

روشی ابتکاری برای محاسبه قابلیت اطمینان ظرفیت و دسترسی (اتصال) در شبکه‌های حمل و نقلی آسیب‌پذیر درون‌شهری

افشین شریعت مهیمنی، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

علی منصورخاکی، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محسن بابایی، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail:shariat@iust.ac.ir

چکیده

شبکه‌های حمل و نقلی ممکن است تحت تأثیر یک سری عوامل خارجی یا داخلی دچار افت عملکرد و ناپایداری جریان ترافیک شوند. عوامل خارجی عمدتاً شامل شرایط آب و هوایی خاص (مانند بارش برف، یخبندان و طوفان)، زلزله، بهمن و برخی عوامل دیگرند. عوامل داخلی آسیب‌پذیری ناشی از خرابی سیستم‌های کنترل، تصادفات، تعمیرات و ساخت و سازها هستند. تمامی عوامل یادشده می‌توانند منجر به افت ظرفیت کمان‌ها شوند و پاره‌ای از آنها تقاضای پایه موجود در زوج‌های مبدأ-مقصد شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به اهمیت حفظ عملکرد شبکه در چنین شرایطی در یک سطح مطلوب، در دهه آخر قرن بیستم تعریفی جدید برای ارزیابی عملکرد شبکه‌های حمل و نقلی ارائه شده است که اعتمادپذیری شبکه را در شرایط عدم قطعیت بیان می‌کند. از این رو ارزیابی قابلیت اطمینان عملکرد شبکه‌های حمل و نقل در طراحی و یا ارتقا و بازسازی آنها نقش بسیار پر اهمیتی پیدا کرده است. در این مقاله روشی ابتکاری برای محاسبه قابلیت اطمینان عملکرد اجزای شبکه در سطوح مختلف سرویس‌دهی ارائه شده است که از آن می‌توان برای محاسبه قابلیت اطمینان دسترسی (اتصال) و قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه در قالب یک رابطه ریاضی استفاده کرد. همچنین نتایج بکارگیری این روش در یک شبکه شماتیک، جهت نمایش کارآمدی آن، ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه حمل و نقل درون‌شهری، عدم قطعیت، قابلیت اطمینان دسترسی، قابلیت اطمینان ظرفیت

۱. مقدمه

ابزار علمی و همچنین قدرت بکارگیری آنها در مقیاس واقعی و کاربردی، نشانه رشد و پیشرفت یک کشور است. در حال حاضر معمول‌ترین شاخص ارزیابی عملکرد راه‌ها سطح سرویس‌دهی است که براساس چگالی و تعداد وسایل نقلیه در واحد مسافت در هر خط بیان می‌شود. در مقیاس گسترده‌تر در شبکه‌ها، سرعت سفر، میانگین تأخیر وارد بر هر وسیله نقلیه و مقدار وسیله نقلیه-مسافت پیموده شده برای ارزیابی عملکرد

ملاحظات اقتصادی در یک کشور و یا یک شهر همواره ایجاب می‌کنند که شبکه حمل و نقلی آن به نحوی مؤثر، ایمن و قابل اطمینان بتواند دسترسی مسافران را در نقاط مختلف شبکه تأمین کند. برای طراحی یا ارزیابی یک شبکه حمل و نقلی در راستای دستیابی به اهداف مورد انتظار از شبکه، مهندسان نیازمند معیارها و ابزارهای علمی هستند که از آن طریق بتوانند به شبکه‌ای با عملکرد مناسب دست یابند. آشکار است که دستیابی به چنین

سطوح سرویس‌دهی خاص و تحت تغییرات روزانه جریان ترافیک معرفی کرده‌اند. در سال ۱۹۹۶ آساگورا [۴] به تعریفی جدید از قابلیت اطمینان زمان سفر دست یافت و آن را با در نظر گرفتن تنزل ظرفیت اجزای شبکه به صورت تابعی از نسبت «زمان سفر در حالت بروز تنزل ظرفیت به زمان سفر درحالت ظرفیت کامل اجزا» تعریف کرد.

۲-۲ قابلیت اطمینان اتصال

قابلیت اطمینان اتصال، بیانگر احتمال متصل بودن گره‌های شبکه به یکدیگر است. یک حالت خاص از قابلیت اطمینان اتصال، قابلیت اطمینان پایانه است که توسط ایدا و واکابایاشی [۵] در سال ۱۹۸۹ ارایه شد. در این مقاله قابلیت اطمینان پایانه، احتمال وجود حداقل یک مسیر از یک مبدأ خاص به مقصدی معین تعریف شده است. یک مسیر شامل مجموعه‌ای از کمان‌هاست که حالت عملکردی هر کدام با یک متغیر صفر و یک تعیین می‌شود. حالت کمان یک است هرگاه به طور صحیح کار کند و صفر است هرگاه کار نکند. نقطه ضعف این معیار در آن است که ظرفیت کمانها در تعیین معیار هیچ نقشی نداشته و نمی‌توان تغییرات ظرفیت و یا احتمال وقوع ظرفیت‌های مابین صفر و یک را در ارزیابی شبکه دخالت داد. البته در شرایط بسیار غیر عادی مانند وقوع زلزله شاید بتوان از چنین فرضی استفاده کرد، اما در اکثر مواقع مانند نوسانات روزانه یا بارش برف و باران و حوادث دیگر، این فرض با واقعیت تطبیق کامل ندارد.

۲-۳ قابلیت اطمینان ظرفیت

در سال‌های اخیر چن و همکارانش [۷ و ۶] معیار جدیدی برای ارزیابی عملکرد شبکه با عنوان قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه ارایه کردند: این معیار برابر احتمال پاسخگو بودن ظرفیت شبکه برای تقاضای معین در سطح سرویس دلخواه است. در این مقالات فرض شده است که ظرفیت کمانها به دلایلی مانند حوادث ترافیکی متغیر بوده و به صورت یک متغیر تصادفی هستند، و امکان به دست آوردن آنها به صورت واقعی و عملی وجود دارد. البته از آنجا که زمان سفر خود تابعی از ظرفیت و حجم عبوری از هر کمان است، ارزیابی عملکرد ظرفیتی شبکه خود به گونه‌ای با معیار قابلیت اطمینان زمان سفر مرتبط است. چن و

استفاده می‌شود. اما در شرایط بروز آسیب و بحران در یک شبکه، دیگر موارد فوق کارآمد نبوده و اعتمادپذیری عملکرد شبکه باید بررسی شود. به عنوان مثال وقوع زلزله با توجه به قدرت تخریب آن امری احتمالی است و نمی‌توان حدس زد که در صورت وقوع با چه شدت یا بزرگی رخ خواهد داد و بنابراین برای ارزیابی وضع عملکرد شبکه پس از وقوع حادثه باید از ابزاری سود جست که عدم قطعیت را در پارامترهای ارزیابی دخالت دهد. حال اگر فرض شود که قرار است شبکه در معرض آسیب به نحوی طراحی، ارتقا و بازسازی شود که در صورت بروز یک آسیب خاص، عملکرد مناسبی داشته باشد و بتواند معیار عملکرد مورد نظر را با اعتمادپذیری مطلوب تصمیم‌گیر برآورده سازد، نیاز به استفاده از روشی کارآمد است تا به کمک آن بتوان در قالب یک رابطه ریاضی، قابلیت اطمینان شبکه را برآورد کرده و مورد استفاده قرار داد.

۲. مطالعات انجام شده در زمینه قابلیت اطمینان

شبکه حمل و نقل

هرچند تا کنون مطالعات بسیاری در زمینه قابلیت اطمینان شبکه‌های حمل و نقلی انجام گرفته‌اند، اما از عمر مطالعات مدت زیادی نمی‌گذرد. این تحقیقات دولتها را در تخصیص منابع محدود موجود در چهار فاز مختلف یاری می‌کنند: کاهش عوارض ناشی از حوادث، جلوگیری از کاهش عملکرد مطلوب شبکه، پاسخ مناسب در مواقع اضطراری، و بازسازی و ترمیم در مواقع بروز آسیب دیدگی‌ها [۱].

۲-۱ قابلیت اطمینان زمان سفر

به طور کلی قابلیت اطمینان به معنای توانایی یک سیستم در برآورده کردن عملکرد مورد نیاز آن، تحت شرایط محیطی و عملکردی و بازه زمانی مشخص است [۲]. قابلیت اطمینان زمان سفر احتمال این است که زمان سفر بین یک زوج مبدأ-مقصد کمتر یا مساوی یک زمان خاص باشد و یا سفر بین مبدأ و مقصد در بازه زمانی تعیین شده‌ای انجام پذیرد. می‌توان گفت که قابلیت اطمینان زمان سفر، اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط آساگورا و کاشیوادانی [۳]، به عنوان یک معیار برای ارزیابی شبکه مطرح شد. نویسندگان آن مقاله، قابلیت اطمینان زمان سفر را برای

کمان‌های شبکه را بیان می‌کنند. در این روش با توجه به وضعیت واقعی شبکه قابلیت اطمینان هر کمان به صورت جداگانه در طول تحلیل برآورد و سپس قابلیت اطمینان عملکرد شبکه بر مبنای آن تحلیل می‌شود. این روش می‌تواند برای تحلیل وضعیتهای واقعی به صورت بهتری بکار رود.

بروز حوادث مختلف در سطح یک شبکه مانند وقوع تصادف، بارش برف یا باران، یخبندان و یا حوادثی چون زلزله، بهمن و مانند آن می‌توانند سبب شوند که ظرفیت کمان‌های یک شبکه دستخوش تغییر شده، کاهش یابد و یا کاملاً مسدود شود. در چنین وضعیت‌هایی آگاهی از میزان قابلیت اطمینان شبکه در برابر بروز این حوادث دارای اهمیت است. این قابلیت اطمینان با توجه به شاخص‌های مختلف ترافیکی می‌تواند متفاوت باشد؛ برای مثال، تحلیل وضعیت دسترسی در سطح شبکه و یا تحلیل تأمین ظرفیت در سطح شبکه. در مورد ظرفیت حتی می‌توان قابلیت اطمینان شبکه را در جهت تأمین سطح سرویس مورد نظر در سطح شبکه برآورد کرد. برای مثال اگر بخواهیم بخشهایی از شبکه حتی در صورت بروز حوادث، حداقل در سطح سرویس D عمل کند. یاد آوری می‌شود که چنین نگرش و تعریفی تا کنون در هیچکدام از تحقیقات پیشین مدنظر قرار نگرفته است. در ادامه، ابتدا دو موضوع تابع عملکردی کمانها و تابع قابلیت اطمینان کمانها تعریف شده و سپس به کمک آنها قابلیت اطمینان ظرفیت و دسترسی در شبکه به دست می‌آید.

۳-۱ تابع عملکردی کمانها

به توابعی که میزان شاخص عملکرد یک کمان (مثل زمان سفر، تأخیر یا ظرفیت) را بر حسب احتمال وقوع آن بیان می‌کنند توابع عملکردی می‌گویند. در این مقاله تابع عملکردی مفروض برای هر کمان، یک تابع چگالی احتمالی نرمال است که احتمال رخداد ظرفیت‌های مختلف را در هر کمان به صورت چگالی احتمال نمایش می‌دهد. علت انتخاب توزیع نرمال این است که در مطالعات مشابه از این توزیع استفاده شده است و به این ترتیب می‌توان نتایج به دست آمده از این مطالعه را با آنها مقایسه کرد. تابع چگالی احتمالی ظرفیت کمان i ام شبکه را با $f_i(x)$ نمایش می‌دهیم. توجه به این نکته ضروری است که تابع $f_i(x)$ چگونگی توزیع احتمالی وقوع ظرفیت‌ها را بیان می‌کند، نه خود احتمال وقوع را؛ به عبارت دیگر $\int f_i(x) dx$ ماهیت احتمالی دارد نه

همکارانش در دو مقاله فوق سعی کرده‌اند با استفاده از مفهوم ظرفیت ذخیره^۱ قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه را بررسی کنند؛ ظرفیت ذخیره، ضریبی از تقاضای پایه است که شبکه قابلیت تحمل آن را در سطح سرویس مشخص خواهد داشت، یعنی، مؤلفین یاد شده قابلیت اطمینان ظرفیت را در سطوح مشخصی از تقاضای پایه تحت بررسی و تحلیل قرار دادند. البته به دلیل اهمیت قابلیت اطمینان ظرفیت و تازگی مطلب و همچنین جواب‌های مناسبی که می‌توان از این معیار دریافت کرد، در بخش‌های دیگر این مقاله روشهای بکار رفته در مقاله‌های چن با جزئیات بیشتر بیان خواهد شد.

۲-۴ قابلیت اطمینان عملکرد شبکه

تعدادی از محققانی که در زمینه قابلیت اطمینان شبکه کار کرده‌اند، معتقدند که قابلیت اطمینان شبکه دو جنبه دارد: یکی آن که به اتصال مبادی و مقاصد شبکه تأکید دارد و دیگر آن که قابلیت اطمینان عملکرد را بیان می‌کند. بل [۹۸] این موضوع را در اواخر دهه ۱۹۹۰ بیان کرده و معتقد است که جدای از انواع معیارهای قابلیت اطمینانی که در سه بخش قبلی ذکر شد، می‌توان اعتمادپذیری یک شبکه را بر اساس میزان بی‌اعتماد بودن کاربران نسبت به عملکرد شبکه تعیین کرد. از دیگر کسانی که در زمینه قابلیت اطمینان عملکرد شبکه تحقیقاتی انجام داده‌اند، بین و ایدا [۱۰] هستند؛ ایشان با استفاده از عدم مطلوبیت کاربران جهت استفاده از هر مسیر، برای رسیدن از یک مبدأ به یک مقصد معین، معیاری برای ارزیابی عملکرد شبکه ارائه کردند. در مقاله‌ای دیگر بین، لم و ایدا [۱۱] مطلوبیت کاربران را با توجه به استفاده از ابزار اطلاع رسانی پیشرفته و هوشمند و کنترل ترافیک در محاسبه قابلیت اطمینان عملکرد شبکه‌های متراکم حمل و نقلی^۲ بکار گرفته‌اند.

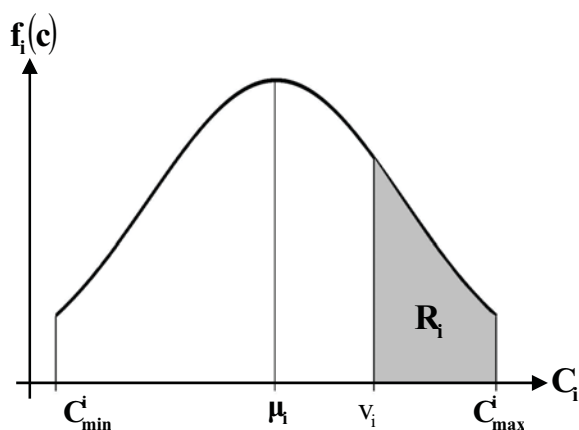
۳. روش پیشنهادی محاسبه قابلیت اطمینان

همان گونه که در بخش قبل اشاره شد کارهای مختلفی در زمینه قابلیت اطمینان شبکه انجام شده است که در آنها قابلیت اطمینان عملکرد هر کمان به صورت مقادیر باینری یا توابع گسسته جزء فرضیات مسئله در نظر گرفته می‌شده است. در روش پیشنهادی مبنای تحلیل‌ها چگالی احتمالی پیوسته برای ظرفیت کمان‌هاست که این توابع وضعیت واقعی عملکرد

(۶)

$$R_i = \begin{cases} P(C_i \geq v_i) = \int_{v_i}^{C_{\max}^i} f_i(c) dc & , v_i \geq C_{\min}^i \\ 0 & , C_{\max}^i < v_i \end{cases}$$

در رابطه (۶)، v_i حجم عبوری از کمان i ام و C_i متغیر تصادفی نرمال است که تابع چگالی آن را با $f_i(c)$ نشان می‌دهیم، C_{\min}^i حد پائین ظرفیت کمان i ام و C_{\max}^i حد بالای آن است. در حقیقت، هنگامی که حجم عبوری از کمان از حد پائین ظرفیت کمان بیشتر باشد، سطح انتگرال تابع چگالی احتمال ظرفیت از v_i تا C_{\max}^i قابلیت اطمینان عملکرد کمان را به دست می‌دهد. اگر حجم عبوری از کمان (v_i) از حد بالای ظرفیت کمان (C_{\max}^i) بیشتر باشد، قابلیت اطمینان عملکرد کمان صفر است؛ یعنی، هیچ احتمالی برای بیشتر بودن ظرفیت کمان از حجمی که نیاز است از آن عبور کند، وجود ندارد. برای به دست آوردن v_i از مقدار منتظره^۳ ظرفیت کمان‌های شبکه استفاده می‌شود. از طرفی در توزیع نرمال مقدار منتظره همان میانگین متغیر تصادفی (μ_i) است. شکل ۱ تعریف ارایه شده در رابطه (۶) را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تابع چگالی احتمالی ظرفیت کمان i و پارامترهای مربوط به محاسبه قابلیت اطمینان عملکرد آن
در مدیریت یک شبکه واقعی سعی می‌شود تا کمان‌های شکل-دهنده شبکه در سطح سرویس مطلوب کار کنند. برای هر کدام از این سطوح سرویس (از A تا E) نسبت خاصی از $(v/c)_i$ یا α_i به عنوان شاخص سرویس‌دهی مد نظر است. بنابراین می‌توان قابلیت اطمینان را به صورت زیر نیز تعریف کرد: «احتمال این که ظرفیت کمان i از v_i/α_i بیشتر باشد». این تعریف کمک می‌کند تا بتوان قابلیت اطمینان شبکه را برای تأمین سطح سرویس مورد

$f_i(x)$.

$$f_i(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، μ_i و σ_i به ترتیب میانگین و انحراف معیار ظرفیت کمان i هستند. یک متغیر تصادفی نرمال مقادیری در بازه $(-\infty, +\infty)$ اتخاذ می‌کند، در حالی که ظرفیت یک کمان نمی‌تواند چنین مقادیری داشته باشد. یعنی ظرفیت هر کمان تنها در یک بازه محدود نوسان می‌کند؛ حد پائین ظرفیت کمان i ام را C_{\min}^i و حد بالای آن را C_{\max}^i می‌نامند.

از سوی دیگر تابع چگالی توزیع نرمالی که حد بالا و پائین دارد، سطح زیر منحنی‌اش برابر با یک نیست و این مخالف فرض اساسی توابع چگالی است. برای رفع این مشکل می‌توان از تابع چگالی شبه نرمال (که آن را $f_i(c)$ می‌نامیم) استفاده کرد، به این منظور ضریب اصلاح k_i (در رابطه (۲)) را در $f_i(x)$ ضرب می‌شود تا $f_i(c)$ به دست آید:

$$k_i = \frac{1}{\int_{C_{\min}^i}^{C_{\max}^i} f_i(x) dx} \quad (۲)$$

$$f_i(c) = k_i f_i(x) \quad (۳)$$

شرایط تابع چگالی برای تابع $k_i f_i(x)$ برقرار است؛ زیرا در رابطه (۴) عددی ثابت است و از انتگرال بیرون می‌آید؛ در نتیجه:

$$\begin{aligned} \int_{C_{\min}^i}^{C_{\max}^i} k_i f_i(x) dx &= k_i \cdot \int_{C_{\min}^i}^{C_{\max}^i} f_i(x) dx \\ &= \frac{1}{\int_{C_{\min}^i}^{C_{\max}^i} f_i(x) dx} \times \int_{C_{\min}^i}^{C_{\max}^i} f_i(x) dx = 1 \end{aligned} \quad (۴)$$

همچنین $f_i(x)$ تابع گوس و مقدار آن مثبت یا صفر است؛ بنابراین از حاصلضرب آن در k_i ، که خود عددی مثبت است، داریم:

$$f_i(c) = k_i f_i(x) \geq 0 \quad (۵)$$

پس هر دو شرط تابع چگالی برای تابع $f_i(c)$ برقرار است.

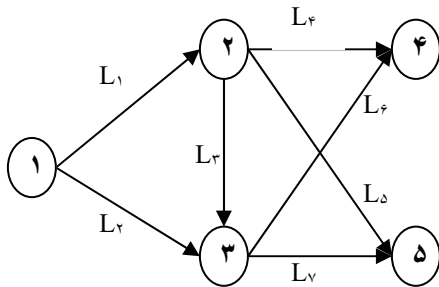
۳-۲ تابع قابلیت اطمینان کمان‌ها

قابلیت اطمینان کمان i عبارت است از: احتمال این که ظرفیت هر کمان از حجم عبوری از آن بیشتر باشد. به عبارت دیگر قابلیت اطمینان هر کمان برابر است با:

کمان‌ها و سطح سرویس نیز مد نظر قرار می‌گیرد و در واقع معیار ارزیابی شبکه فقط شامل اتصال گره‌ها نیست، بلکه زمان سفر نیز در معیار ارایه شده نهفته است؛ زیرا زمان سفر کمان‌ها خود تابعی از نسبت v/c است.

برای به دست آوردن قابلیت اطمینان دسترسی یک زوج مبدأ- مقصد راه‌های مختلفی وجود دارد که این روش‌ها را نمی‌توان، به علت حجم زیاد محاسبات، در شبکه‌هایی که بیشتر از ۵ عضو (کمان) دارند بکار برد. برای کاهش حجم محاسبات از یک روش تقریبی مناسب برای شبکه‌ای با تعداد اجزای زیاد استفاده می‌شود که در آن کران‌های پایین و بالای قابلیت اطمینان مبادی و مقاصد شبکه به دست می‌آید.

برای به دست آوردن کران‌های پایین و بالا از برش‌های کمین^۴ و مسیرهای کمین^۵ استفاده می‌شود. یک برش کمین مجموعه‌ای از اجزاست که با خراب شدن آنها، خراب شدن سیستم نیز قطعیت پیدا خواهد کرد، و یک مسیر کمین مجموعه‌ای از اجزا است که کار کردن آنها کارکرد صحیح سیستم را تضمین می‌کند. در ادامه، روش محاسبه کران‌های پایین و بالا قابلیت اطمینان یک شبکه شماتیک (شکل ۲) توضیح داده می‌شود.



شکل ۲. گره‌ها و کمان‌های یک شبکه حمل و نقلی با چیدمان مختلط اجزا

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود کمان‌های ۱، ۳ و ۶ تشکیل یک مسیر کمین را می‌دهند که اگر هر سه عضو همزمان سالم باشند، حتماً یک مسیر از گره ۱ به گره ۴ وجود خواهد داشت. به همین ترتیب باقی مسیرهای کمین برای رسیدن از مبدأ ۱ به مقصد ۴ عبارتند از: $\{L_1, L_4\}$ و $\{L_2, L_7\}$. همچنین با قطع کمان‌های ۱ و ۲ تمام مسیرها از گره ۱ به گره ۴ قطع می‌شود، پس مجموعه $\{L_1, L_2\}$ یک برش کمین است. به همین ترتیب باقی برش‌های کمین عبارتند از: $\{L_1, L_6\}$ ، L_3 و L_4 و $\{L_2, L_3, L_7\}$. از این رو می‌توان کران‌های پایین و

نظر ارزیابی کرد. در این صورت رابطه (۶) به صورت رابطه (۷) بازنویسی می‌شود:

$$R_i = \begin{cases} P(C_i \geq v_i/\alpha_i) = \int_{v_i/\alpha_i}^{C_{\max}^i} f(c)dc & ; v_i/\alpha_i \geq C_{\min}^i \\ 0 & ; C_{\max}^i < v_i/\alpha_i \end{cases}$$

هرگاه α_i ها را برابر ۱ در نظر بگیریم، به این معناست که بهره‌گیری از شبکه، با حداکثر ظرفیت کمان‌ها صورت می‌گیرد.

۳-۳ قابلیت اطمینان ظرفیت

در این قسمت روشی ارایه می‌شود که با استفاده از تابع قابلیت اطمینان عملکرد کمان‌ها، قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه را به کمک یک رابطه ریاضی به دست می‌دهد. برای دستیابی به این رابطه چند نکته مد نظر قرار گرفته است. اول آن که برای قابلیت اطمینان ظرفیت، چن و همکارانش [۷] تعریفی ارایه کرده‌اند که در آن «ظرفیت یک شبکه پاسخگوی نیاز موجود نخواهد بود، هرگاه حجم هریک از کمان‌ها از ظرفیت تعریف شده برای آن در یک سطح سرویس مشخص بیشتر باشد». دوم آن که قابلیت اطمینان هر کمان این احتمال را نشان می‌دهد که حجم آن کمان از ظرفیتش بیشتر باشد. از این دو می‌توان از رابطه (۸) برای برآورد قابلیت اطمینان شبکه استفاده کرد، که بیانگر احتمال کارکرد تمام کمان‌های شبکه به طور همزمان است:

$$R_{\text{net}}^{\text{Capacity}} = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (8)$$

۳-۴ قابلیت اطمینان دسترسی

در این پژوهش قابلیت اطمینان دسترسی بر مبنای عملکرد مناسب کمان‌ها در سطح سرویس دلخواه تعریف شده است و احتمال وجود مسیر بین زوج مبدأ - مقصد با توجه به سطح سرویس (نسبت v/c) را نشان می‌دهد. برای مثال وقتی می‌گوییم قابلیت اطمینان دسترسی شبکه برای $v/c = 0.75$ برابر مقدار مشخصی است، منظور این است که احتمال این که حداقل یک مسیر با کمان‌هایی که نسبت v/c در آنها حداقل ۰/۷۵ باشد برای مبادی و مقاصد مختلف شبکه وجود دارد. حسن این دیدگاه این است که حین بررسی وجود مسیر بین زوج مبدأ- مقصد، نحوه عملکرد

بالای قابلیت اطمینان شبکه را برای زوج مبدأ- مقصد (۱و۴) به صورت روابط (۹و۱۰) به دست آورد:

$$R_{(1,4)}^{\min} = [1 - (1 - R_1)(1 - R_2)] \cdot [1 - (1 - R_1)(1 - R_6)] \cdot [1 - (1 - R_4)(1 - R_6)] \cdot [1 - (1 - R_2)(1 - R_3)(1 - R_4)]$$

$$R_{(1,4)}^{\max} = 1 - (1 - R_1 R_4)(1 - R_1 R_3 R_6)(1 - R_2 R_6) \quad (10)$$

در معادلات بالا $R_{(1,4)}^{\min}$ و $R_{(1,4)}^{\max}$ به ترتیب کران پایین و کران بالای قابلیت اطمینان زوج مبدأ- مقصد (۱و۴) هستند.

به این ترتیب قابلیت اطمینان دسترسی هر زوج مبدأ - مقصد w را می توان از میانگین حسابی بین کران بالا و کران پایین آن محاسبه کرد:

$$R_w^{\text{connectivity}} = (R_w^{\min} + R_w^{\max}) / 2 \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، $R_w^{\text{connectivity}}$ ، R_w^{\max} و R_w^{\min} به ترتیب میانگین، حد بالا و حد پایین قابلیت اطمینان دسترسی زوج مبدأ-مقصد w است. حسن محاسبه قابلیت اطمینان دسترسی (اتصال) از رابطه (۱۱) این است که قابلیت بکارگیری در شبکه های بزرگ را داشته و همچنین در قالب یک رابطه ریاضی ارائه می شود و از این رو نیازی به حل مسئله با روشهای عددی یا استفاده از شبیه سازی نیست. بنابراین از این طریق می توان قابلیت اطمینان دسترسی را برای مبادی و مقاصد شبکه با سرعت زیاد محاسبه کرد.

برای محاسبه قابلیت اطمینان دسترسی تمام زوج مبدأ - مقصد، در قالب یک معیار برای ارزیابی قابلیت اطمینان دسترسی شبکه، می توان از میانگین حسابی آنها و یا وزن دهی به آنها استفاده کرد. آشکار است که اهمیت دسترسی در زوج های مبدأ - مقصد مختلف متفاوت است و در نتیجه وزن دهی به هر کدام از آنها منطقی تر خواهد بود. وزن قابلیت اطمینان هر زوج مبدأ - مقصد w از نسبت تقاضای آن به تقاضای کل شبکه تعیین می شود. به این ترتیب قابلیت اطمینان دسترسی در شبکه از رابطه (۱۲) محاسبه می شود:

$$R_{\text{net}}^{\text{connectivity}} = \sum_{w \in W} (R_w^{\text{connectivity}} * \frac{q_w}{\sum_{w \in W} q_w}) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، q_w تقاضای زوج مبدأ-مقصد w ، W مجموعه زوج مبدأ-مقصد های شبکه و $R_{\text{net}}^{\text{connectivity}}$ قابلیت اطمینان دسترسی شبکه است. بنابراین می توان گفت که معیار قابلیت اطمینان دسترسی شبکه تابعی است از قابلیت اطمینان کمان های

شبکه:

$$R_{\text{net}} = f(R_1, R_2, \dots, R_n) = f(\mathbf{R}) \quad (13)$$

که \mathbf{R} بردار قابلیت اطمینان کمان ها را نشان می دهد.

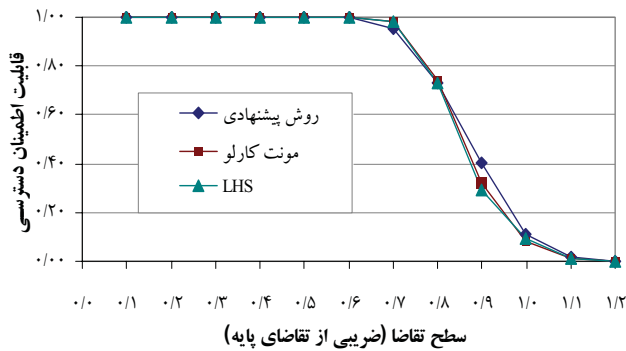
ارزشمندی روش بیان شده در بالا در این است که علاوه بر ایجاد معیار جدیدی به نام «قابلیت اطمینان دسترسی شبکه»، استفاده از فرمول بسته ای فراهم می شود که می توان از آن به راحتی در طراحی، بازسازی و ارتقاء شبکه، با استفاده از تکنیک های بهینه سازی، سود جست. همچنین سرعت بکارگیری این روش، چنان که نتایج عددی این تحقیق نشان می دهد، بسیار بالاتر از روش متداول شبیه سازی مونت کارلو است که توسط محققانی نظیر چن و همکارانش از سال های ۱۹۹۹ به بعد ارائه شده است [۶و۷و۱۲و۱۳].

علاوه بر این، روش های دیگر، فرمول بسته ندارند و نمی توان از آنها به راحتی در طراحی شبکه بهره گیری کرد.

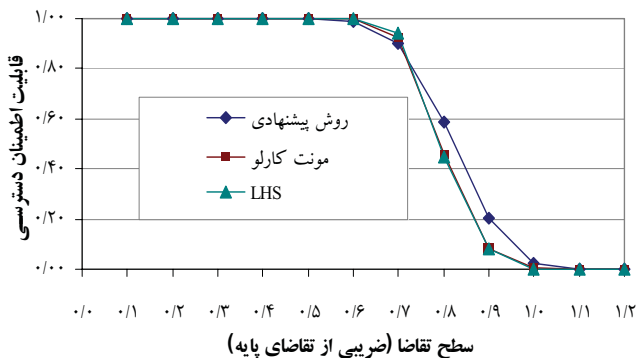
۴. نتایج عددی

روش ارائه شده در این مقاله دو رویکرد دارد؛ یکی محاسبه قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه و دیگری محاسبه قابلیت اطمینان دسترسی زوج مبدأ-مقصد ها و کل شبکه. قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه اولین بار در سال ۱۹۹۹ توسط چن و همکارانش [۶] ارائه شد و بسط آن توسط چن و همکارانش [۷] با بکارگیری روش شبیه سازی مونت کارلو صورت پذیرفت. شبیه سازی مونت کارلو ابزار مناسبی برای تحلیل شبکه های احتمالی است و اگر نمونه گیری ها به تعداد کافی انتخاب شوند، می تواند به دقت قابل قبولی بیانجامد. از این رو، مبنای مقایسه مناسب برای نتایج این مقاله، روش شبیه سازی مونت کارلو است و بر همین مبنای در این مقاله شبکه ای [شبکه شماتیک شکل (۲)] که چن و همکارانش در مطالعات خود [۶و۷و۱۲و۱۳] انتخاب کرده اند، تحلیل شده است. یادآوری می شود که تاکنون بر مبنای توابع عملکردی ظرفیت قابلیت اطمینان دسترسی از روش مونت کارلو استفاده نشده است؛ اما با توجه به دقت قابل قبول آن، برای این که مبنای مناسبی جهت ارزیابی قابلیت اطمینان دسترسی از روش پیشنهادی وجود داشته باشد، روش شبیه سازی مونت کارلو بکار گرفته شده است (مراحل مختلف استفاده از این روش با جزئیات در مرجع [۱۵] توضیح داده شده است). برای بکارگیری این روش نیازمند اطلاعاتی چون توپولوژی شبکه، تقاضای موجود،

بکارگیری روش پیشنهادی، شبیه‌سازی مونت کارلو (۵۰۰۰ بار نمونه‌گیری) و LHS (۱۰۰ بار نمونه‌گیری) را برای محاسبه قابلیت اطمینان دسترسی زوج مبدأ - مقصد (۱و۴) و (۱و۵)، با ضرایب مختلفی از تقاضا (بازه‌ای بین ۰ تا ۱/۲)، نمایش می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، تفاوت چندانی بین نتایج به دست آمده از سه روش وجود ندارد.



شکل ۳. مقایسه قابلیت اطمینان دسترسی زوج مبدأ - مقصد (۱و۴) از روش‌های مختلف



شکل ۴. مقایسه قابلیت اطمینان دسترسی زوج مبدأ - مقصد (۱و۵) از روش‌های مختلف

برای مقایسه بیشتر روش ارائه شده در این مقاله با روش‌های شبیه‌سازی، قابلیت اطمینان ظرفیت و دسترسی کل شبکه به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶، برای سطوح مختلف تقاضا، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، روش LHS نتایجی بسیار متفاوت با روش پیشنهادی را در بر دارد؛ در حالی که نتایج به دست آمده از مونت کارلو و پیشنهادی، از سطح تقاضای ۰/۷ تا ۱/۲، به یکدیگر بسیار نزدیکند. از آنجا که هدف از محاسبه قابلیت اطمینان ظرفیت برآورد احتمال افول شبکه است و استفاده از آن معمولاً موقعی

توابع عملکردی ظرفیت هر کمان و زمان سفر آزاد هر کمان هستیم و جدول ۱ مشخصات شبکه شماتیک شکل ۲ را نشان می‌دهد.

جدول ۱. کمان‌های موجود در مسیرها و زوج مبدأ - مقصد

مبدأ - مقصد	مسیر	کمان‌های موجود در مسیر
۴ - ۱	۱	۴-۱
	۲	۶-۲
	۳	۶-۳-۱
۵ - ۱	۴	۷-۲
	۵	۵-۱
	۶	۷-۳-۱

فرض می‌شود تقاضای موجود برای زوج مبدأ - مقصد (۱و۴) و (۱و۵) به ترتیب برابر با ۲۰ و ۲۵ واحد و مشخصات منحنی‌های توزیع احتمال، زمان سفر آزاد کمان‌ها و حجم تخصیص یافته به هر کمان مطابق جدول (۲) باشند. روش تخصیص تقاضا در این مقاله بر اساس مدل تخصیص ظرفیت محدود و با استفاده از تابع BPR (اداره استاندارد راه‌های امریکا) [۱۶] برای زمان سفر کمان‌ها انجام شده است.

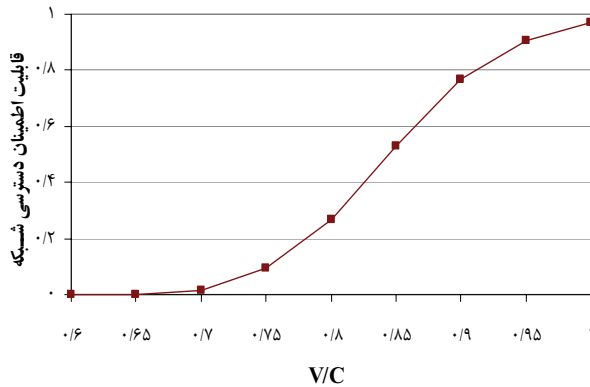
جدول ۲. مشخصات کمان‌های شبکه

شماره کمان	میانگین ظرفیت	انحراف معیار	زمان سفر آزاد (دقیقه)	حد بالای ظرفیت	حد پایین ظرفیت	حجم تخصیص یافته
۱	۱۸/۷۵	۳/۶۱	۴/۰	۲۵/۰	۱۲/۵	۲۴/۹۵
۲	۱۸/۷۵	۳/۶۱	۵/۲	۲۵/۰	۱۲/۵	۲۰/۰۵
۳	۱۱/۲۵	۲/۱۷	۱/۰	۱۵/۰	۷/۵	۵/۸۶
۴	۱۱/۲۵	۲/۱۷	۵/۰	۱۵/۰	۷/۵	۷/۸۴
۵	۱۱/۲۵	۲/۱۷	۵/۰	۱۵/۰	۷/۵	۱۱/۲۵
۶	۱۱/۲۵	۲/۱۷	۴/۰	۱۵/۰	۷/۵	۱۲/۱۶
۷	۱۱/۲۵	۲/۱۷	۴/۰	۱۵/۰	۷/۵	۱۳/۷۵

فرآیند توضیح داده شده در این مقاله، برای محاسبه قابلیت اطمینان دسترسی و قابلیت اطمینان ظرفیت (با فرض $\alpha_i = 1$)، بکار گرفته شده است.

ضمناً برای مقایسه نتایج به دست آمده از روش ارائه شده در این تحقیق، شبکه مورد نظر با روش‌های مونت کارلو و LHS شبیه‌سازی و تحلیل شده است. شکل‌های ۳ و ۴ نتایج حاصل از

قابلیت اطمینان دسترسی شبکه نسبت به V/C شدیدتر است و این اهمیت بررسی قابلیت اطمینان شبکه بر حسب V/C را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که در هیچ یک از مطالعاتی که تا کنون درباره قابلیت اطمینان شبکه‌های حمل و نقلی انجام گرفته تاثیر نسبت V/C در تحلیل‌ها دیده نشده است.



شکل ۷. نحوه تغییرات قابلیت اطمینان دسترسی شبکه برای

مقادیر مختلف V/C

۵. نتیجه گیری

بر اساس آنچه بیان شد، برای محاسبه قابلیت اطمینان ظرفیت و دسترسی یک شبکه حمل و نقلی آسیب‌پذیر می‌توان از روش پیشنهادی در این تحقیق که در قالب فرمول بسته بیان می‌شود، سود جست. این روش، با توجه به نتایج عددی به دست آمده و نگرش نظری بکار رفته در آن، دارای ویژگیهایی است که مزایای زیر را نسبت به روش‌هایی که تاکنون برای این منظور به کار گرفته‌اند، در بر دارد:

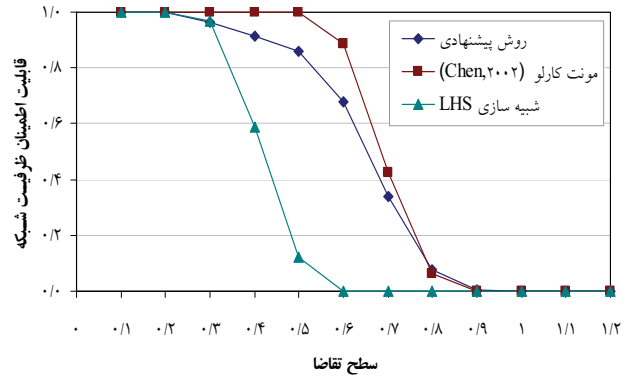
الف) قابلیت اطمینان عملکرد هر کمان شبکه را می‌توان به طور جداگانه محاسبه کرد.

ب) عملکرد هر کمان را می‌توان با توجه به سطح سرویس آن (که بر اساس شاخص حجم به ظرفیت V/C بیان می‌شود) ارزیابی و در تحلیل‌ها وارد کرد؛ با این کار می‌توان قابلیت اطمینان زمان سفر را نیز در هر کمان و تا حدودی در کل شبکه در نظر داشت.

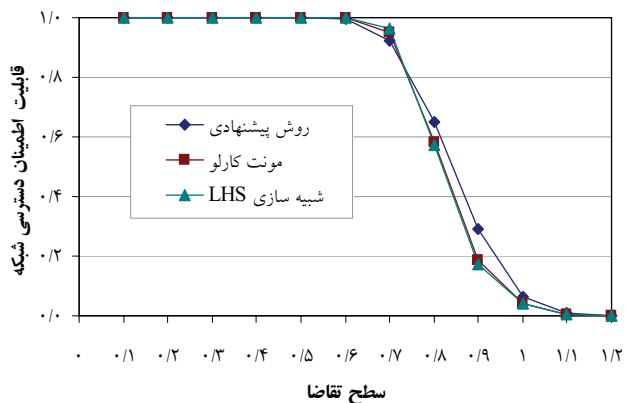
ج) روش ارائه شده در قالب فرمول بسته بیان شده است و از آن می‌توان به راحتی در طراحی، بازسازی و ارتقاء شبکه آسیب‌پذیر استفاده کرد.

د) زمان بکارگیری روش ارائه شده در مقایسه با روش‌های

مناسب خواهد بود که تقاضا قابل ملاحظه باشد، روش‌های مونت کارلو و پیشنهادی را در این مورد می‌توان بکار برد. مطابق شکل ۶، قابلیت اطمینان دسترسی شبکه از هر سه روش جوابهای مشابهی به دست می‌دهند.



شکل ۵. قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه از سه روش مختلف



شکل ۶. قابلیت اطمینان دسترسی شبکه از سه روش مختلف

همان طور که در بخش ۳-۲ اشاره شد روش ارائه شده این قابلیت را دارد که سطح سرویس‌دهی را بر اساس نسبت V/C در محاسبه قابلیت اطمینان شبکه وارد کند. شکل ۷ نحوه تغییرات قابلیت اطمینان دسترسی شبکه را برای مقادیر مختلف V/C نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود هنگامی که انتظار داریم با مقادیر $V/C < 0.75$ دسترسی شبکه تقریباً غیر قابل اعتماد است. از طرفی برای $V/C < 1$ به دلیل انتظار کمتری که از کیفیت سرویس‌دهی کمان‌های شبکه داریم، شبکه، عملکردی با درصد اطمینان بسیار بیشتری خواهد داشت. همچنین با دقت در شکل ۷ می‌توان دریافت که برای $0.75 < V/C < 0.90$ مقدار تغییرات

Transportation, Vol. 33, P.P. 135-146.

9. Bell, M.G.H. (2000), "A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks", *Transportation Research B* 31 (3), pp. 533-545.

10. Yin, Y., Ieda, H. (2001) "Assessing performance reliability of road network under non-recurrent congestion", *Transportation Research Record*, 1771, pp. 148-155.

11. Yin, Y., Lam, W. H. K. and Ida, H. (2004) "New technology and the modeling of risk-taking behavior in congested road networks", *Transportation Research C*, Vol. 12, pp. 171-192.

12. Chen, A., Recker, W. W. (2000) "Considering risk taking behavior in travel time reliability", Irvine, USA: Institute of Transportation Studies, University of California.

13. Chen, A., Ji, Z. and Recker, W. W. (2001) "Travel time reliability with risk-sensitive travelers", Irvine, USA: Institute of Transportation Studies, University of California.

۱۴. منصورخاکی، علی، شریعت مهمینی، افشین و بابائی، محسن (۱۳۸۵) "ارایه روش تقریبی برای سرمایه‌گذاری در شبکه حمل و نقل درون‌شهری در شرایط عدم قطعیت"، هفتمین کنفرانس بین‌المللی عمران، دانشگاه تربیت مدرس.

۱۵. بابایی، محسن (۱۳۸۴) "ارایه روش تصمیم‌گیری برای مدیریت شبکه آسیب‌پذیر بر مبنای توابع عملکردی اجزا"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.

16. Ortuzar, J. de D., Williamson, L. (2001)

"Modelling transport", New York: John Wiley & Sons.

پانویس‌ها

1. Reserve capacity
2. Congested road networks
3. Expected value
4. Minimal cuts
5. Minimal paths
6. Latin hypercube sampling

شبیه‌سازی، که تا کنون استفاده شده است، بسیار کمتر است؛ از این رو، صرفه‌جویی در زمان و هزینه، که در شبکه‌های بزرگ ملموس‌تر است، از مهم‌ترین مزایای آن به شمار می‌رود.

ه) روش یاد شده منحصر به شبکه‌های حمل و نقلی نیست و می‌توان از آن در هر شبکه آسیب‌پذیر یا احتمالاتی که ظرفیت کاربری آن اهمیت داشته باشد (مانند شبکه‌های الکترونیکی، شبکه‌های آبرسانی و ...) بهره برد.

۶. مراجع

1. Kutz, M. (2003) "Handbook of transportation engineering", New York: McGraw-Hill.

2. Hoyland, A., Rausand, M. (1994) "System reliability theory: Models and statistical methods", New York, John Wiley & Sons.

3. Asakura, Y., Kashiwadani, M. (1991) "Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow", *Proceedings of the 19th PTRC Summer Annual Meeting in Brighton*, pp. 73-84.

4. Asakura, Y. (1996) "Reliability measures of an origin and destination pair in a deteriorated road network with variable flow", In: *Transportation Networks: Recent Methodological Advances*, London: Pergamon Press.

5. Iida, Y., Wakabayashi, H. (1989) "An approximation method of terminal reliability of road network using partial minimal path and cut set", *Proceedings of the Fifth WCTR*, vol. IV, Yokohama, P.P. 367-380.

6. Chen, A., Yang, H.H.K., Tang, H.K. and Lo, W.H. (1999) "A capacity related reliability for transportation networks", *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 33, pp. 183-200.

7. Chen, A., Yang, H., Lo, W.H. Tang, H.K. (2002) "Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results", *Transportation Research Part B* (36), pp. 225-252.

8. Bell, M.G.H. (1999) "Measuring Network: A game theoretic approach", *Journal of Advanced*

A Heuristic Method for Connectivity and Capacity Reliability Evaluation in Degradable Urban Transportation Networks

A. Shariat Mohaymany, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

A. Mansourkhaki, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

M. Babaei, Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E – Mail: shariat@iust.ac.ir

ABSTRACT

A transportation network, subject to some internal or external events, may be involved in performance degradation and traffic flow instability. The external events mainly include weather conditions and natural disasters like snowfall, ice, hurricane, earthquake and avalanche. Internal degradations are due to traffic related factors such as control systems failure, accidents, and maintenance and construction operations. All aforementioned circumstances can severely decrease links' capacities, and some of them affect the base demand of the origin-destination pairs; hence, the network cannot perform as well as that in normal situation.

When a transportation network or a number of its components (links) is vulnerable pertain to the foregoing incidents or disasters, its performance cannot be evaluated through the conventional methods in which we calculate deterministic measures such as average travel speed, average delay per vehicle and vehicle-kilometer traveled. In such situations the capacity of degraded links has not certain values, and they must be referred to as probability distribution functions; we therefore will face with a probabilistic network whose performance index ought to be assessed in reliability terms.

Until now different types of performance reliability have been established to evaluate the reliability of degradable transportation networks. The first one is the connectivity reliability which considers the probability that a special origin-destination (OD) pair of the network remains connected. The other measure addressed frequently in previous studies is travel time reliability, which is defined as the probability that a trip performs successfully between a given OD pair within a specified time interval. Recently, another challenging measure has been introduced in order to estimate that at what level of a certain demand the network can perform accurately. This measure is known as capacity reliability and, in other words, is the probability that a network can accommodate a certain traffic demand at a required service level.

This paper presents a heuristic method to calculate the connectivity (terminal) reliability and the capacity reliability. The capacity of each link is assumed to have a normal distribution function that is verified by a proposed method in order that a lower bound and an upper bound can be assigned to the function. Using these modified normal distribution functions the performance reliability of each link is obtained based on the integration of its probability density function from V_i to C_{\max}^i :

$$R_i = P(v_i \leq C) = \int_{V_i}^{C_{\max}^i} f_i(c) dc$$

where V_i is the traffic volume on link i that is computed through the application of user equilibrium assignment with respect to the expected link capacities. C_{\max}^i and $f_i(c)$ are

respectively upper bound and probability density function of capacity of link i . Notice the link performance reliability will be zero if the volume exceeds the upper bound of link capacity.

Having calculated the links performance reliabilities, the capacity and connectivity reliability of the network are calculated by means of the closed formulas presented in this paper for each type of considered performance reliability measures. Another contribution of this paper is that the presented method has the ability of taking into account a required level of service for each link, namely it would be possible to assess the network performance when there exist especial expectations for maximum volume per capacity ratios (V/C s). Therefore, it might be said that in the proposed method the travel time reliability is considered along with evaluating the two explained performance reliability measures because the travel time of each link is a function of its V/C .

Finally, for the sake of comparing the numerical results obtained from proposed method and from the other previous works, we have examined a simple test network employed repeatedly in network reliability analysis, particularly in the case of capacity reliability studies.

Keywords: Urban transportation networks, uncertainty, connectivity reliability, capacity reliability