف برای این منظور استفاده نمود. روش توسعه یافته در این پژوهش، برای سایر شبکه‌های حمل‌ونقلی نیز کاربردی است.***

**واژه‌های کلیدی:** آسیب‌پذیری، شبکه معابر شهری، پایداری شبکه، اختلالات، شبکه‌های پیچیده

## ۱- مقدمه

شهروندان هر روزه برای اهداف مختلفی از جمله کار، تحصیل، خرید، تفریح و غیره ناگزیر از جایجایی و سفر به نقاط مختلف هستند. شبکه معابر شهری نقش بی‌بدیلی در پاسخ به تقاضای روزافزون جابجایی در شهرها ایفا می‌نماید. از همین رو حفظ کارکرد مناسب آن در شرایط مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است. وضعیت عملکرد شبکه معابر شهری حاصل اندرکنش عرضه و تقاضاست. تغییرات ناگهانی در عرضه و یا تقاضا باعث برهم خوردن تعادل و بروز پیامدهایی مانند توزیع نامتوازن بار ترافیکی و یا قطع دسترسی نقاطی از شبکه می‌گردد. اختلال در عملکرد اجزای شبکه مانند انسداد معابر، نقص در زمان‌بندی تقاطعات، خرابی زیرساخت‌ها و ... که می‌تواند نتیجه حملات هدفمند و یا اختلالات تصادفی باشد، موجب تغییرات ناگهانی در

جانب عرضه می‌گردد. تغییرات ناگهانی جانب تقاضا شامل سفرهای ناشی از رویدادهای خاص (مانند مراسم ورزشی، هنری، آیینی) یا حجم بالای سفر به‌دلیل بروز بحران است. استحکام (استواری) شبکه، به معنی تداوم کارکرد مناسب آن در صورت بروز اختلال است. افزایش استواری شبکه که معادل کاهش آسیب‌پذیری آن است، شامل دو رکن اصلی تلاش برای پیشگیری از وقوع اختلالات و برنامه‌ریزی برای کاهش پیامدهای ناشی از وقوع اختلالات است. پژوهش حاضر بر رکن دوم متمرکز خواهد بود. به این منظور لازم است رفتار شبکه مورد نظر در مواجهه با اختلالات محتمل پیش‌بینی شود و نقاط آسیب‌پذیر شناسایی شده و نهایتاً اجزای آسیب‌پذیر شبکه تقویت شوند. پیچیدگی پیش‌بینی وضعیت تقاضا در شرایط خاص مانند وقوع بحران، بررسی وضعیت کارکرد و استواری شبکه در چنین شرایطی را مستلزم بهره‌گیری از روش‌های جدید و مبتکرانه می‌نماید.

تا کنون پژوهش‌های فراوانی برای بررسی استواری شبکه توسعه یافته‌اند. دوآن و لو، استواری شبکه معابر شهری در سه سطح قطعه[۲]، کریدور[۳] و همایه[۴] را مورد بررسی و ارزیابی قرار داده و به معرفی آستانه بحران شبکه معابر شهری پرداخته‌اند که نتایج آن حاکی از وابستگی استواری سامانه به ویژگی‌های توپولوژیک و عدم وابستگی به ویژگی‌های جغرافیایی است (Duan & Lu,2014).

تیان و همکاران تقاطع‌های شهر پکن را به صورت گره و مسیرهای بین این تقاطع‌ها را به صورت کمان انتزاع کرده و سپس با شماره‌گذاری منظم گره‌ها و وزندهی به کمان‌های شبکه بر اساس معیارهای مختلف، به تحلیل عملکرد و استواری شبکه معابر شهری پکن پرداخته‌اند (Tian et al., 2016). شیخ محمدزاده و رجبی برای اندازه‌گیری اهمیت خیابان‌ها در شبکه معابر شهری شاخصی جدید با در نظر گرفتن محدودیت‌های ظرفیت معابر[۵]، الگوی تقاضای سفر[۶] و تعادل جریان ترافیک[۷]، توسعه داده و به وسیله این شاخص به بررسی تاثیر ساختار شبکه بر کارکرد آن پرداخته‌اند (Zadeh & Rajabi, 2013). الیوریا و همکاران با بررسی مفاهیم، شاخص‌ها و اصطلاحات مربوط به اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری شبکه‌های پیچیده به معرفی شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌ها پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که برای بررسی کارکرد شبکه، دو مفهوم ذکر شده باید به صورت جداگانه در نظر گرفته شوند زیرا آسیب‌پذیری شبکه متاثر از خصوصیات راه‌های جایگزین و اطمینان‌پذیری شبکه متاثر از میزان ازدحام شبکه می‌باشد (De Oliveira et al., 2016). لاتورا و مارچیوری به معرفی زیرساخت‌های حیاتی و سیاست‌های لازم برای حفاظت از آن‌ها پرداخته و با اندازه‌گیری میزان افت کارکرد شبکه حمل و نقلی در اثر حذف یک یا چند جزء، بحرانی بودن آن‌ها را بررسی کرده‌اند (Latora & Marchiori, 2005). اکبرزاده و همکاران نیز با توسعه روشی به بررسی آسیب‌پذیری شبکه معابر شهری و ارتباط آن با ساختار و عملکرد شبکه پرداخته‌اند (Akbarzadeh et al., 2017. 2018).

در این پژوهش با استفاده از مفاهیم شبکه‌های پیچیده، علاوه بر معرفی مجموعه‌ای از شاخص‌ها به منظور شناسایی گره‌های بحرانی، وضعیت کارکردی شبکه و رفتار آن در شرایط وقوع اختلال مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- روش تحقیق و ابزارها

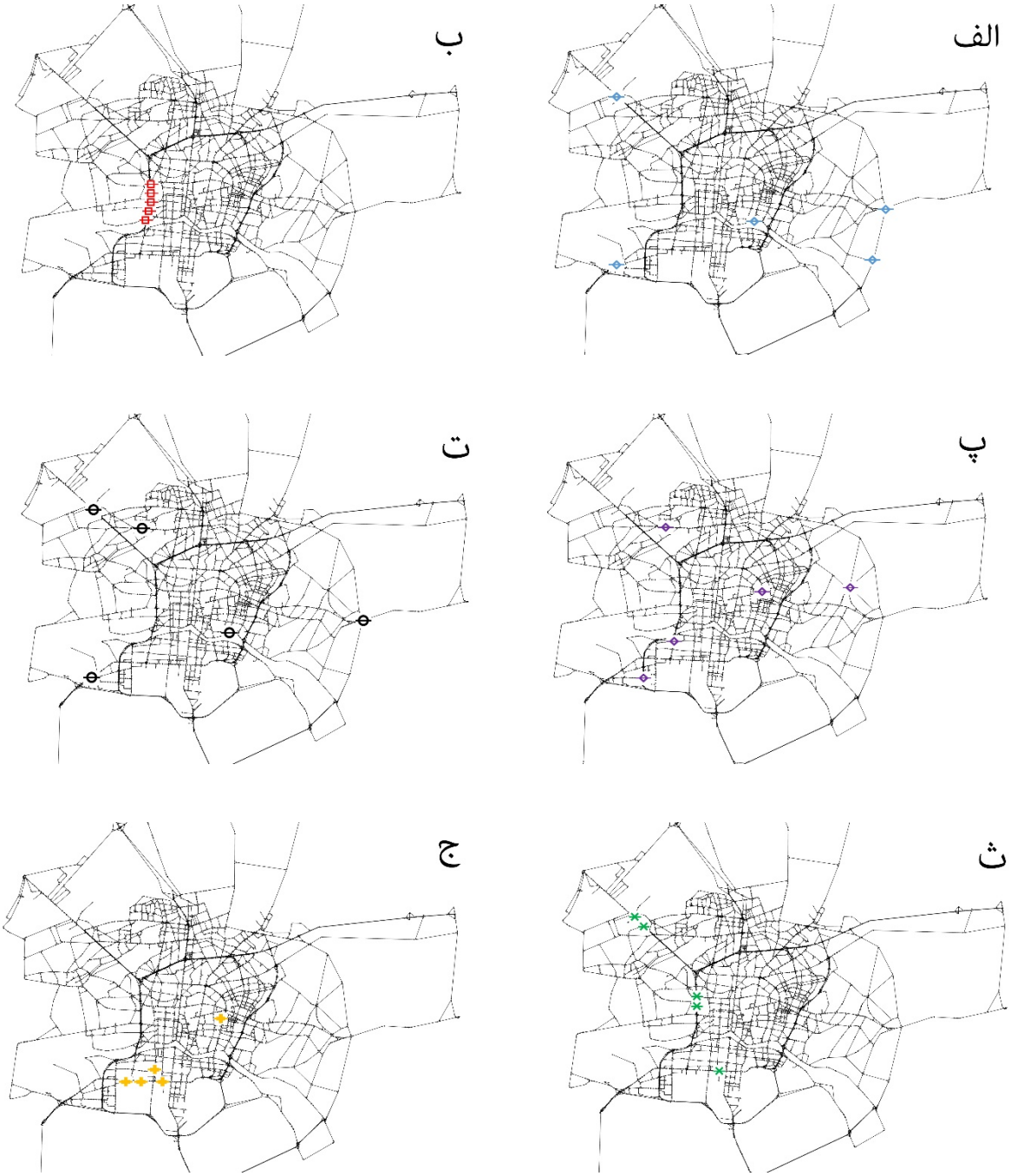
برای انتزاع شبکه معابر شهری به صورت گراف می‌توان از رویکرد اولیه و یا رویکرد دوگان[۸] استفاده نمود (Porta et al., 2006).

در رویکرد اولیه تقاطع‌ها و تبادلات به صورت گره و اتصال فیزیکی (معابر) میان آن‌ها به صورت کمان نمایش داده می‌شود. این رویکرد علاوه بر این که تصویر واقعی ملموس‌تری از شبکه به دست می‌دهد، می‌تواند ویژگی‌های معابر مانند ظرفیت، جریان عبوری، طول اقلیدسی و ... را با ضمیمه کردن یک عدد به کمان‌ها وارد محاسبات نماید. رویکرد دوگان بر خلاف رویکرد اول، خیابان‌ها و معابر را به صورت گره انتزاع می‌کند. گره‌های مربوط به معابری که با یکدیگر متقاطعند، به وسیله کمان‌ها در مدل به هم متصل می‌شوند. بر اساس این تعریف، کمان‌ها انتزاع تقاطع‌ها و تبادلات هستند. هر دوی این رویکردها با توجه به اهداف پژوهش می‌توانند به صورت جهت‌دار و یا بدون جهت استفاده شوند. با توجه به محاسن روش اولیه و امکان وارد کردن اطلاعات معابر در محاسبات، شبکه معابر شهر اصفهان با استفاده از این رویکرد انتزاع گردید.

با توجه به اهداف بررسی عملکرد شبکه معابر شهری، تا کنون شاخص‌های مختلفی مانند اندازه بزرگ‌ترین جزء شبکه (Callaway et al., 2000)، تغییرات کل زمان سفر (Scott et al., 2006)، ظرفیت وقفی (Yang et al., 2015)، کارایی سراسری (Lu et al., 2016) و ... برای اندازه‌گیری کارکرد شبکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، با توجه به اهمیت همبندی شبکه در شرایط بحران، شاخص اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. وقوع حملات و اختلالات در شبکه باعث از بین رفتن اتصال میان گره‌ها می‌گردد. در حملات و اختلالات جزئی، گره‌ها با استفاده از مسیرهای جایگزین متصل باقی می‌مانند. اما با افزایش شدت حملات و اختلالات، شبکه از حالت متصل خارج شده و به چند زیرشبکه تبدیل می‌گردد. بنابراین هر زیرشبکه از تعدادی گره که با کمان‌ها به هم متصلند تشکیل شده و هر زیرشبکه به زیرشبکه‌های دیگر متصل نیست. تعداد گره‌های موجود در هر زیرشبکه، اندازه آن زیرشبکه است. بزرگ‌ترین زیرشبکه همان بزرگ‌ترین جزء شبکه است که از بیشترین تعداد گره‌هایی که پس از وقوع حمله یا اختلال، متصل باقی مانده‌اند تشکیل می‌گردد. اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء شبکه عبارت است از حاصل تقسیم اندازه بزرگ‌ترین جزء شبکه بر تعداد کل گره‌های شبکه پیش از وقوع حمله یا اختلال.

اختلالات محتمل در شبکه معابر شهری به دو دسته حملات هدفمند و اختلالات تصادفی طبقه‌بندی می‌شوند. منشأ اختلالات تصادفی عوامل درونی سامانه بوده و افراد و/یا نیروهای خارج از سامانه در وقوع آن‌ها دخالتی ندارند. این اختلالات بدون برنامه‌ریزی قبلی اتفاق می‌افتند و در نتیجه احتمال وقوع آن‌ها در میان تمامی اجزای شبکه برابر است. در شبکه حمل‌ونقل وقوع تصادفات، اختلال در زمان‌بندی چراغ‌های راهنمایی تقاطع‌ها و ... در این دسته اختلالات قرار می‌گیرند. با توجه به احتمال یکسان وقوع اختلالات تصادفی در تمام گره‌های شبکه، برای بررسی رفتار شبکه در مقابل این اختلالات گره‌ها به صورت اتفاقی حذف شده و شاخص همبندی به صورت همزمان اندازه‌گیری شده است. برای حصول اطمینان از اتفاقی بودن این فرایند، روش مذکور ۵۰ بار تکرار شده و میانگین مقادیر شاخص همبندی به عنوان مقادیر نهایی در نظر گرفته شده‌اند.

حملات هدفمند توسط نیروها و اشخاص خارج از سامانه و با برنامه‌ریزی قبلی به شبکه تحمیل می‌شوند. با توجه به هدف‌دار بودن این دسته از حملات، احتمال وقوع آن‌ها در نقاط مرکزی سامانه بیشتر است (Yang et al., 2015). بر همین اساس، به منظور بررسی رفتار شبکه در مقابل حملات هدفمند، پس از محاسبه شاخص‌های مرکزیت گره‌ها، آن‌ها به ترتیب نزولی حذف شده و شاخص همبندی شبکه به صورت هم زمان اندازه‌گیری شده است. به بیان دیگر، گره‌ها به ترتیب میزان مرکزیت حذف شده و همزمان میزان افت کارکرد شبکه در اثر حذف آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. اگر میزان حساسیت کارکرد شبکه به حذف گره‌ها بر اساس یک شاخص زیاد باشد، می‌توان نتیجه گرفت که آن شاخص مبنای مناسبی برای شناسایی گره‌های بحرانی است. تا کنون شاخص‌های فراوانی برای اندازه‌گیری مرکزیت گره‌های شبکه توسعه یافته‌اند. این شاخص‌ها را می‌توان به دو دسته ساختاری و اصلاح شونده طبقه‌بندی نمود (Lu et al., 2016). مرکزیت‌های ساختاری را نیز می‌توان به دو دسته مرکزیت محلی و مرکزیت سراسری دسته بندی کرد. شاخص‌های مرکزیت محلی بر مبنای میزان اهمیت یک گره در مقیاس خرد و در تبادل با گره‌های همسایه توسعه یافته و شامل درجه، رتبه محلی (Chen et al., 2012)، رتبه خوشگی (Petermann & De Los Rios, 2004)، شاخص هسته (Kitsak et al., 2010)، شاخص H (Hirsch, 2005) و ... می‌گردند. شاخص‌های مرکزیت سراسری بر مبنای نقش گره در کل شبکه و در مقیاس کلان به محاسبه میزان مرکزیت گره‌ها پرداخته و شامل شاخص‌های خروج از مرکزیت (Hage & Harary, 1995)، مرکزیت کاتز (Katz, 1953)، شاخص اطلاعات (Stephenson & Zelen, 1989)، مرکزیت میانگی (Bavelas, 1948)، مرکزیت زیرگراف (Estrada & Rodriguez, 2005) و ... می‌گردند. شاخص‌هایی که برای تعیین میزان اهمیت گره‌ها در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارتند از درجه[۹]، مرکزیت میانگی[۱۰]، درجه وزن‌دار[۱۱] و درجه وزن‌دار آلفا[۱۲].




**تصویر ۱. گره‌های مرکزی شبکه معابر شهری اصفهان بر اساس شاخص‌های (الف) درجه وزندار ظرفیت، (ب) مرکزیت میانگی، (پ) درجه، (ت) درجه وزندار آلفا، (ث) درجه وزندار جریان و (ج) ازدحام**

درجه یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای تعیین گره‌های مرکزی شبکه است. درجه گره i ($D_i$) تعداد اتصالات مستقیم گره i با گره‌های مجاور و یا به بیان دیگر تعداد گره‌های همسایه این گره است (Barthelemy, 2011). در محاسبه درجه هر گره، وزن کمان‌ها برابر ۱ در نظر گرفته شده و بنابراین اهمیت گره بر مبنای تعداد اتصالات با گره‌های مجاور مورد ارزیابی قرار

می‌گیرد. در صورتی که مقادیر دیگری مانند ظرفیت، جریان و ... به عنوان وزن کمان‌ها در نظر گرفته شده و درجه گره (مجموع وزن کمان‌های متصل به آن گره) محاسبه گردد، درجه وزندار گره ($WD_i$) حاصل می‌شود.

درجه وزن‌دار ظرفیت از الصاق ظرفیت معابر به عنوان وزن کمان متناظر آن‌ها حاصل می‌شود. این شاخص مجموع ظرفیت معابر منتهی به گره مورد نظر را محاسبه کرده و ارتباط مستقیمی با ظرفیت گره مورد نظر دارد. گره‌های با درجه وزندار بالا نمایش دهنده نقاطی در شبکه هستند که محل تقاطع و تبادل معابر با ظرفیت بالای تردد می‌باشند. از همین رو این گره‌ها اهمیت ویژه‌ای در حفظ کارکرد شبکه داشته و اختلال در عملکرد آن‌ها موجب بروز مشکل در کارکرد معابر مهم شبکه می‌گردد.

علاوه بر ظرفیت، الصاق میزان تردد در معابر به عنوان وزن کمان متناظر آن‌ها می‌تواند نقش مهمی در شناسایی گره‌های پر تردد ایفا نماید. درجه وزندار جریان که حاصل جمع میزان تردد منتهی به یک گره است، تخمینی از میزان تردد یک گره می‌باشد. اهمیت محاسبه این شاخص در آن است که در اکثر پروژه‌های شهری، معابر پر تردد مورد توجه ویژه قرار گرفته و اجرای پروژه‌های مربوط به مقاوم‌سازی و بهبود کارکرد آن‌ها در اولویت قرار می‌گیرد. در کنار گره‌های پر تردد، گره‌های پرازدحام نیز از اهمیت ویژه‌ای برای مدیران شهری برخوردارند و مطالعه اثرات اختلال در عملکرد این گره‌ها بر عملکرد کلی شبکه، نقش مهمی در اولویت‌بندی پروژه‌های شهری از منظر ترافیکی و آسیب‌پذیری دارد. در این پژوهش از نسبت جریان عبوری به ظرفیت معابر به عنوان شاخصی از ازدحام استفاده شده است. با استفاده از این شاخص به عنوان وزن کمان‌ها، درجه وزندار ازدحام گره‌ها که به اختصار ازدحام نامیده می‌شود محاسبه شده و بیانگر وضعیت ازدحام گره‌های مختلف شبکه است.

در کنار درجه و درجه وزندار که شاخص‌هایی محلی برای تعیین اهمیت گره‌های شبکه هستند، شاخص مرکزیت میانگی به عنوان یک شاخص سراسری که به صورت زیر محاسبه می‌شود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

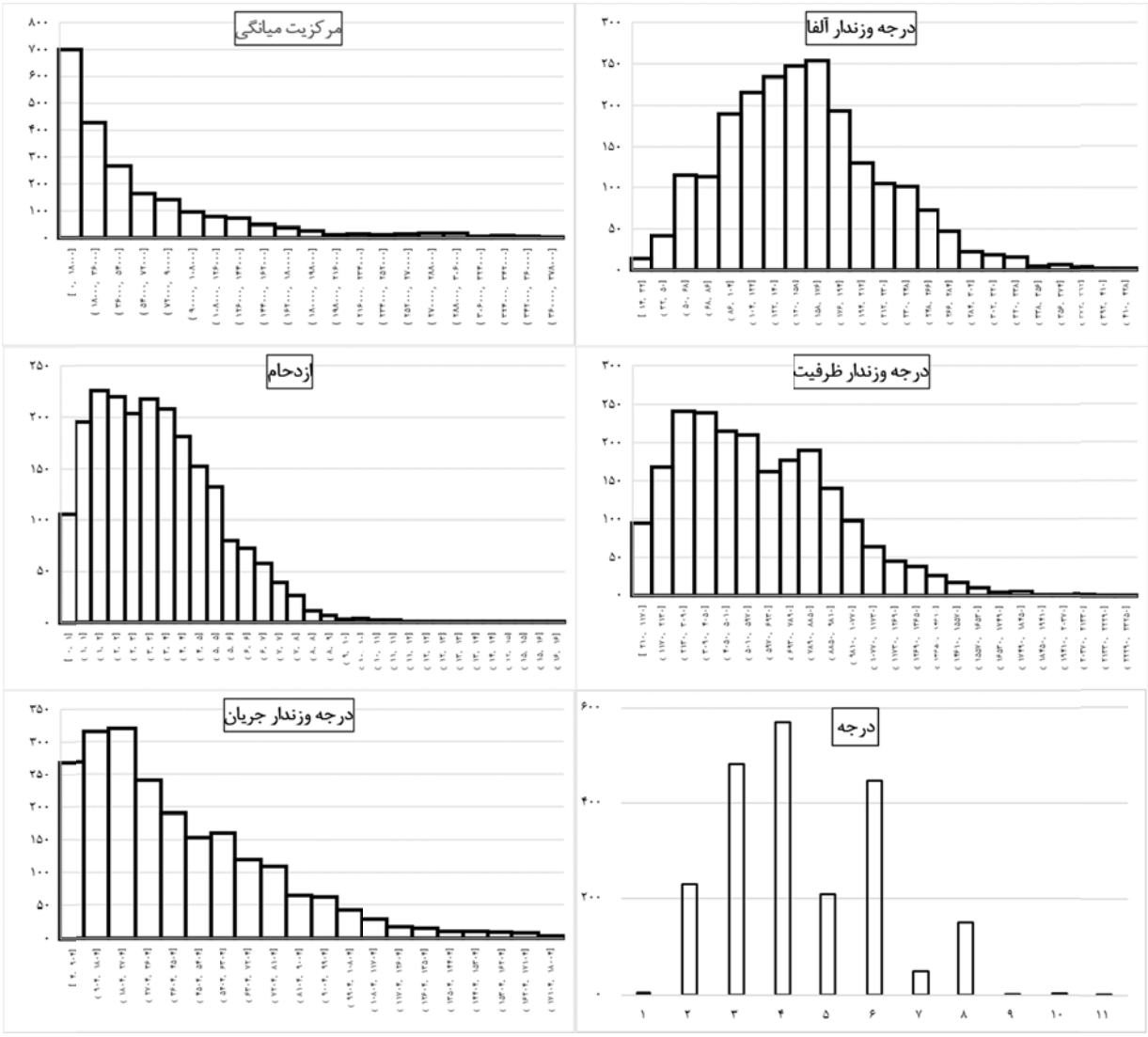
$$BC(i) = \sum_{s \neq t} \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \qquad (۱)$$

در این رابطه، ($\sigma_{st}$) تعداد کل کوتاه‌ترین مسیرهای میان گره‌های s و t و ($\sigma_{st}(i)$) تعداد کوتاه‌ترین مسیرهای میان این دو گره است که از گره i عبور می‌کنند (Barthelemy, 2011). بر اساس این شاخص، میزان مرکزیت یک گره به تعداد نسبی کوتاه‌ترین مسیرهایی که از این گره عبور می‌کنند وابسته است. برای محاسبه کوتاه‌ترین مسیر میان دو گره در شبکه معابر شهری رویکردهای مختلفی وجود دارد. با الصاق وزن‌های مختلف مانند وزن یک، ازدحام، زمان سفر و معکوس ظرفیت می‌توان کوتاه‌ترین مسیرها را بر اساس تعداد کمان‌های طی شده، خلوت‌ترین مسیر، سریع‌ترین مسیر و مناسب‌ترین مسیر بر اساس عرضه شناسایی نمود و از آن‌ها برای محاسبه مرکزیت میانگی استفاده کرد. نکته جالب در این زمینه این است که نتایج نشان می‌دهند که حذف گره‌های دارای مقادیر بالای مرکزیت میانگی با وزن یک موجب ایجاد بیشترین آسیب‌پذیری (افت همبندی شبکه) در شبکه معابر شهری اصفهان می‌گردد (Akbarzadeh et al., 2018). از همین رو در این پژوهش از شاخص مرکزیت میانگی با وزن یک که به اختصار شاخص مرکزیت میانگی نامیده می‌شود استفاده شده است.

شاخص درجه وزن‌دار آلفا ترکیبی از درجه و درجه وزن‌دار ظرفیت می‌باشد که اهمیت یک گره را بر مبنای تعداد کمان‌های متصل و همین‌طور ظرفیت این کمان‌ها مورد ارزیابی قرار می‌دهد. از آن‌جا که درجه صرفاً تعداد کمان‌ها را لحاظ کرده و از وزن آن‌ها غفلت می‌کند و درجه وزندار ظرفیت نیز به علت غفلت از تعداد کمان‌ها امکان تمایز میان شرایط مختلف مانند اتصال تنها یک کمان با وزن بسیار زیاد و یا تعداد کمان‌های زیاد با وزن کم را فراهم نمی‌نماید، شاخص درجه وزندار آلفا برای پوشش این نواقص توسعه یافته است (Opsahl et al., 2010):

$$WD^{\alpha}(i) = D_{(i)} \times \left(\frac{WD_{(i)}}{D_{(i)}}\right)^{0.5} = {D_{(i)}}^{0.5} \times {WD_{(i)}}^{0.5} \qquad (۲)$$

علاوه بر شاخص‌های اشاره شده، میزان مرکزیت گره‌های شبکه معابر شهر اصفهان به کمک شاخص‌های دیگر مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. از آن‌جا که نتایج اولیه حاکی از استواری بالای شبکه در مواجهه با حذف گره‌ها بر اساس این شاخص‌ها است، از اشاره به آن‌ها در این پژوهش خودداری نموده‌ایم.



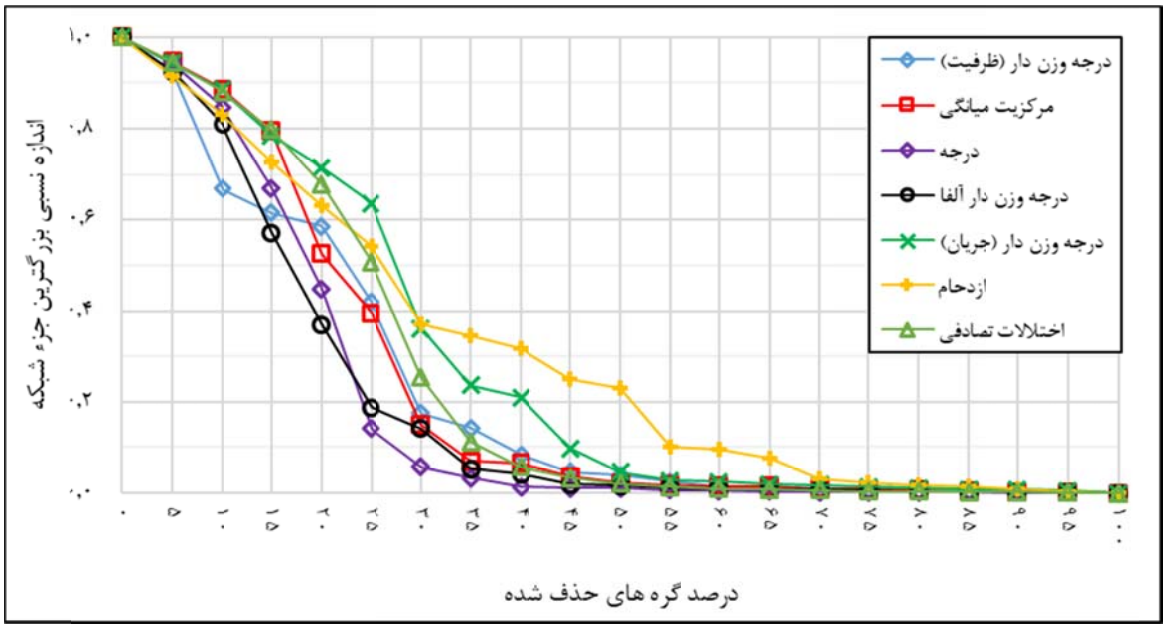

**تصویر ۲. توزیع شاخص‌های مرکزیت گره‌های شبکه معابر شهری اصفهان**

## ۳- نتیجه‌گیری

روند فروپاشی شبکه معابر شهر اصفهان در مواجهه با حملات هدفمند و اختلالات تصادفی در تصویر ۳ نمایش داده شده است که در آن محور افقی درصد گره‌های حذف شده و محور قائم، اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء شبکه است. شبکه معابر شهری در مقابله با اختلالات تصادفی و حملات هدفمند، رفتار کلی مشابهی را نمایش می‌دهد (سیگموئید معکوس). در اختلالات جزئی شبکه با ارائه راه‌های جایگزین مقاومت نموده و شاخص همبندی با شیب ملایمی افت می‌کند. بنابراین شبکه از هم گسیخته نشده و صرفا گره‌های آسیب دیده و تعداد معدودی گره‌های دیگر از شبکه اصلی مجزا می‌شوند. با حذف حدود ۵ درصد گره‌ها شاخص همبندی روند نزولی شدیدتری را تجربه نموده و نهایتاً شبکه دچار فروپاشی می‌گردد. انجام مطالعاتی برای تعیین نقطه بحرانی تغییر شیب نزول همبندی شبکه و راهکارهای افزایش آن می‌تواند نقش مهمی در بهبود استواری شبکه ایفا نماید. در اختلالات کمتر از ۵ درصد، ازدحام شاخصی مناسب برای تعیین نقاط بحرانی است. این موضوع سبب می‌شود که اولویت‌بندی پروژه‌های شهری بر اساس میزان ازدحام علاوه بر بهبود وضعیت ترافیکی شبکه، موجب بهبود استواری شبکه در

مواجهه با اختلالات جزئی نیز گردد. در اختلالات وسیع، نقاط بحرانی به کمک شاخص‌های درجه وزندار ظرفیت، درجه وزندار آلفا و درجه قابل شناسایی هستند. نکته قابل توجه آن است که درجه وزندار جریان، نه در اختلالات جزئی و نه در اختلالات وسیع تعیین‌کننده نیست. بنابراین علیرغم گمان‌های شهودی اولیه، حذف گره‌های پر تردد اثر چندانی بر همبندی شبکه و آسیب‌پذیری آن ندارد. علیرغم تشابه رفتار کلی فروپاشی شبکه، نمی‌توان شاخص واحدی برای تعیین نقاط بحرانی سامانه برگزید و لازم است که بر اساس مقیاس اختلالات این بررسی به صورت مجزا صورت گیرد. به طور کلی ویژگی‌های پویای شبکه نقش کمرنگی در بررسی استواری شبکه به ویژه در مواجهه با اختلالات وسیع ایفا می‌نمایند. در مقابل شاخص‌های ایستا که نماینده ویژگی‌های توپولوژیک شبکه هستند نقش مهمی در تعیین نقاط بحرانی ایفا می‌نمایند.

مقایسه رفتار شبکه در مواجهه با حملات هدفمند و اختلالات تصادفی نشان دهنده مقاومت بالاتر شبکه در مقابل اختلالات تصادفی است. این مفهوم از آن جهت دارای اهمیت است که به کمک آن و با بررسی توزیع شاخص‌های مرکزیت گره‌های شبکه، می‌توان بی‌مقیاس بودن شبکه را مورد بررسی و تحلیل قرار داد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که حملات هدفمند جزئی و اختلالات تصادفی مشکل چندانی برای همبندی شبکه معابر شهری ایجاد نمی‌نمایند. در مورد حملات هدفمند نیز می‌توان با بررسی ساختار شبکه، اطلاعات ارزشمندی در مورد استواری آن به دست آورده و مشکل مطالعات پیچیده و هزینه‌بر بررسی الگوهای تقاضا در مواقع بروز بحران را مرتفع نمود. روش توسعه یافته در این پژوهش قابلیت تعمیم به سایر شبکه‌های حمل‌ونقلی را دارا می‌باشد.




**تصویر ۳. روند فروپاشی شبکه معابر شهری اصفهان در اثر حذف گره‌های آن**

## ٤- مراجع

-Akbarzadeh M, Memarmontazerin S, Derrible S, Reihani SFS, (2017), "The role of travel demand and network centrality on the connectivity and resilience of an urban street system", Transportation, pp.1-15.

-Akbarzadeh M, Memarmontazerin S., Soleimani S., (2018), "Where to look for power Laws in urban road networks?" Applied Network Science, April 04,3(1):4.Duan Y, Lu F., (2014), "Robustness of city road networks at different granularities", Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 411, pp.21-34.

-De Oliveira EL., da Silva Portugal L., Junior WP, (2016), "Indicators of reliability and vulnerability: Similarities and differences in ranking links of a complex road system",

-Katz L., (1953), "A new status index derived from sociometric analysis", Psychometrika, 18(1), pp.39-43.
-Stephenson K, Zelen M., (1989), "Rethinking centrality: Methods and examples. Social networks", 11(1), pp.1-37.
-Bavelas A., (1948), "A mathematical model for group structures", Human organization,7(3):16.
-Estrada E. Rodriguez-Velazquez JA., (2005), "Subgraph centrality in complex networks", Physical Review E., 71(5):056103.
-Barthélemy M., (2011), "Spatial networks. Physics Reports", 499(1), pp.1-101.
-Opsahl T, Agneessens F, Skvoretz J., (2010), "Node centrality in weighted networks: Generalizing degree and shortest paths Social networks", 32(3), pp.245-251.
-Scott DM, Novak DC, Aultman-Hall L, Guo F., (2006), "Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks", Journal of Transport Geography, 14(3), pp.215-227.
-Tian Z, Jia L, Dong H, Su F, Zhang Z., (2016), "Analysis of urban road traffic network based on complex network", Procedia engineering,137, pp.537-546.
-Yang Y, Liu Y, Zhou M, Li F, Sun C., (2015),"Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory: a case study of the Beijing Subway", Safety science,79, pp.149-162.
-Zadeh ASM, Rajabi MA., (2013), "Analyzing the effect of the street network configuration on the efficiency of an urban transportation system. Cities", 31, pp.285-297.
Transportation Research Part A: Policy and Practice, 88, pp.195-208.
-Latora V, Marchiori M. Vulnerability and protection of infrastructure networks", Physical Review E., (2005), 01/20/;71(1):015103.
-Porta S, Crucitti P, Latora V., (2006), "The network analysis of urban streets: a primal approach", Environment and Planning B: planning and design, 33(5), pp.705-725.
-Porta S, Crucitti P, Latora V., (2006), "The network analysis of urban streets: a dual approach. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications", 369(2) , pp.853-66.
-Callaway DS, Newman ME, Strogatz SH, Watts DJ., (2000), "Network robustness and fragility: Percolation on random graphs, Physical review letters", 85(25):5468.
-Lü L, Chen D, Ren X-L, Zhang Q-M, Zhang Y-C, Zhou T., (2016), "Vital nodes identification in complex networks", Physics Reports, 650, pp.1-63.
-Chen D, Lü L, Shang M-S, Zhang Y-C, Zhou T., (2012), "Identifying influential nodes in complex networks", Physica a: Statistical mechanics and its applications, 391(4), pp.1777-1787.
-Petermann T, De Los Rios P., (2004), "Role of clustering and gridlike ordering in epidemic spreading.", Physical Review E., 69(6):066116.
-Kitsak M, Gallos LK, Havlin S, Liljeros F. Muchnik L. Stanley HE, et al., (2010), "Identification of influential spreaders in complex networks., Nature physics, 6(11),888.
-Hirsch JE., (2005), "An index to quantify an individual's scientific research output", Proceedings of the National academy of Sciences, 102(46), pp.16569-16572.
-Hage P. Harary F., (1995), "Eccentricity and centrality in networks. Social networks",17(1), pp.57-63.

# Evaluating the Vulnerability of Urban Transportation Networks and Identification of Critical Nodes (Case Study: Isfahan Urban Transportation Network)

*Soroush Memarmontazerin, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.*
*Meisam Akbarzadeh, Assistant Professor, Department of Transportation Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.*
*Sheida Soleimani, M.Sc., Student, Department of Transportation Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.*

*E-mail: s.memarmontazerin@modares.ac.ir*

Received: February 2023 - Accepted: May 2023

**ABSTRACT**
Urban transportation networks are among critical urban infrastructures. The importance and expansion of this network increase the possibility of occurrence of malicious attacks and random failures. Network robustness is the capability of the network to perform continuously in various situation including crisis and disorder. Vulnerability is the opposite of the robustness concept. Considering the financial and operational constraints to enhance the robustness of an urban transportation network, identification of critical nodes whose removal leads to plunge in network connectivity is necessary. In this study the behavior of urban transportation networks against malicious attacks and random failures is assessed. The results reveal that urban transportation networks are vulnerable against malicious attacks. Besides, identification of critical nodes is not possible by using a unique index and should be done by opting appropriate indices based on the severity of disorder. The developed method in this research can be applied to other transportation networks.

**Keywords:** Vulnerability, Urban Transportation Network, Network Sustainability, Disorders, Complex Networks