Archive of SID

# 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 پاره ای 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 ارایه 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 ارایه 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، ارایه شده است.*

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

## ۱. مقدمه

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 شبکهٔ حمل و نقلی در راستای دستیابی به اهداف مورد انتظار از شبکه، مهندسان نیازمند معیارها و ابزارهای علمی هستند که از آن طریق بتواند به شبکه‌ای با عملکرد مناسب دست یابند. آشکار است که دستیابی به چنین ابزار علمی و همچنین قدرت بکارگیری آنها در مقیاس واقعی و کاربردی، نشانهٔ رشد و پیشرفت یک کشور است. در حال حاضرمعمول‌ترین 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

* تاریخ دریافت: ۸۵/٤/۰۱ – تاریخ پذیرش: ۸۵/۱۲/۲۰


www.SID.ir

Archive of SID



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 شبکهٔ 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 ازکاهش 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 ویا سفر بین مبدأ و مقصد در بازه زمانی تعیین شده‌ای انجام پذیرد. می‌توان گفت که قابلیت اطمینان زمان سفر، اولین بار درسال ۱۹۹۱ توسط آساکورا و کاشیوادانی [۳]، به عنوان یک معیار برای ارزیابی شبکه مطرح شد. نویسندگان آن مقاله، قابلیت اطمینان زمان سفر را برای سطوح سرویس‌دهی خاص و تحت تغییرات روزانه جریان ترافیک معرفی کرده‌اند. درسال ۱۹۹٦ آساکورا [٤] 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 واکاباياشی [۵] درسال ۱۹۸۹ ارایه شد. دراین 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 هرکدام 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 [٦و٧] 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



www.SID.ir

Archive of SID

همکارانش در دو مقاله فوق سعی کرده‌اند با استفاده از مفهوم ظرفیت ذخیره[1] 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، دربخش‌های دیگر این مقاله روشهای بکار رفته درمقاله‌های چن با جزییات بیشتر بیان خواهد شد.

### ۲-٤ 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 [۸و۹] 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، یین 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 ارایه کردند. درمقاله‌ای دیگر یین، 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[2] 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 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 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 $f_i(x)dx$ ماهیت احتمالی دارد نه


www.SID.ir

Archive of SID



. $f_i(x)$

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

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

$$k_i=\frac{1}{\int_{C^i_{min}}^{C^i_{max}} f_i(x)\,dx} \qquad (۲)$$

$$f_i(c)=k_i\,f_i(x) \qquad (۳)$$

شرایط تابع چگالی برای تابع $k_i f_i(x)$ بر قرار است؛ زیرا در رابطه (٤) $k_i$ عددی ثابت است و از انتگرال بیرون می‌آید؛ در نتیجه:

$$\int_{C^i_{min}}^{C^i_{max}} k_i f_i(x)\,dx = k_i.\int_{C^i_{min}}^{C^i_{max}} f_i(x)dx$$
$$=\frac{1}{\int_{C^i_{min}}^{C^i_{max}} f_i(x)dx}\times\int_{C^i_{min}}^{C^i_{max}} f_i(x)dx=1 \qquad (٤)$$

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:

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

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:

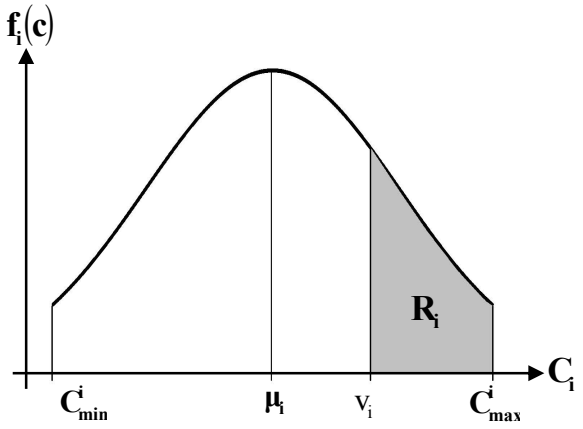
(٦)

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

در رابطه (٦)، $v_i$ حجم عبوری از کمان $i$ ام و $C_i$ متغیر تصادفی نرمال است که تابع چگالی آن را با $f_i(c)$ نشان می‌دهیم، $C^i_{min}$ حد پائین ظرفیت کمان $i$ ام و $C^i_{max}$ 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 $C^i_{max}$ قابلیت اطمینان عملکرد کمان را به دست می‌دهد. اگر حجم عبوری از کمان ($v_i$) از حد بالای ظرفیت کمان ($C^i_{max}$) 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 ($\mu_i$) است.

شکل ۱ تعریف ارایه شده در رابطه (٦) را نشان می‌دهد.




**شکل۱. 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 $\alpha_i$ 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 $v_i/\alpha_i$ بیشتر باشد». این تعریف کمک می‌کند تا بتوان قابلیت اطمینان شبکه را برای تأمین سطح سرویس مورد



www.SID.ir

Archive of SID

نظر ارزیابی کرد. در این صورت رابطه (٦) به صورت رابطه (٧) بازنویسی می‌شود:

(٧)

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

هرگاه $\alpha_i$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 [٧] 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 (٨) برای برآورد قابلیت اطمینان شبکه استفاده کرد، که بیانگر احتمال کارکرد تمام کمان‌های شبکه به طور همزمان است:

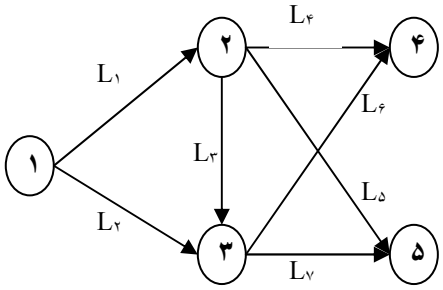
$$R_{net.}^{Capacity} = R_1 R_2 \ldots R_n = \prod_{i=1}^{n} R_i \qquad (٨)$$

### ۳-٤ 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 $v/C = .75$ 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 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[٤] و مسیرهای کمین[٥] 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 (شکل۲) 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 ٦ تشکیل یک مسیر کمین را می‌دهند که اگر هر سه عضو همزمان سالم باشند، حتماً یک مسیر از گره ۱ به گره ٤ وجود خواهد داشت. به همین ترتیب باقی مسیرهای کمین برای رسیدن از مبدأ ۱ به مقصد ٤ عبارتند از: {$L_1$ , $L_4$} و {$L_2$ , $L_6$}. همچنین با قطع کمان‌های ۱ و ۲ تمام مسیرها از گره ۱ به گره ٤ قطع می‌شود، پس مجموعه {$L_1$ , $L_2$} یک برش کمین است. به همین ترتیب باقی برش‌های کمین عبارتند از: {$L_1$ , $L_6$}، {$L_6$ , $L_4$} و {$L_2$ , $L_3$ , $L_4$}. از این رو می‌توان کران‌های پایین و


www.SID.ir

Archive of SID



بالای قابلیت اطمینان شبکه را برای زوج مبدأ- مقصد (۱و٤) به صورت روابط (۹و۱۰) به دست آورد:

(۹)

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

$$R_{(1,4)}^{max} = 1-(1-R_1R_4)(1-R_1R_3R_6)(1-R_2R_6) \qquad (۱۰)$$

در معادلات بالا $R_{(1,4)}^{min}$ و $R_{(1,4)}^{max}$ به تربیت کران پایین و کران بالای قابلیت اطمینان زوج مبدأ- مقصد (۱و٤) هستند.

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

$$R_w^{connectivity} = (R_w^{min} + R_w^{max})/2 \qquad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱)، $R_w^{connectivity}$، $R_w^{max}$ 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 شبکه‌های بزرگ را داشته و همچنین در قالب یک رابطه ریاضی ارایه می‌شود و از این رو نیازی به حل مسئله با روشهای عددی یا استفاده از شبیه‌سازی نیست. بنابراین از این طریق می‌توان 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، می‌توان از میانگین حسابی آنها ویا وزن‌دهی به آنها استفاده کرد. آشکار است که اهمیت دسترسی در زوج‌های مبدأ - مقصدمختلف متفاوت است و در نتیجه وزن‌دهی به هر کدام از آنها منطقی‌تر خواهد بود. وزن قابلیت اطمینان هر زوج مبدأ - مقصد w از نسبت تقاضای آن به تقاضای کل شبکه تعیین می‌شود. به این ترتیب قابلیت اطمینان دسترسی در شبکه از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$R_{net.}^{connectivity} = \sum_{w\in W}(R_w^{connectivity} * \frac{q_w}{\sum_{w\in W} q_w}) \qquad (۱۲)$$

در رابطه (۱۲)، $q_w$ تقاضای زوج مبدا-مقصد w، W مجموعه زوج مبدا-مقصدهای شبکه و $R_{net.}^{connectivity}$ قابلیت اطمینان دسترسی شبکه است. بنابراین می‌توان گفت که معیار قابلیت اطمینان دسترسی شبکه تابعی است از قابلیت اطمینان کمان‌های شبکه:

$$R_{net.} = f(R_1, R_2, ..., R_n) = f(\mathbf{R}) \qquad (۱۳)$$

که $\mathbf{R}$ بردار قابلیت اطمینان کمان‌ها را نشان می‌دهد.

ارزشمندی روش بیان شده در بالا در این است که علاوه بر ایجاد معیار جدیدی به نام «قابلیت اطمینان دسترسی شبکه»، استفاده از فرمول بسته‌ای فراهم می‌شود که می‌توان از آن به راحتی در طراحی، بازسازی و ارتقاء شبکه، با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی، سود جست. همچنین سرعت بکارگیری این روش، چنان که نتایج عددی این تحقیق نشان می‌دهد، بسیار بالاتر از روش متداول شبیه‌سازی مونت‌کارلو است که توسط محققانی نظیر چن و همکارانش از سال‌های ۱۹۹۹ به بعد ارایه شده است [٦و۷و۱۲و۱۳].

علاوه بر این، روش‌های دیگر، فرمول بسته ندارند و نمی‌توان از آنها به راحتی در طراحی شبکه بهره‌گیری کرد.

## ٤. نتایج عددی

روش ارایه شده در این مقاله دو رویکرد دارد؛ یکی محاسبه قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه و دیگری محاسبه قابلیت اطمینان دسترسی زوج مبدأ-مقصدها و کل شبکه. قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه اولین بار در سال ۱۹۹۹ توسط چن و همکارانش [٦] ارایه شد و بسط آن توسط چن و همکارانش [۷] با بکارگیری روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو صورت پذیرفت. شبیه‌سازی مونت‌کارلو ابزار مناسبی برای تحلیل شبکه‌های احتمالی است و اگر نمونه‌گیری‌ها به تعداد کافی انتخاب شوند، می‌تواند به دقت قابل قبولی بیانجامد. از این رو، مبنای مقایسه مناسب برای نتایج این مقاله، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو است و بر همین مبنا در این مقاله شبکه‌ای [شبکه شماتیک شکل(۲)] که چن و همکارانش در مطالعات خود [٦و۷و۱۲و۱۳] انتخاب کرده‌اند، تحلیل شده است. یادآوری می‌شود که تاکنون بر مبنای توابع عملکردی ظرفیت قابلیت اطمینان دسترسی از روش مونت‌کارلو 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 شبیه‌سازی مونت‌کارلو 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،



www.SID.ir

Archive of SID



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 |
|---|---|---|
| ۱ - ٤ | ۱ | ۱-٤ |
| | ۲ | ۲-٦ |
| | ۳ | ۱-۳-٦ |
| ۱ - ٥ | ٤ | ۲-۷ |
| | ٥ | ۱-٥ |
| | ٦ | ۱-۳-۷ |

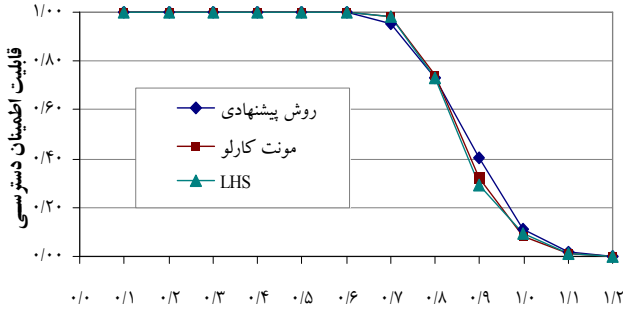
فرض می‌شود تقاضای موجود برای زوج مبدأ - مقصد (۱و٤) و (۱و٥) به ترتیب برابر با ۲۰ و۲۵ واحد و مشخصات منحنی‌های توزیع احتمال، زمان سفر آزاد کمان‌ها و حجم تخصیص یافته به هر کمان مطابق جدول (۲) باشند. روش تخصیص تقاضا در این مقاله بر اساس مدل تخصیص ظرفیت محدود و با استفاده از تابع BPR (اداره استاندارد راه‌های امریکا) [۱٦] برای زمان سفر کمان‌ها انجام شده است.

**جدول ۲. مشخصات کمان‌های شبکه**

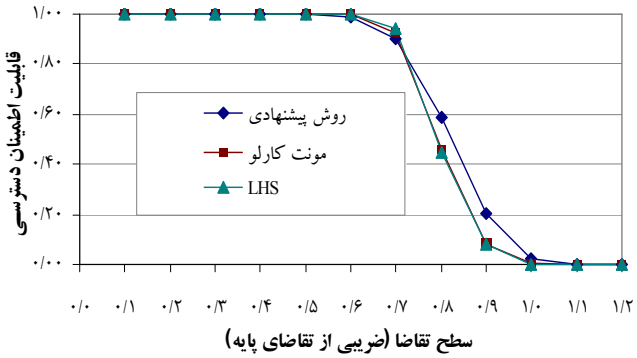
| شماره کمان | میانگین ظرفیت | انحراف معیار | زمان سفر آزاد(دقیقه) | حد بالای ظرفیت | حد پایین ظرفیت | حجم تخصیص یافته |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۸/۷۵ | ۳/٦۱ | ٤/۰ | ۲٥/۰ | ۱۲/٥ | ۲٤/۹٥ |
| ۲ | ۱۸/۷٥ | ۳/٦۱ | ٥/۲ | ۲٥/۰ | ۱۲/٥ | ۲۰/۰٥ |
| ۳ | ۱۱/۲٥ | ۲/۱۷ | ۱/۰ | ۱٥/۰ | ۷/٥ | ٥/۸٦ |
| ٤ | ۱۱/۲٥ | ۲/۱۷ | ٥/۰ | ۱٥/۰ | ۷/٥ | ۷/۸٤ |
| ٥ | ۱۱/۲٥ | ۲/۱۷ | ٥/۰ | ۱٥/۰ | ۷/٥ | ۱۱/۲٥ |
| ٦ | ۱۱/۲٥ | ۲/۱۷ | ٤/۰ | ۱٥/۰ | ۷/٥ | ۱۲/۱٦ |
| ۷ | ۱۱/۲٥ | ۲/۱۷ | ٤/۰ | ۱٥/۰ | ۷/٥ | ۱۳/۷٥ |

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 ارایه شده در این تحقیق، شبکه مورد نظر با روش‌های مونت‌کارلو و LHS شبیه‌سازی و تحلیل شده است. شکل‌های۳ و٤ نتایج حاصل از بکارگیری روش پیشنهادی، شبیه‌سازی مونت کارلو (۵۰۰۰ بار نمونه‌گیری) و LHS (۱۰۰ بار نمونه‌گیری) را برای محاسبه قابلیت اطمینان دسترسی زوج مبدأ - مقصد (۱و٤) و (۱و٥)، 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.




**شکل۳. مقایسه قابلیت اطمینان دسترسی زوج مبدأ - مقصد (۱و٤) از روش‌های مختلف**




**شکل٤. مقایسه قابلیت اطمینان دسترسی زوج مبدأ - مقصد (۱و٥) از روش‌های مختلف**

برای مقایسه بیشتر روش ارایه شده در این مقاله با روش‌های شبیه‌سازی، قابلیت اطمینان ظرفیت و دسترسی کل شبکه به ترتیب در شکل ٥ و شکل ٦، برای سطوح مختلف تقاضا، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ٥ دیده می‌شود، روش LHS نتایجی بسیار متفاوت با روش پیشنهادی را در بر دارد؛ در حالی که نتایج به دست آمده از مونت‌کارلو 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

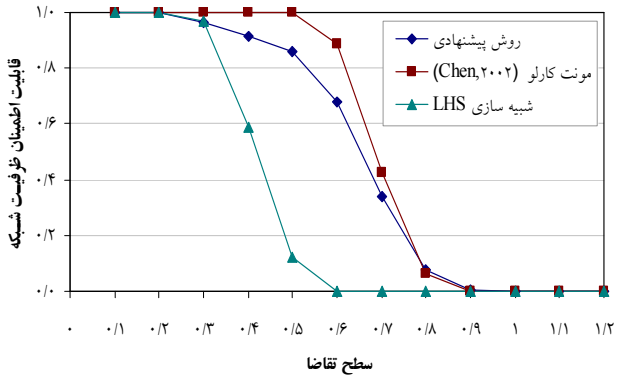


www.SID.ir

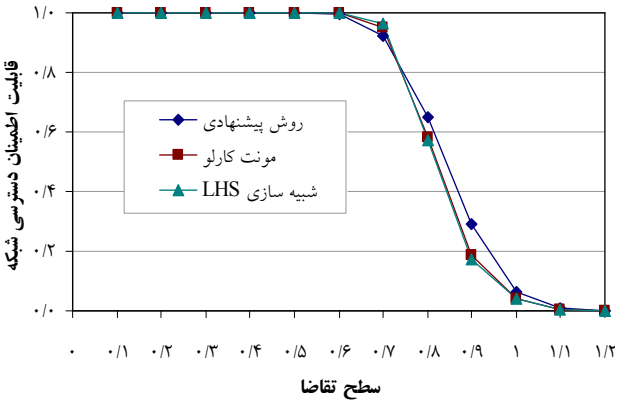
Archive of SID



مناسب خواهد بود که تقاضا قابل ملاحظه باشد، روش‌های مونت‌کارلو و پیشنهادی را در این مورد می‌توان بکار برد. مطابق شکل ٦، قابلیت اطمینان دسترسی شبکه از هر سه روش جوابهای مشابهی به دست می‌دهند.

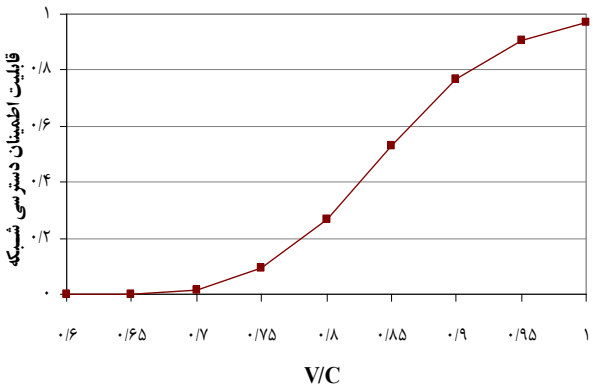



**شکل۵. قابلیت اطمینان ظرفیت شبکه از سه روش مختلف**




**شکل٦. قابلیت اطمینان دسترسی شبکه از سه روش مختلف**

همان طور که در بخش ۳-۲ اشاره شد روش ارایه 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 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.




**شکل۷. نحوه تغییرات قابلیت اطمینان دسترسی شبکه برای مقادیر مختلف $v/C$**

## ۵. نتیجه‌گیری

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 درنظر داشت.

ج) روش ارایه شده در قالب فرمول بسته بیان شده است و از آن



www.SID.ir

Archive of SID

می‌توان به راحتی در طراحی، بازسازی و ارتقاء شبکه آسیب‌پذیر استفاده کرد.

د) زمان بکارگیری روش ارایه شده در مقایسه با روش‌های 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.

## ٦. 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 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.

١٤. منصورخاکی، علی، شریعت مهیمنی، افشین و بابائی، محسن (١٣٨٥) "ارایه روش تقریبی برای سرمایه‌گذاری در شبکه حمل و نقل درون‌شهری در شرائط عدم قطعیت"، هفتمین کنفرانس بین‌المللی عمران، دانشگاه تربیت مدرس.

١٥. بابایی، محسن (١٣٨٤) "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.



www.SID.ir

Archive of SID



## پانویس‌ها

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



www.SID.ir