شناسایی نقاط بحرانی شبکه قطار شهری با استفاده از مفاهیم شبکه‌های زمانمند (مطالعه موردی: شبکه قطار شهری تهران)

علمی - پژوهشی

سروش معمارمنتظرین، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
محمود صفارزاده*، استاد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
آرمان صفارزاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه کارلتون، اتاوا، کانادا
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: saffar_m@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷- پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵
صفحه ۵۴-۴۳

چکیده

شبکه قطار شهری یکی از زیرساخت‌های حیاتی است که نقش مهمی در توسعه پایدار شهرها ایفا می‌نماید، بنابراین حفظ کارکرد شبکه در شرایط مختلف از جمله وقوع اختلال از اهمیت بالایی برخوردار است که از آن با عنوان استواری یاد می‌شود. با توجه به محدودیت‌های مالی و عملیاتی برای ارتقا استواری شبکه، شناسایی نقاط بحرانی به منظور اولویت‌بندی پروژه‌های تقویت شبکه ضروری است. نقاط بحرانی، نقاطی هستند که اختلال در عملکرد آن‌ها تاثیر قابل توجهی بر همبندی (اتصال) و کارایی شبکه دارد. پژوهش‌های صورت گرفته تا کنون به بررسی استواری شبکه و شناسایی نقاط بحرانی در مواجهه با اختلالات دامنه‌دار و با تمرکز بر ساختار شبکه پرداخته‌اند. احتمال وقوع اختلالات دامنه‌دار در مقایسه با اختلالات متمرکز کمتر است. از طرفی تمرکز بر ساختار شبکه موجب از دست رفتن اطلاعات پویا و در نتیجه تخمین دور از واقعیت در مورد ویژگی‌های شبکه می‌گردد. در این پژوهش نقاط بحرانی در مواجهه با اختلالات متمرکز با استفاده از مفاهیم شبکه‌های زمانمند که هر دو دسته ویژگی‌های پویا و ساختاری را در نظر می‌گیرد، شناسایی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد ایستگاه‌های دروازه شمیران، شادمان، شهید بهشتی و میدان محمدیه، ایستگاه‌های بحرانی شبکه از هر دو منظر کارایی و همبندی هستند. این ایستگاه‌ها دارای مقادیر بالای شاخص‌های مرکزیت نیز هستند. بنابراین چنانچه شبکه قطار شهری با حملات هدفمند در گره‌های مهم (گره‌های با شاخص مرکزیت بالا) مواجه شود، در واقع گره‌های بحرانی شبکه مورد هدف قرار گرفته و عملکرد شبکه از منظر همبندی و کارایی به شدت کاهش خواهد یافت. این وضعیت نشان دهنده آسیب‌پذیری بالای شبکه قطار شهری در مواجهه با حملات هدفمند است. در مقابل، با توجه به نسبت بالای گره‌های غیربحرانی به گره‌های بحرانی و پایین بودن شاخص‌های مرکزیت گره‌های غیربحرانی، شبکه در مواجهه با اختلالات تصادفی استوار است. روش توسعه یافته در این پژوهش قابلیت تعمیم به سایر شبکه‌های حمل‌ونقلی را دارد.

واژه‌های کلیدی: استواری، آسیب‌پذیری، شبکه زمانمند، شبکه قطار شهری، شبکه حمل‌ونقل

۱-مقدمه

سرعت، ایمنی و سازگاری زیست محیطی قطار شهری، آن را به شیوه‌ای محبوب برای شهروندان و مدیران شهری تبدیل نموده است (Xing et al. 2017, He et al. 2018). با این وجود، وقوع طیف وسیعی از اختلالات از جمله پدیده‌های طبیعی مانند سیل، حملات تروریستی و یا اختلال در عملکرد اجزای سامانه می‌تواند موجب توقف عملکرد ایستگاه‌های این

سامانه شود (Li et al. 2017, Li et al. 2019, Lu and Lin 2019). اختلالاتی که تنها یک نقطه را مستقیما متاثر می‌نماید با عنوان اختلالات متمرکز و اختلالاتی که می‌تواند موجب تاثیر مستقیم بر بیش از یک نقطه به صورت همزمان شود با عنوان اختلالات دامنه‌دار یاد می‌شوند. با توجه به این موضوع، برای دستیابی به سامانه‌ای کارا و دارای قابلیت اطمینان بالا، مطالعه و برنامه‌ریزی به منظور حفظ کارکرد شبکه در شرایط مختلف از جمله وقوع اختلال ضروری است که از آن با عنوان استواری شبکه یاد می‌شود (Dekker et al. 2008). آسیب‌پذیری مفهوم مقابل استواری است. امکان تقویت کلیه اجزای شبکه برای مواجهه با اختلالات با توجه به محدودیت‌های اقتصادی و عملیاتی وجود ندارد و بنابراین اولویت بندی پروژه‌های ارتقا استواری شبکه اجتناب ناپذیر است. در چنین شرایطی انجام عملیات‌های تقویت در نقاطی از شبکه که توقف عملکرد آن‌ها موجب تاثیر قابل توجه بر همبندی (اتصال) و کارایی شبکه می‌گردد در اولویت قرار دارند. از این نقاط با عنوان نقاط بحرانی یاد می‌شود. بنابراین، شناسایی نقاط بحرانی برای اولویت‌بندی پروژه‌های تقویت شبکه ضروری است. این پروژه‌ها می‌تواند طیف وسیعی از اقدامات مانند افزایش تواتر بازدیدهای دوره‌ای تا احداث مسیرهای رزرو را در بر گیرد. در رویکردی دیگر چنان‌چه هدف از انجام پروژه‌های عملیاتی، تقویت شبکه نباشد، باز هم می‌توان از میزان بحرانی بودن نقاط محل اجرای پروژه به عنوان شاخصی برای وزن‌دهی و اولویت‌بندی سناریوهای مطرح شده بهره برد.

تا کنون پژوهش‌های فراوانی به منظور مطالعه استواری شبکه قطار شهری در مواجهه با اختلالات دامنه‌دار با استفاده از مفاهیم شبکه‌های پیچیده صورت پذیرفته است. در این رویکرد تمرکز بر ویژگی‌های ساختاری سامانه است. ایستگاه‌ها به صورت گره مدل شده و چنان‌چه حداقل یک سرویس میان دو ایستگاه در بازه مورد مطالعه وجود داشته باشد، گره‌های متناظر دو ایستگاه توسط کمانی جهت‌دار که نشان دهنده مسیر حرکت سرویس است، به یکدیگر متصل می‌شوند. برای مثال، دریبل و همکاران با استفاده از این رویکرد، استواری ۳۳ شبکه قطار شهری را در مواجهه با اختلالات دامنه‌دار مورد مطالعه قرار داده‌اند که نتایج آن حاکی از وجود تعداد اندکی گره مرکزی است که حذف آن‌ها تاثیر چشمگیری بر کارکرد شبکه دارد. از چنین شبکه‌هایی که توزیع شاخص مرکزیت گره‌های آن به صورت توانی بوده و در مواجهه با حملات به گره‌های مرکزی آسیب‌پذیری بالایی دارند با عنوان شبکه‌های بی مقیاس یاد می‌شود. افزایش تعداد ایستگاه‌های تقاطعی به عنوان پیشنهادی برای ارتقا استواری شبکه ارائه شده است (Derrible and Kennedy 2010). مورونت و همکاران شبکه اتوبوسرانی و متروی شهر مادرید را مورد مطالعه قرار داده‌اند که نتایج مطالعات آن‌ها نشان دهنده اهمیت فاکتورهای مربوط به ساختار شبکه (مانند کوتاه‌ترین فاصله میان گره‌ها) در آسیب‌پذیری شبکه است (Mouronte and Benito 2012). یانگ و همکارانش نیز به بررسی استواری شبکه قطار شهری پکن در مواجهه با حملات هدفمند و تصادفی دامنه‌دار پرداخته‌اند. حملات هدفمند از قبل برنامه‌ریزی شده، توسط عوامل بیرونی به سامانه تحمیل می‌شوند، احتمال وقوع آن‌ها در نقاط مرکزی بیشتر است و دارای اثرات تخریبی بیشتری هستند. نتایج این پژوهش نیز نشان دهنده بی مقیاس بودن شبکه و استواری پایین آن در مواجهه با حملات دنباله‌دار هدفمند است (Yang et al. 2015). وضعیت برقراری ارتباط میان ایستگاه‌های شبکه قطار شهری در طول زمان متغیر است (Gautreau et al. 2009, Pan and Saramäki 2011). از همین رو استفاده ازمفاهیم شبکه‌های پیچیده که در صورت وجود حداقل یک ارتباط میان دو ایستگاه در بازه مورد مطالعه، آن دو گره را به طور کلی متصل در نظر می‌گیرد، موجب از دست رفتن بسیاری از اطلاعات، جزئیات و ویژگی‌های پویای سامانه و تخمین دست بالا در مورد وضعیت اتصال و تخمین دست پایین در مورد مسافت میان گره‌ها می‌شود. با توجه به این موضوع، پژوهش‌هایی به منظور بررسی استواری شبکه در مواجهه با اختلالات دامنه‌دار با استفاده از مفاهیم شبکه‌های زمانمند که به صورت همزمان ویژگی‌های ساختاری و پویای شبکه را در نظر می‌گیرد توسعه یافتند. فن و همکاران با استفاده از داده‌های کارت‌های حمل‌ونقل هوشمند متروی شانگهای، ضمن مدل کردن اختلالات دامنه‌دار در شبکه با استفاده از مفاهیم شبکه‌های زمانمند به توسعه شاخص جدیدی برای بررسی استواری شبکه در مقابله با این اختلالات پرداخته‌اند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان دهنده تاثیر زمان وقوع اختلال و حجم تقاضا بر شدت عواقب آن است (Fan et al. 2020). ویلیامز و همکاران با در نظر گرفتن ویژگی‌های ساختاری و پویای شبکه متروی لندن و نیویورک به مطالعه رفتار این شبکه‌ها در

مواجهه با حملات دامنه‌دار هدفمند و تصادفی پرداخته‌اند. برای این منظور، شاخص‌های مرکزیت زمانمند گره‌ها محاسبه شده و گره‌ها به ترتیب نزولی این شاخص‌ها حذف شده و اندازه بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه به صورت همزمان اندازه‌گیری می‌شود. نتیجه پژوهش آن‌ها بیان می‌کند که شاخص مرکزیت نزدیکی، بهترین شاخص برای شناسایی نقاط بحرانی در حملات دامنه‌دار هدفمند است (Williams and Musolesi 2016). فنگ و همکاران با استفاده از مدل زمانمند شبکه قطار شهری به یافتن ارتباطی میان ویژگی‌های پویای شبکه و شاخص‌های زمانمند آن پرداخته‌اند. مطالعه استواری شبکه با استفاده از مدل توسعه یافته نیز به بررسی اثر زمان وقوع اختلال در تونل‌های ارتباطی (نه ایستگاه‌ها) پرداخته که نشان دهنده توزیع ناهمگون اثر این اختلالات در بازه‌های زمانی مختلف است (Feng et al. 2019).

بر اساس پژوهش‌های انجام شده، شناسایی نقاط بحرانی و رفتار شبکه قطار شهری در مواجهه با اختلالات متمرکز و تاثیر ویژگی‌های ساختاری و پویای شبکه بر میزان بحرانی بودن هر گره همچنان بی پاسخ مانده است. بنابراین برای پاسخ به این سوال، شبکه قطار شهری با استفاده از مفاهیم شبکه‌های زمانمند که هر دو دسته ویژگی‌های ساختاری و پویا را در نظر می‌گیرد مدل می‌شود. برای بررسی رفتار شبکه در مواجهه با اختلال در هر گره، گره‌ها به ترتیب حذف شده و میزان افت همبندی و کارایی شبکه به صورت همزمان اندازه‌گیری می‌شود. همبندی شبکه با استفاده از شاخص اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه و کارایی آن با استفاده از شاخص کارایی زمانمند محاسبه می‌شود. گره‌هایی که حذف آن‌ها موجب بیشترین کاهش در همبندی و کارایی شبکه شوند به عنوان نقاط بحرانی معرفی می‌شوند. در گام بعدی شاخص‌های مرکزیت نقاط شبکه محاسبه می‌شود.

بررسی همبستگی احتمالی ویژگی‌های ساختاری و پویا با میزان بحرانی بودن گره‌ها و همچنین میزان استواری شبکه در مواجهه با اختلالات تصادفی و هدفمند گام پایانی انجام این پژوهش است. مفاهیم و شاخص‌های مورد استفاده و راهبرد انجام پژوهش در بخش دوم به تفصیل بیان گردیده و سپس راهبرد مورد اشاره در بخش سوم بر روی داده‌های حقیقی شبکه قطار شهری تهران اجرا شده و نتایج آن گزارش گردیده است. نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده تشکیل دهنده قسمت پایانی این پژوهش است.

۲- پیشینه تحقیق

نقاط بحرانی، نقاطی هستند که اختلال در عملکرد آن‌ها موجب کاهش چشمگیر کارایی و/یا همبندی شبکه گردد. برای شناسایی این نقاط شبکه به صورت گراف زمانمند انتزاع می‌شود. مزیت این روش در نظر گرفتن همزمان ویژگی‌های ساختاری و پویای شبکه است. پس از آن هر گره حذف شده و میزان افت شاخص کارایی سراسری زمانمند و اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه اندازه‌گیری می‌شود. گره‌هایی که موجب بیشترین میزان افت گردند به عنوان گره‌های بحرانی معرفی می‌شوند. شاخص‌های مرکزیت گره‌ها نیز محاسبه شده و ارتباط آن با میزان بحرانی بودن گره مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش به معرفی جزئیات مربوط به راهبرد نظری پژوهش شامل مفاهیم گراف‌های زمانمند، شاخص‌های اندازه‌گیری کارکرد شبکه و شاخص‌های مرکزیت می‌پردازیم.

۲-۱-گراف زمانمند

شبکه قطار شهری را می‌توان با کمک گراف G که شامل N گره و E کمان است، مدل نمود. در این روش ایستگاه‌ها به صورت گره و ارتباط مستقیم میان آن‌ها به صورت کمانی جهت دار مدل می‌شوند. استفاده از گراف ایستای همفزون موجب از دست رفتن اطلاعات پویای شبکه می‌شود. به منظور در نظر گرفتن همزمان ویژگی‌های ساختاری و پویا، می‌توان شبکه را به صورت گراف زمانمند مدل نمود. در این رویکرد، بازه مورد مطالعه $[0, T]$ به M پنجره زمانی مساوی $[0, T] \subset [t_m, t_m + \delta t]$ تقسیم‌بندی می‌شود. چنان‌چه قطاری از ایستگاه $i \subset N$ به سمت ایستگاه $j \subset N$ در لحظه t_i به حرکت درآید، این ارتباط به صورت (i , j , t_i) نمایش داده می‌شود. در هر پنجره زمانی، گراف متناظر G_m با همفزون کردن تمامی ارتباطات (i , j , t_i) که رابطه (۱) را ارضا می‌نمایند به دست می‌آید.

$$t_m \le t_i \le t_m + \delta t \qquad (۱)$$

بنابراین می‌توان شبکه را با استفاده از M گراف ایستا $\{G_1, G_2, \dots, G_M\}$، که دارای توالی زمانی بوده و هر یک متناظر با پنجره زمانی $[t_m,\ t_m + \delta t]$ است، انتزاع نمود. به بیان دیگر، گراف زمانمند مجموعه‌ای از M گراف دارای توالی زمانی ایستا $\{G_1. G_2. \dots . G_M\}$ است که گراف G_m نمایش دهنده وضعیت شبکه در پنجره زمانی $[0,\ T]$ $\subset [t_m. t_m + \delta t]$ و شامل کمان‌هایی است که زمان برقراری آن‌ها با این پنجره همپوشانی دارند (در این بازه آغاز شده) (Holme and Saramäki 2013).

گام زمانمند از گره i به j به صورت مجموعه‌ای از کمان‌ها $\{(n_{r0}. n_{r1}). (n_{r1}. n_{r2}). \dots . (n_{r\,L-1}. n_{rL})\}$ که در آن $n_{r0} \equiv i$ و $n_{rL} \equiv j$ و کمان‌ها دارای توالی زمانی هستند ($t_{r0} < t_{r2} < \cdots < t_{rL}$) معرفی می‌گردد (Tang et al. 2010, Grindrod et al. 2011). چنان‌چه هریک از گره‌ها در طول یک گام تنها یک مرتبه طی شود، از آن گام با عنوان مسیر زمانمند یاد می‌شود. از تعداد کمان‌های طی شده در مسیر زمانمند (L) با عنوان طول توپولوژیکال مسیر یاد می‌شود. در مقابل طول زمانمند مسیر عبارت است از تعداد پنجره زمانی سپری شده برای طی مسیر ($t_{rL} - t_{r0}$). کوتاه‌ترین مسیر زمانمند از گره i به گره j مسیر زمانمندی است که دو گره i و j را متصل نموده و دارای کوتاه‌ترین طول زمانمند است. از طول این مسیر با عنوان فاصله زمانمند (d_{ij}) یاد می‌شود. همچنین طول کوتاه‌ترین مسیر توپولوژیکال (مسیر با کمترین تعداد کمان طی شده) که دو گره i و j را متصل می‌کند، فاصله توپولوژیکال (l_{ij}) است.

۲-۲-شاخص‌های اندازه‌گیری عملکرد شبکه

از مفهوم فاصله زمانمند می‌توان برای توسعه شاخصی برای اندازه‌گیری کارایی شبکه استفاده کرد. هرچه فاصله زمانمند میان گره‌های شبکه کمتر باشد، می‌توان در طی مدت زمان کوتاه‌تر (با صرف هزینه کمتر) به گره مقصد سفر نمود. به بیان دیگر هرچه میزان فاصله زمانمند میان گره‌ها در شبکه کمتر باشد، شبکه کاراتر است. بر اساس این مفهوم شاخص کارایی سراسری زمانمند به صورت زیر توسعه یافته است (Holme and Saramäki 2013):

$$TE = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{ij} \frac{1}{d_{ij}} \qquad (۲)$$

شبکه قطار شهری یک مجموعه متصل است که در آن می‌توان از هر نقطه به نقاط دیگر سفر نمود (به صورت مستقیم و یا از طریق سایر گره‌ها). اختلال در عملکرد یک نقطه موجب قطع ارتباط آن نقطه با سایر اجزای شبکه می‌شود. علاوه بر این مسیرهای زمانمندی که از این نقطه می‌گذرند نیز قطع می‌شوند. بنابراین اختلال در عملکرد ایستگاه i موجب قطع ارتباط خود آن ایستگاه و سایر ایستگاه‌هایی که با گذر از گره i به سایر نقاط شبکه متصل می‌شدند، می‌گردد. در چنین حالتی شبکه به چندین زیرشبکه مجزا تقسیم می‌شود که هریک شامل تعدادی گره و کمان هستند. زیرشبکه متصلی که بیشترین تعداد گره را دارد، بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه نامیده می‌شود و تعداد گره‌های آن، اندازه بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه است.

برای نرمال کردن به منظور ایجاد امکان مقایسه، می‌توان اندازه بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه را بر تعداد نقاط شبکه پیش از وقوع اختلال تقسیم نمود که در این صورت اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه به دست می‌آید. این شاخص را می‌توان به صورت رابطه زیر نوشت:

$$RSGC = \frac{N_{(i)}}{N} \qquad (۳)$$

که در آن $N_{(i)}$ اندازه بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه پس از وقوع اختلال در گره i است.

پس از وقوع اختلال (حذف) گره i، با اندازه‌گیری تغییرات شاخص‌های کارایی زمانمند و اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه، می‌توان ضمن بررسی تاثیر حذف آن گره بر کارایی و همبندی شبکه، میزان بحرانی بودن آن را تعیین کرد. گره‌هایی که حذف آن‌ها موجب ایجاد بیشترین کاهش در این شاخص‌ها شود، گره‌های بحرانی هستند.

۲-۳- شاخص‌های مرکزیت

پس از شناسایی گره‌های بحرانی شبکه، این سوال به ذهن می‌رسد که آیا ارتباطی میان ویژگی‌های ساختاری (توپولوژیک) و پویا (زمانمند) هر گره با میزان بحرانی بودن آن وجود دارد یا خیر. به بیان دیگر، آیا گره‌های بحرانی همان گره‌های مرکزی و مهم شبکه هستند؟ از آن‌جایی که ویژگی‌های ساختاری و پویای هر گره در شاخص‌های مرکزیت آن منعکس می‌شود، لازم است برای پاسخ به این سوال، شاخص‌های مرکزیت زمانمند و ایستا محاسبه شوند. درجه، مرکزیت میانگی و مرکزیت نزدیکی از جمله پرکاربردترین و مهم‌ترین شاخص‌های

تعیین مرکزیت و اهمیت اجزای شبکه هستند (Xinsheng et al. 2011, Hu and Liu 2015).

درجه، یک شاخص محلی[1] است که میزان مرکزیت هر گره را بر مبنای تعداد اتصالات مستقیم آن با سایر گره‌ها نمایش می‌دهد. درجه زمانمند ورودی/خروجی[2] گره i در بازه زمانی مطالعه [0, T] به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$DC_{[0,T]}^{in/out}(i) = \sum_{m=1}^{M} DC_m^{in/out}(i) \quad (۴)$$

$DC_m^{in/out}(i)$ تعداد کمان‌های ورودی به/خروجی از گره i در گراف G_m است.

مرکزیت نزدیکی ایستا/پویای گره i نشان دهنده میزان نزدیکی این گره به سایر گره‌ها (مرکزیت نزدیکی خروجی) و یا سایر گره‌ها به گره i (مرکزیت نزدیکی ورودی) از منظر ساختار/زمان است. مرکزیت نزدیکی ایستا و زمانمند به ترتیب بر اساس فاصله توپولوژیکال و زمانمند و به کمک روابط (۵) تا (۸) محاسبه می‌شود.

$$CC_S^{out}(i) = \frac{N-1}{\sum_j l_{ij}} \quad (۵)$$

$$CC_S^{in}(i) = \frac{N-1}{\sum_j l_{ji}} \quad (۶)$$

$$CC_{[0,T]}^{out}(i) = \sum_{0\le t\le T} \sum_{j\neq i} \frac{1}{d_{ij}} \quad (۷)$$

$$CC_{[0,T]}^{in}(i) = \sum_{0\le t\le T} \sum_{j\neq i} \frac{1}{d_{ji}} \quad (۸)$$

که در آن $CC_S^{out/in}(i)$ مرکزیت نزدیکی خروجی یا ورودی ایستا، $CC_{[0,T]}^{out/in}(i)$ مرکزیت خروجی یا ورودی زمانمند در بازه زمانی $[0,T]$ و d_{ij} فاصله زمانمند میان دو گره i و j است. شاخص مرکزیت میانگی، میزان مرکزیت هر گره را بر اساس نقش آن در اتصال سایر گره‌ها و میزان قرارگیری آن در کوتاه‌ترین مسیر میان دو گره اندازه گیری می‌کند. مرکزیت میانگی ایستا و زمانمند به ترتیب بر اساس روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$BC_S(i) = \sum_j \sum_{k\neq j} \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}} \quad (۹)$$

$$BC_{[0,T]}(i) = \sum_{0\le t\le T} \sum_{j\neq k\neq i} \frac{\left|STP_{jk}^{t,T}(i)\right|}{\left|STP_{jk}^{t,T}\right|} \quad (۱۰)$$

که در آن σ_{jk} تعداد کوتاه‌ترین مسیرهای ایستا میان گره‌های j و k و $\sigma_{jk}(i)$ تعدادی از این مسیرهاست که از گره i عبور می‌کند. $\left|STP_{jk}^{t,T}\right|$ نیز تعداد کوتاه‌ترین مسیرهای زمانمند میان گره‌های j و k در بازه زمانی [t , T] است و $\left|STP_{jk}^{t,T}(i)\right|$ تعدادی از این مسیرهاست که از گره i عبور می‌کنند.

۲-۴-اختلالات محتمل در شبکه

اختلالات محتمل در شبکه را می‌توان به دو دسته اختلالات تصادفی و حملات هدفمند طبقه‌بندی نمود. اختلالات تصادفی بدون برنامه‌ریزی قبلی و در اثر نقص در عملکرد اجزای داخلی سامانه پدید می‌آیند. احتمال وقوع اختلالات تصادفی در تمام اجزای سامانه برابر است.

در مقابل، حملات هدفمند با برنامه‌ریزی قبلی و توسط عوامل خارج از سامانه به منظور ایجاد بیشترین خرابی به سامانه تحمیل می‌شوند. احتمال وقوع این دست حملات در نقاط مرکزی سامانه بیشتر است (Kyriakidis et al. 2012, Wang 2013, Wang and Fang 2014).

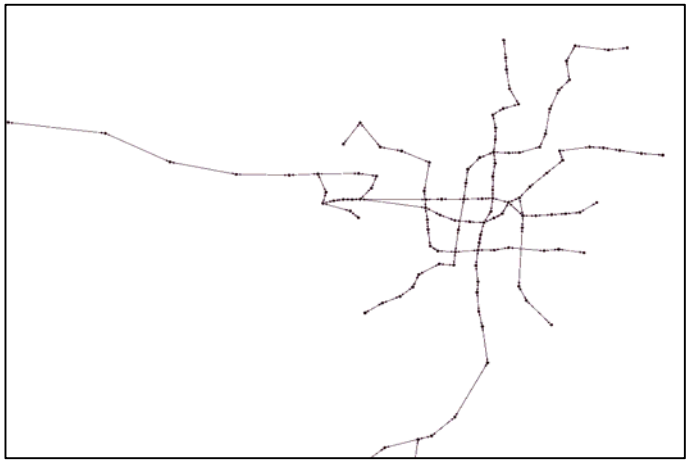
بر اساس اطلاعات ارائه شده در این قسمت و به منظور شناسایی نقاط بحرانی شبکه در مواجهه با اختلالات متمرکز، شبکه به صورت گراف زمانمند مدل می‌شود. پس از آن هر گره حذف شده و همزمان میزان افت شاخص کارایی زمانمند و اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء شبکه اندازه‌گیری می‌شود. بیشترین میزان افت نشان دهنده بحرانی‌ترین گره از منظر کارایی و/یا همبندی است.

در گام بعدی با محاسبه شاخص‌های درجه، مرکزیت نزدیکی و مرکزیت میانگی هر گره، ارتباط میان ویژگی‌های ساختاری و پویا با میزان بحرانی بودن هر گره و رفتار شبکه در مواجهه با حملات هدفمند و اختلالات تصادفی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-نتایج و بحث

داده‌های مربوط به شبکه قطار شهری تهران، شامل خطوط و ایستگاه‌های در حال بهره‌برداری و زمان‌بندی حرکت قطارها به تفکیک خطوط از سازمان بهره‌برداری قطار شهری تهران و حومه اخذ گردید. شبکه قطار شهری تهران از ۷ خط اصلی (خط شش به صورت نیمه شرقی و غربی) و سه خط انشعابی هشتگرد، فرودگاه مهرآباد و فرودگاه امام خمینی (ره) تشکیل شده است. ۱۲۶ ایستگاه در این خطوط در حال بهره‌برداری و سرویس دهی به شهروندان است. سرویس‌های جابجایی

مسافران در روزهای کاری از ساعت ۵ آغاز شده و تا حدود ساعت ۲۳ ادامه دارد. سرفاصله حرکت قطارها بر اساس خطوط مختلف و ساعات متفاوت در طول روز از ۳ تا ۲۰ دقیقه متغیر است. داده‌های اخذ شده از قالب جدول زمان‌بندی خارج شده و به صورت لیست کمان‌ها تهیه گردید. لیست کمان‌ها دارای ٦ ستون و ۳۷۷۳٦ ردیف است. دو ستون اول، شناسه و نام ایستگاه مبدا، ستون سوم و چهارم شناسه و نام ایستگاه مقصد و ستون‌های پنجم و ششم به ترتیب زمان آغاز حرکت و شماره پنجره زمانی متناظر با آن است. از این قالب داده‌ها به عنوان ورودی کدهای مربوط به محاسبات شاخص‌های عملکرد و مرکزیت استفاده می‌شود. به منظور در نظر گرفتن همزمان ویژگی‌های ساختاری و پویا، شبکه قطار شهری تهران به صورت گراف زمانمند $G\{۱۲٦, ۳۷۷۳٦, ۳٦۲\}$ مدل شده است. این گراف شامل ۳٦۲ گراف ایستا است. هر گراف ایستا شامل ۱۲٦ گره و کمان‌های جهت داری است که در پنجره زمانی متناظر آن گراف آغاز شده‌اند و وضعیت شبکه در یک پنجره زمانی ۳ دقیقه‌ای را به تصویر می‌کشد. علت انتخاب مدت زمان ۳ دقیقه به عنوان طول پنجره‌های زمانی این است که با توجه به کمینه سرفاصله زمانی در شبکه، دقت بیش از سه دقیقه اطلاعاتی به دست نداده و تنها بر سختی محاسبات می‌افزاید. مجموع کمان‌های گراف زمانمند نیز ۳۷۷۳٦ است که نشان دهنده تعداد کل سرویس‌های انجام شده در شبکه در طی یک روز کاری است. نمایی از شبکه قطار شهری تهران در شکل ۱ ارایه شده است.



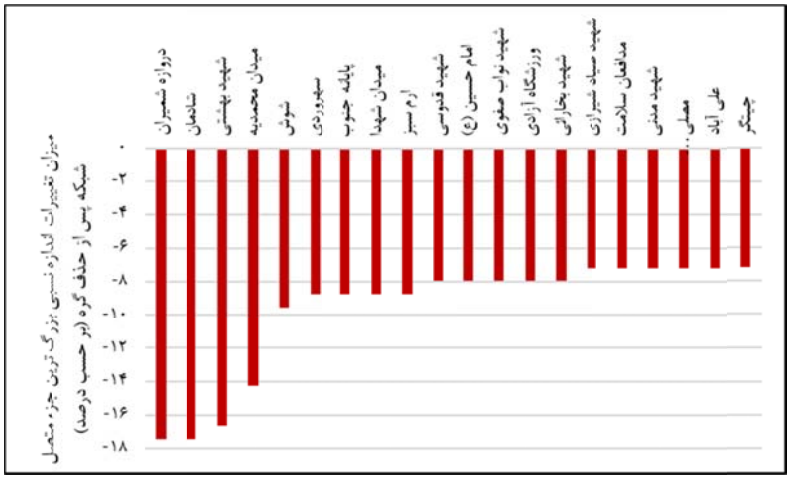
شکل ۱. نمایی از شبکه قطار شهری تهران و حومه

به منظور انجام محاسبات، هر گراف ایستا به صورت یک لایه تعریف می‌شود. هر لایه نشان دهنده یک بازه زمانی است و گره i در لایه n، به گره i در لایه‌های بعدی متصل است (به منظور در نظر گرفتن اهمیت ترتیب زمانی وقوع ارتباطات). به کمک این تعریف می‌توان فاصله زمانمند (d_{ij}) میان گره‌ها را محاسبه نمود. کمان میان دو گره یکسان در دو لایه متوالی متفاوت نشان دهنده زمان انتظار در آن گره برای رسیدن قطار است. از مفهوم فاصله زمانمند برای محاسبه شاخص‌های مرکزیت نزدیکی و میانگی زمانمند و کارایی سراسری زمانمند استفاده می‌شود. برای مدل کردن وقوع اختلال در هر ایستگاه، شدت اختلال را به گونه‌ای فرض می‌کنیم که موجب توقف عملیات سرویس رسانی در آن ایستگاه گردد. به طور کلی اختلالاتی با شدت کمتر که موجب توقف عملیات در ایستگاه نشوند، تاثیری بر عملکرد کلی شبکه ندارند. در چنین شرایطی، بروز اختلال منجر به توقف عملیات سرویس رسانی در ایستگاه، با حذف گره متناظر آن ایستگاه از شبکه مدل می‌شود. پس از حذف گره متناظر و بازتولید شبکه، میزان کاهش همبندی و کارایی شبکه نسبت به شرایط پیش از وقوع اختلال با استفاده از روابط (۲) و (۳) اندازه گیری می‌شود. این عمل برای تمام گره‌های شبکه صورت می‌پذیرد.

بیشترین میزان کاهش شاخص‌های اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه و کارایی سراسری و ایستگاه‌هایی که اختلال در عملکرد آن‌ها موجب برزو چنین کاهشی شده است به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ قابل مشاهده است. نتایج شکل ۲ بیانگر آن

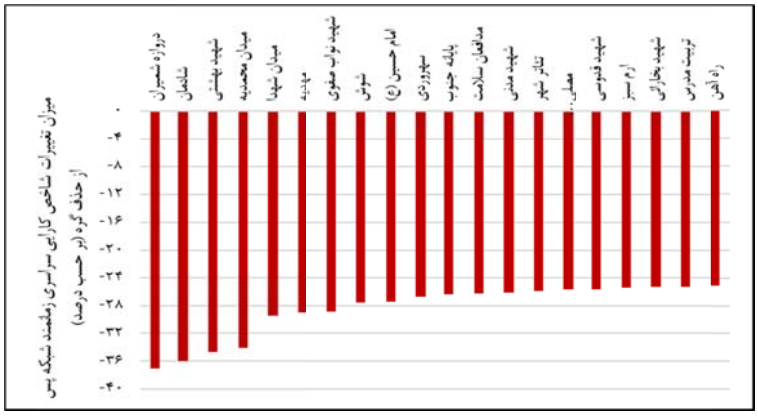
است که ایستگاه‌های دروازه شمیران و شادمان که اختلال در عملکرد آن‌ها موجب کاهش ۱۷ درصدی اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه می‌شود، بحرانی‌ترین گره‌های شبکه از منظر همبندی هستند. اختلال در عملکرد هر یک از این ایستگاه‌ها که در محل تقاطع خطوط ۲ و ٤ واقع شده‌اند، موجب قطع دسترسی ۲۲ ایستگاه دیگر (حدود ۱۷ درصد) از شبکه قطار شهری می‌گردد. پس از این دو ایستگاه، ایستگاه شهید بهشتی در تقاطع خطوط ۱ و ۳ با کاهش ۲۱ ایستگاه در صورت حذف و میدان محمدیه در تقاطع خطوط ۱ و ۷ با کاهش ۱۸ ایستگاه در صورت حذف به عنوان ایستگاه‌های بحرانی بعدی از منظر همبندی شناسایی شده‌اند. نتایج شکل ۳ نیز نشان می‌دهد اختلال در عملکرد ایستگاه دروازه شمیران، کارایی شبکه را به میزان قابل توجه ۳۷ درصد کاهش داده و بحرانی‌ترین گره شبکه از منظر کارایی است. ایستگاه‌های شادمان، شهید بهشتی و محمدیه که در صورت اختلال در عملکرد به ترتیب موجب کاهش ۳٦، ۳۵ و ۳٤ درصدی کارایی شبکه می‌گردند به عنوان گره‌های بحرانی بعدی شناسایی می‌شوند.

ایستگاه‌های دروازه شمیران، شادمان، شهید بهشتی و میدان محمدیه، ایستگاه‌های بحرانی شبکه قطار شهری تهران از منظر همبندی (ویژگی ساختاری) و کارایی زمانمند (ویژگی پویا هستند). علاوه بر این در میان ۲۰ گره بحرانی از هر دو منظر، ۱۷ گره مشترک است. در چنین شرایطی می‌توان با تقویت ایستگاه‌های بحرانی، میزان استواری شبکه را هم از منظر همبندی و کارایی تا حد قابل قبولی افزایش داد.



شکل ۲. بررسی تاثیر حذف گره‌ها بر وضعیت همبندی شبکه

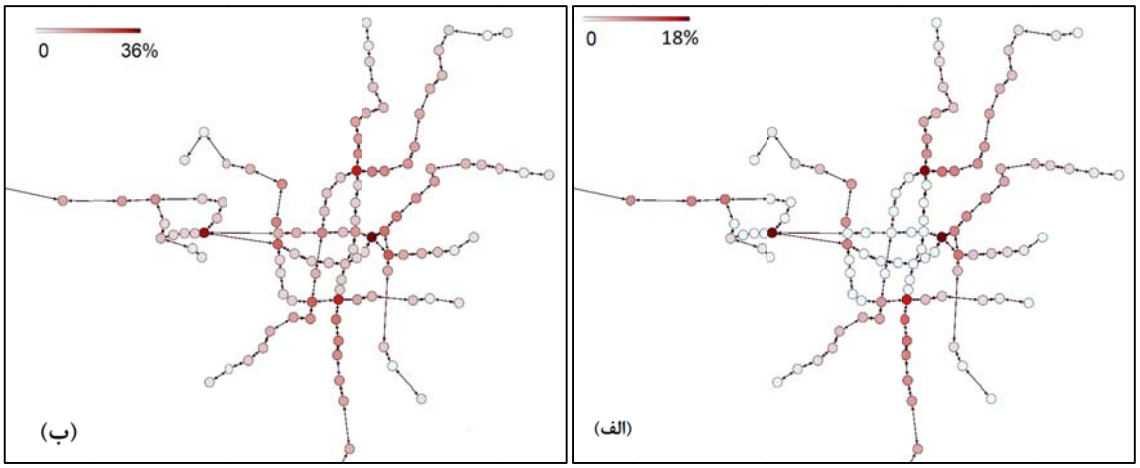
در این تصویر پس از حذف گره‌ها بیشترین میزان تغییرات اندازه نسبی بزرگ‌ترین جزء متصل شبکه در واحد درصد بر اساس رابطه شماره (۳) نمایش داده شده است



شکل ۳. بررسی تاثیر حذف گره‌ها بر وضعیت کارایی شبکه

در این تصویر پس از حذف گره‌ها بیشترین میزان تغییرات کارایی سراسری زمانمند شبکه در واحد درصد بر اساس رابطه شماره (۲) نمایش داده شده است

ایستگاه‌های واقع در هسته مرکزی شهری که در ناحیه رینگ مرکزی شبکه مترو نیز واقع شده‌اند، نقش مهمی در کاهش فاصله زمانمند میان سایر ایستگاه‌های شبکه ایفا می‌نمایند. از همین‌رو، همان طور که در شکل ٤ (ب) قابل مشاهده است، گره‌های واقع در رینگ مرکزی از منظر کارایی بحرانی هستند. در مقابل از آن‌جا که تراکم ایستگاه‌ها در این ناحیه بالاست، در صورت حذف یک ایستگاه، مسیرهای جایگزین برای اتصال سایر ایستگاه‌ها وجود دارد و از همین رو این گره‌ها از منظر همبندی شبکه بحرانی نیستند. سایر گره‌ها تقریبا وضعیت مشابهی از منظر همبندی و کارایی دارند. ایستگاه‌های انتهایی خطوط چه از منظر همبندی و چه از منظر کارایی نقش مهمی در شبکه ایفا نمی‌کنند. در مقابل ایستگاه‌های اطراف رینگ مرکزی شبکه با توجه به موقعیت قرارگیری نقش مهمی در کاهش مسافت مسیر و حفظ همبندی شبکه دارند.



شکل ٤. میزان کاهش شاخص عملکرد در اثر حذف گره (بحرانی بودن گره‌های شبکه) از منظر همبندی (الف) و کارایی (ب)

جدول ۱. میزان و رتبه شاخص‌های مرکزیت زمانمند و ایستای گره‌های بحرانی شبکه قطار شهری تهران

رتبه بحران		نام ایستگاه	نزدیکی ورودی (رتبه)		نزدیکی خروجی (رتبه)		درجه ورودی (رتبه)		درجه خروجی (رتبه)		میانگی (رتبه)	
همبندی	کارایی											
زمانمند												
۱	۱	دروازه شمیران	۲۲/۲	(۳)	۲۲/۸	(۳)	۸۱۳	(۱)	۸۱۳	(۱)	۱۸۱۲۰۹٤	(٦)
۲	۲	شادمان	۲۲	(۱)	۲۲/٤	(۱)	۸۱۳	(۱)	۸۱۳	(۱)	۲۰۳۷۱۱۲	(۱)
۳	۳	شهید بهشتی	۱۹/۷	(۱٦)	۱۹/۸	(۲۰)	٦۳۲	(۵)	٦۳۲	(۵)	۱۵٤۱۳۷۵	(۱۱)
٤	٤	میدان محمدیه	۲۱/٦	(٤)	۲۱/۸	(٤)	۵٤۲	(۳)	۵٤۲	(۳)	۱۳۷۷۰۳۵	(۵)
ایستا												
۱	۱	دروازه شمیران	۰/۰۰۰۹۵	(۸)	۰/۰۰۰۹۵	(۸)	٤	(۱)	٤	(۱)	٤٤۹۹	(٤)
۲	۲	شادمان	۰/۰۰۰۹٦	(۱)	۰/۰۰۰۹٦	(۱)	٤	(۱)	٤	(۱)	۵۲۹۷	(۱)
۳	۳	شهید بهشتی	۰/۰۰۰۸۷	(۳۰)	۰/۰۰۰۸۷	(۳۰)	٤	(۱)	٤	(۱)	٤٤۹۸	(۷)
٤	٤	میدان محمدیه	۰/۰۰۰۹۳	(٦)	۰/۰۰۰۹۳	(٦)	٤	(۱)	٤	(۱)	٤۰۰۱	(٤)

برای شناسایی ویژگی‌های ساختاری و پویای گره‌های شبکه، شاخص‌های درجه ، مرکزیت نزدیکی و مرکزیت میانگی ایستا و زمانمند تمام گره‌های شبکه بر اساس روابط (٤) تا (۱۰) محاسبه شده است. مقادیر شاخص‌های مرکزیت گره‌های بحرانی و رتبه گره بر اساس مقادیر این شاخص‌ها (هرچه مقدار شاخص بیشتر باشد، رتبه گره بالاتر است)

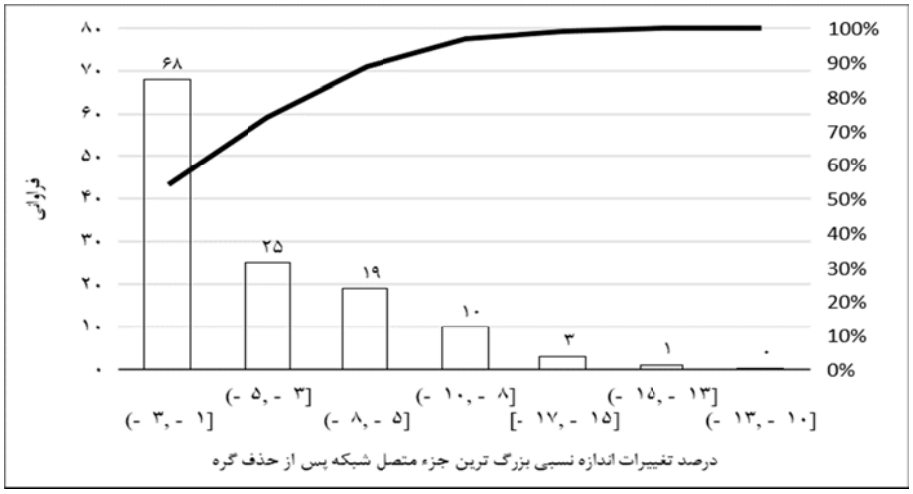
و همچنین رتبه گره بر اساس میزان بحرانی بودن از منظر کارایی و همبندی (گره‌هایی که حذف آن‌ها موجب کاهش بیشتری در شاخص‌های همبندی و کارایی شود، رتبه بالاتری دارند) در جدول ۱ ارایه شده است.

ایستگاه دروازه شمیران (بحرانی‌ترین گره) دارای بیشترین مقادیر درجه ورودی و خروجی زمانمند است. درجه زمانمند بر اساس تعداد کل ارتباطات هر گره در بازه مورد مطالعه توسعه یافته است. ایستگاه شادمان نیز وضعیت مشابهی داشته و دارای بیشترین مقدار درجه زمانمند است. به بیان دیگر در این شبکه، شاخص درجه زمانمند که بر مبنای فراوانی تعداد ارتباطات گره‌ها در بازه مورد مطالعه توسعه یافته است، شاخص مناسبی برای شناسایی گره‌های بحرانی است. ایستگاه شهید بهشتی و میدان محمدیه نیز دارای جایگاه بالایی از منظر درجه زمانمند هستند. گره‌های بحرانی دارای رتبه بالایی از منظر شاخص‌های مرکزیت نزدیکی و میانگی زمانمند نیز هستند. بنابراین تقویت این گره‌ها، قطعا نقش موثری در حفظ کریدورهای مهم شبکه قطار شهری تهران ایفا خواهد کرد. با توجه به محدودیت‌های فضایی برای توسعه شبکه قطار شهری، توزیع شاخص درجه ایستا که بیانگر تعداد ارتباطات مستقیم هر گره با گره‌های مجاور است، مقادیر ۲ (در ایستگاه‌های معمولی) یا ٤ (در ایستگاه‌های تقاطعی) را به خود اختصاص می‌دهد که گره‌های بحرانی شبکه همگی از گره‌های تقاطعی هستند و اختلال در عملکرد آن‌ها، ۲ خط شبکه قطار شهری را به صورت مستقیم تحت تاثیر قرار می‌دهد. در میان شاخص‌های ایستا، شاخص مرکزیت میانگی که بر اساس میزان قرار گرفتن هر گره بر سر کوتاه‌ترین مسیر میان سایر گره‌ها توسعه یافته است، به خوبی گره‌های بحرانی را مشخص می‌کند. تمام گره‌های بحرانی شبکه دارای مقادیر بسیار بالای مرکزیت میانگی ایستا بوده که نشان دهنده نقش پر رنگ آن‌ها در حفظ همبندی شبکه است. این یافته با نتایج مطالعات موروونت در مورد حملات دامنه‌دار منطبق است (Mouronte and Benito 2012).

مقادیر بالای درجه زمانمند و مرکزیت میانگی ایستای گره‌های بحرانی نشان می‌دهد که ویژگی‌های پویا (تعداد کل ارتباطات در بازه زمانی مورد مطالعه) و همچنین ویژگی‌های ساختاری (میزان قرار گرفتن بر سر راه موتاه‌ترین مسیرهای توپولوژیک) با میزان بحرانی بودن گره‌ها همبسته است.

فراوانی گره‌های شبکه بر اساس میزان بحرانی بودن (درصد تغییرات کارایی و همبندی شبکه پس از حذف گره) در شکل های ۵ و ٦ نمایش داده شده است. در صورتی که ۸۵ صدم بیشینه افت کارکرد را به عنوان آستانه بحرانی بودن در نظر بگیریم در شبکه قطار شهری تهران ٤ گره بحرانی (در حدود ۳ درصد) وجود دارد. احتمال وقوع اختلالات تصادفی که ناشی از نقص در عملکرد عوامل داخلی سامانه هستند، در تمام ایستگاه‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود. از آن‌جا که بیش از ۹۷ درصد از گره‌های شبکه، گره‌های غیر بحرانی هستند، وقوع اختلالات تصادفی در شبکه قطار شهری تهدید جدی برای عملکرد شبکه محسوب نشده و به بیان دیگر شبکه در مواجهه با این گونه اختلالات استوار است.

در مقابل گره‌های بحرانی شبکه قطار شهری دارای مقادیر بالای شاخص‌های مرکزیت زمانمند و ایستا بوده و به بیان دیگر علاوه بر بحرانی بودن از منظر استواری از جمله گره‌های مهم شبکه از منظر ساختار و پویایی نیز هستند. از طرفی احتمال وقوع حملات هدفمند با توجه به ماهیت آن‌ها که توسط عوامل بیرونی و به صورت از پیش برنامه‌ریزی شده به سامانه تحمیل می‌شوند در گره‌های مهم بیش از گره‌های معمولی است (مانند حملات تروریستی که ایستگاه‌های مهم شهر را مورد هدف قرار می‌دهند). بنابراین چنانچه شبکه قطار شهری با حملات هدفمند در گره‌های مهم (گره‌های با شاخص مرکزیت بالا) مواجه شود، در واقع گره‌های بحرانی شبکه مورد هدف قرار گرفته و عملکرد شبکه از منظر همبندی و کارایی به شدت کاهش خواهد یافت. این وضعیت نشان دهنده آسیب‌پذیری بالای شبکه قطار شهری در مواجهه با حملات هدفمند است و لزوم حفاظت از گره‌های مهم شبکه را بیش از پیش مورد تاکید قرار می‌دهد. نتایج به دست آمده در مورد رفتار شبکه در مواجهه با حملات هدفمند و اختلالات تصادفی، با نتایج حاصل از پژوهش‌های دریبل و یانگ که به بی‌مقیاس بودن این شبکه‌ها اشاره داشت، منطبق است (Derrible and Kennedy 2010, Yang, Liu et al. 2015).



شکل ۵. فراوانی گره‌های شبکه بر اساس میزان بحرانی بودن از منظر همبندی

شکل ٦. فراوانی گره‌های شبکه بر اساس میزان بحرانی بودن از منظر کارایی

۵-نتیجه گیری

ایستگاه‌های دروازه شمیران و شادمان در محل تقاطع خطوط ۲ و ٤، ایستگاه شهید بهشتی در تقاطع خطوط ۱ و ۳ و ایستگاه میدان محمدیه در تقاطع خطوط ۱ و ۷ ایستگاه‌های بحرانی شبکه قطار شهری تهران از منظر کارایی و همبندی شبکه هستند. بحرانی‌ترین ایستگاه‌ها از منظر همبندی و کارایی یکسان بوده واختلال در عملکرد آن‌ها به ترتیب موجب کاهش ۳٦ درصدی در کارایی سراسری و ۱۷ درصدی در همبندی می‌شوند. ایستگاه‌های بحرانی شبکه دارای مقادیر بالای شاخص‌های مرکزیت ایستا و زمانمند هستند که نشان دهنده اهمیت آن‌هاست. چنانچه شبکه قطار شهری با حملات هدفمند در گره‌های مهم مواجه شود، بحرانی بودن گره‌های مهم شبکه موجب ایجاد آسیب شدید در شبکه می‌گردد. بنابراین شبکه قطار شهری در مواجهه با حملات هدفمند آسیب‌پذیر است. در مقابل با توجه به نسبت بالای گره‌های غیر بحرانی به گره‌های بحرانی و احتمال یکسان وقوع اختلالات تصادفی در این دو دسته گره، شبکه در مواجهه با اختلالات تصادفی استوار است.

روش توسعه یافته در این پژوهش به دلیل در نظر گرفتن همزمان ویژگی‌های ساختاری و پویا، قابل تعمیم به سایر شبکه‌های حمل‌ونقلی است. بررسی رفتار سایر شبکه‌های حمل‌ونقلی، بررسی رفتار شبکه در مواجهه با اختلالات دامنه‌دار و بررسی ارتباط سایر ویژگی‌های ساختاری و پویای شبکه با میزان استواری آن از جمله سوالات بدون پاسخ و زمینه‌های بالقوه برای پژوهش‌های آینده در این حوزه است.

٦-مراجع

-Dekker, Sidney, Hollnagel, Erik, Woods, David and Cook, Richard, (2008), "Resilience Engineering: New directions for measuring and maintaining safety in complex systems", Lund University School of Aviation.

-Derrible, Sybil and Kennedy, Christopher, (2010), "The complexity and robustness of metro networks", Physica A: Statistical Mechanics its Applications, Vol.389(17), pp.3678-3691.

-Fan, Yi, Zhang, Fan, Jiang, Shihong, Gao, Chao, Du, Zhanwei, Wang, Zhen and Li, Xianghua, (2020), "Dynamic robustness analysis for subway network with spatiotemporal characteristic of passenger flow", IEEE Access, Vol.8, pp.45544-45555.

-Feng, Xiao, He, Shi-Wei and Li, Yu-Bin (2019), "Temporal characteristics and reliability analysis of railway transportation networks", Transportmetrica A: Transport Science, Vol.15(2), pp.1825-1847.

-Gautreau, Aurelien, Barrat, Alain and Barthélemy, Marc, (2009), "Microdynamics in stationary complex networks", Proceedings of the National Academy of Science, Vol.106, pp.8847-8852.

-Grindrod, Peter, Parsons, Mark C, Higham, Desmond J and Estrada, Ernesto, (2011), "Communicability across evolving networks", Physical Review E, Vol.83(4), pp.046120.

-He, Kun, Cheng, Xudong, Zhang, Shaogang, Yang, Hui, Yao, Yongzheng, Peng, Min and Cong, Wei, (2018), "Critical roof opening longitudinal length for complete smoke exhaustion in subway tunnel fires", International Journal of Thermal Sciences, Vol.133, pp.55-61.

-Holme, Petter and Saramäki, Jari, (2013), "Temporal networks", Springer.

-Hu, Fang and Liu, Yuhua, (2015), "Multi-index algorithm of identifying important nodes in complex networks based on linear discriminant analysis", Modern Physics Letters B, Vol.29(03), pp.1450268.

-Kyriakidis, Miltos, Hirsch, Robin and Majumdar, Arnab, (2012), "Metro railway safety: An analysis of accident precursors", Safety science, Vol.50(7), pp.1535-1548.

-Li, Ming, Wang, Hongwei and Wang, Huashen (2019), "Resilience assessment and optimization for urban rail transit networks: A case study of beijing subway network", IEEE Access, Vol.7, pp.71221-71234.

-Li, Yang, Wang, Xudong, Sun, Shuo, Ma, Xiaolei and Lu, Guangquan, (2017), "Forecasting short-term subway passenger flow under special events scenarios using multiscale radial basis function networks", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.77, pp.306-328.

-Lu, Qing-Chang and Lin, Shan, (2019), "Vulnerability analysis of urban rail transit network within multi-modal public transport networks", Sustainability, Vol.11(7), pp.2109.

-Mouronte, Mary Luz and Benito, Rosa María (2012), "Structural properties of urban bus and subway networks of Madrid", Networks Heterogeneous Media, Vol.7(3), pp.415.

-Pan, Raj Kumar and Saramäki, Jari, (2011), "Path lengths, correlations, and centrality in temporal networks", Physical Review E, Vol.84.

-Tang, John, Scellato, Salvatore, Musolesi, Mirco, Mascolo, Cecilia and Latora, Vito (2010), "Small-world behavior in time-varying graphs", Physical Review E, Vol.81(5), pp.055101.

-Wang, Jianwei, (2013), "Robustness of complex networks with the local protection strategy against cascading failures", Safety science, Vol.53, pp.219-225.

-Wang, Jie and Fang, Weining, (2014), "A structured method for the traffic dispatcher error behavior analysis in metro accident investigation", Safety science, Vol.70, pp.339-347.

-Williams, Matthew J and Musolesi, Mirco (2016), "Spatio-temporal networks: reachability, centrality and robustness", Royal Society open science, Vol.3(6), pp.160196.

-Xing, Yingying, Lu, Jian, Chen, Shengdi and Dissanayake, Sunanda, (2017), "Vulnerability analysis of urban rail transit based on complex network theory: a case study of Shanghai Metro", Public Transport, Vol.9(3), pp.501-525.

-Xinsheng, SONG, Xiaoxiao, WANG and ZHANG, Lei, (2011), "Node importance evaluation method for highway network of urban agglomeration", Journal of Transportation Systems Engineering Information Technology, Vol.11(2), pp.84-90.

-Yang, Yuhao, Liu, Yongxue, Zhou, Minxi, Li, Feixue and Sun, Chao, (2015), "Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory: A case study of the Beijing Subway", Safety Science, Vol.79, pp.149-162.

Identification of Critical Nodes in Urban Subway Network Using Temporal Network Concept

(Case Study: Tehran Urban Subway Network)

SoroushMemarmontazerin, Ph.D., Student, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Mahmoud Saffarzadeh, Professor, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Arman Saffarzadeh, M.Sc., Grad., Department of Civil and Environmental Engineering Carleton University, Canada.

E-mail: saffar_m@modares.ac.ir

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT

The urban subway network is one of the most vital infrastructures that plays a pivotal role in the sustainable development of cities; therefore, network robustness or maintaining the proper performance in various conditions has great importance. Considering financial and functional limitations, identifying critical nodes is required to prioritize robustness enhance projects. Critical nodes are nodes that their removal deeply affects the connectivity and efficiency of the network. Network robustness and identification of critical nodes in the face of cascading disruptions have been studied, focusing on the network's structural features. On the one hand, cascading disturbances affect several stations simultaneously, which is less likely to occur than concentrated disturbances that affect only one station? On the other hand, focusing on the network structure leads to the loss of dynamic information, resulting in underestimating the length and overestimating the number of paths between network nodes. In this study, the critical nodes in the face of centralized disturbances have been identified using temporal network concepts, which consider both structural and temporal features. The results reveal that Darvazeh-Shemiran, Shadman, Shahid Beheshti, and Mohammadieh Square stations are the critical stations from both efficiency and connectivity points of view. The critical nodes have high values of static and temporal centrality indices, which increase network vulnerability against malicious attacks. In contrast, due to the high ratio of non-critical nodes to critical nodes, the network is robust against random failures. The method developed in this research can be generalized to other transportation networks.

Keywords: Robustness, Vulnerability, Temporal Network, Urban Subway Network, Transportation Network