

تخصیص سرمایه‌گذاری در شبکه حمل و نقل بر مبنای قابلیت اطمینان

افشین شریعت‌مهیمنی^{۱*}، شیده احتشام‌راد^۲ و محسن بابایی^۳

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۳ دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

امدادسانی به موقع بلافاصله پس از رخ دادن یک حادثه مانند زلزله یا سیل در یک شبکه حمل و نقلی شهری، اصلی‌ترین عامل نجات آسیب-دیدگان به شمار می‌رود. این موضوع به حفظ مناسب عملکرد اجزای شبکه وابسته است. عوامل مختلف محیطی می‌توانند عملکرد شبکه حمل و نقلی را دچار اختلال نمایند. این اختلال در خدمت‌دهی اجزای شبکه بروز پیدا می‌کند. مثلاً پلی می‌شکند و از شبکه خارج می‌شود و یا در اثر آسیب-دیدگی، دیگر نمی‌تواند با همه ظرفیت خود سرویس‌دهی کند. در این مقاله با در نظر داشتن عملکرد احتمالی ظرفیت کمان‌ها، مدلی جهت تخصیص سرمایه برای بهبود عملکرد آن‌ها ارائه شده است. حل این مدل مشخص می‌کند کدام کمان‌ها می‌بایست تحت سرمایه‌گذاری قرار گیرند به نحوی که پس از وقوع حادثه، قابلیت اطمینان شبکه در سطح مطلوبی حفظ شود. بدین منظور، شاخص‌های ارزیابی مناسب برای توصیف عملکرد شبکه انتخاب و برای برآورد کرانه بالا و پایین قابلیت اطمینان شاخص‌های مورد نظر، از روش محتمل‌ترین حالت استفاده شده است. در این شاخص که می‌بایست معرف کیفیت سرویس‌دهی شبکه باشد، قابلیت اطمینان اتصال مبدأ-مقصد و زمان سفر کل شبکه در نظر گرفته شده است. سپس الگوریتم ژنتیک جهت حل مدل بهینه‌سازی ارائه شده، مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت مدل، در یک شبکه حمل و نقلی به کار گرفته شده است. در این مثال روش محتمل‌ترین حالت با روش شبیه‌سازی مونت کارلو مقایسه و در مورد دقت آن بحث شده است.

واژگان کلیدی: تخصیص سرمایه‌گذاری، قابلیت اطمینان زمان سفر، قابلیت اطمینان دسترسی، الگوریتم ژنتیک، محتمل‌ترین حالات، شبیه‌سازی مونت کارلو.

۱- مقدمه

مسئولین در این بخش، محدودیت اعتبار و بودجه در اختیار بوده است. در نظر گرفتن چنین محدودیتی، بهینه مصرف کردن آن را جهت نزدیک شدن هر چه بیشتر به هدف، ضروری می‌سازد. در همین راستا، Due و Nicholson [۱] در مطالعات خود، محدودیت بودجه را به عنوان محدودیت در ارتقاء کمان‌ها بیان می‌کنند و روشی ارائه می‌نمایند که معیار شبکه را با استفاده از شاخص اهمیت کمان اولویت‌بندی می‌کند. Yin و همکاران [۲] حل مسئله‌ای را مطرح کرده‌اند که در نهایت معلوم می‌کند با در نظر داشتن عدم قطعیت در تقاضا و محدودیت بودجه، کدام یک از کمان‌های شبکه نیاز به ارتقاء (در قالب افزایش ظرفیت) دارند و چه مقدار بودجه می‌بایست به آن‌ها اختصاص یابد تا دو فاکتور کارایی (زمان سفر و پایداری) سیستم حداکثر شود. Chen و همکاران [۳] در زمینه سرمایه‌گذاری مطالعاتی انجام داده‌اند که در آن کمان بحرانی و مناسب برای سرمایه-گذاری مشخص شده است. آن‌ها سرمایه‌گذاری را بر اساس حداکثر کردن ظرفیت ذخیره با در نظر داشتن محدودیت برای

سیستم‌های بلاپای طبیعی مانند سیل، زلزله، طوفان و ... شبکه‌های حمل و نقلی را در معرض آسیب‌های جدی قرار می‌دهند. از سوی دیگر، تحت هر شرایطی شبکه حمل و نقلی می‌بایست تأمین‌کننده نیازهای کاربران باشد و ضمن ایجاد دسترسی بین مراکز مختلف جمعیتی، این دسترسی را با کیفیت مطلوب فراهم کند. بدین معنا که می‌بایست مراکز مختلف جمعیتی پس از وقوع حادثه به هم متصل باشند و این اتصال از طریق مسیرهایی برقرار شود که با ارائه خدمت‌دهی مناسب بتواند پاسخگوی تقاضای سفرها در زمان سفری قابل قبول در نقاط مختلف شهر باشد. با در نظر داشتن این موضوع که شبکه حمل و نقل، جزء تفکیک‌ناپذیر زندگی امروز بشر است، مجهز بودن به یک سیستم حمل و نقلی پایدار و قابل اطمینان از ضروریات‌های حال حاضر جوامع به شمار می‌رود. با توجه به عملکرد احتمالی شبکه و به دلیل تحمیل ناگزیر شرایط محیطی، بحث تعمیر و نگهداری و همچنین بهبود و ارتقای شبکه مورد توجه متولیان حمل و نقلی قرار گرفته است. اما دغدغه همیشگی

به کار گرفته شد. راه حل ارائه شده در مطالعه ایشان می‌تواند در شرایط تقاضای غیر ثابت، که میزان تغییرات آن در محدوده مشخص از پیش تعیین شده‌ای است، شبکه‌ای را طراحی کند به نحوی که بتواند در بدترین سناریو، عملکرد بهتری داشته باشد در حالی که کارایی متوسط نزدیک به بهینه را حفظ می‌نماید.

Dimitriou و Stathopoulos [۱۳] مسئله طراحی شبکه را در یک مدل دو سطحی با محدودیت‌های قابلیت اطمینان زمان سفر کل شبکه، بودجه و محدودیت‌های فیزیکی (حداکثر ظرفیت ممکن برای ارتقای یک کمان) مطرح و از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و الگوریتم ژنتیک در حل مسئله استفاده نمودند. در مدل ارائه شده، شبکه به گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند عملکرد خود را در یک محدوده LOS^۲ از پیش تعیین شده حفظ نماید. Shariat Mohaymany, Babaei [۱۴] در مطالعه اخیر خود مسئله طراحی شبکه را بر اساس قابلیت اطمینان اتصال برای شبکه‌ای که کمان‌های آن در معرض کاهش ظرفیت هستند، مطرح نموده‌اند. ایشان از روش جدیدی برای ارزیابی قابلیت اطمینان کارایی کمان‌ها استفاده نموده‌اند.

هرچند شاخص‌های کارایی مختلفی برای بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما در هیچ یک از تلاش‌های صورت گرفته، شاخص‌های زمان سفر و دسترسی که مناسب بودن هر دوی آن‌ها پس از وقوع زلزله حائز اهمیت است، به صورت هم‌زمان مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در این مقاله تلاش شده است با هدف اولویت‌بندی کمان‌ها جهت سرمایه‌گذاری، ابتدا شاخص‌های مناسب ارزیابی شبکه در شرایط غیر قطعی عرضه انتخاب شوند و سپس مدلی در راستای بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری پیشنهاد شده و روش حل آن ارائه گردد. در بخش بعد، شاخص‌های مناسب کارایی شبکه معرفی می‌شوند. در بخش ۳، مدل ارائه شده و روش حل آن بررسی می‌گردد. سپس در بخش ۴، نحوه برآورد شاخص که در مراحل حل به کار گرفته می‌شود، ارائه و الگوریتم محاسبه آن آورده می‌شود. در بخش ۵ مدل برای یک شبکه حمل و نقلی به کار گرفته می‌شود و در پایان، کارایی و محدودیت‌های روش و مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- انتخاب شاخص‌های کارایی شبکه

در زمان بروز حوادث و بلاهای طبیعی، اساسی‌ترین نیاز حادثه دیدگان، امدادسانی به موقع است که بستگی مستقیم

قابلیت اطمینان برای یک شبکه آسیب‌پذیر اولویت‌بندی کرده‌اند. Shetab Bushehri و Poorzahedi [۴] مدلی برای ارتقای شبکه از طریق بهبود کمان‌ها ارائه کرده‌اند. در این مقاله، پارامتری برای اهمیت کمان تعریف شده و پس از محاسبه این پارامتر برای کلیه کمان‌ها، اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری بر اساس قابلیت اطمینان مازاد مصرف‌کننده انجام گرفته است.

Sanchez-Silva و همکاران [۵] مدلی ارائه کرده‌اند که بودجه را به نحوی بهینه به کمان‌ها اختصاص می‌دهد؛ به طوری که دسترسی بین مراکز جمعیتی را حداکثر کند. همچنین در این مقاله، تصمیم‌گیری کاربرانی که بین مراکز سفر می‌کنند مدل شده است. Chootinan و همکاران [۶] مسئله طراحی شبکه بر مبنای قابلیت اطمینان را مورد بررسی قرار داده‌اند. قابلیت اطمینان مورد نظر در این شبکه، قابلیت اطمینان ظرفیت کمان می‌باشد. به نحوی که در شرایط متوسط، هر کمان در شبکه با کمتر از بیشینه ظرفیت خود سرویس‌دهی می‌کند. مسئله به صورت یک مدل دو سطحی تعریف شده است که در سطح بالایی بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و در سطح پایینی تخصیص تعادلی کاربر مدل شده است.

Sumalee [۷] نیز شبکه را بر اساس حداکثر کردن قابلیت اطمینان زمان سفر کل شبکه طراحی کرده است.

Golroo و Shariat [۸] یک بودجه محدود را با هدف افزایش قابلیت اطمینان زمان سفر کل شبکه، به کمان‌های آسیب‌پذیر با به کارگیری شاخص اهمیت هر کمان اختصاص داده‌اند. ایشان برای حل مدل خود از روش برنامه‌ریزی پویا و شبیه‌سازی LHS^۱ استفاده نموده‌اند. Tylor و D'Este [۹] نیز نشان داده‌اند می‌توان با تعیین کمان‌هایی که نقش برجسته‌تری نسبت به سایر کمان‌ها دارند و سرمایه‌گذاری روی آن‌ها، از میزان آسیب‌پذیری شبکه کاست. Joseph [۱۰] در مطالعه خود مسئله طراحی انعطاف‌پذیر شبکه را در یک مدل دو سطحی، به عنوان یک مدل نزدیک به واقعیت مطرح کرده است. در این مطالعه، تغییرات تقاضای مبدأ-مقصدها به عنوان تابعی از زمان، تأثیرگذارترین پارامتر غیر قطعی در سرمایه‌گذاری بلندمدت در نظر گرفته شده است. Chen و همکاران [۱۱] مسئله طراحی شبکه بر اساس قابلیت اطمینان زمان سفر کل شبکه را مطرح کرده‌اند. در مدل پیشنهادی ایشان، هدف کمینه‌سازی بودجه زمان سفر کل شبکه و محدودیت آن نیز قابلیت اطمینان زمان سفر شبکه است. این رویکرد یک سال بعد نیز توسط Yin [۱۲]

نشان داده شده است. با در نظر داشتن رفتار احتمالی کمان‌ها، حال می‌بایست به این سوال پاسخ داده شود که کدام ترکیب از کمان‌ها برای سرمایه‌گذاری انتخاب شود به نحوی که در نهایت بتوان سطح عملکردی شبکه (شاخص‌های کارایی انتخاب شده) را در سطح مطلوبی حفظ کرد. این مسئله به صورت زیر مدل شده است:

$$\begin{aligned} & \text{Max} \quad R_t \\ & \text{Subject to:} \\ & \sum_{i \in A} c_i \eta_i \leq B \quad (1) \\ & R_{c_w} \geq \alpha \quad \forall w \in OD \end{aligned}$$

که در آن:

R_t : قابلیت اطمینان زمان سفر شبکه

c_i : میزان سرمایه‌گذاری روی لینک

η_i : پارامتر تصمیم‌گیری (۰ یا ۱)

B : بودجه در اختیار

R_{c_w} : قابلیت اطمینان اتصال مبدأ-مقصد

α : حداقل قابلیت اطمینان اتصال قابل قبول

W : مبدأ-مقصد مورد بررسی

OD : مجموعه مبدأ-مقصدهای شبکه

A : مجموعه کمان‌های شبکه

حل مدل فوق مشخص می‌کند کدام ترکیب از کمان‌ها باید برای سرمایه‌گذاری انتخاب شود، به نحوی که با بهبود توابع عملکردی قابلیت اطمینان زمان سفر روی کل شبکه بیشینه شود (تابع هدف). این سرمایه‌گذاری باید به گونه‌ای باشد که بر اساس محدودیت اول مدل، اولاً سرمایه‌گذاری از میزان بودجه در اختیار بیشتر نباشد و ثانیاً بر اساس محدودیت دوم، بتواند قابلیت اطمینان اتصال کلیه مبدأ-مقصدهای شبکه را به حداقل α برساند. α یک پارامتر سیاست‌گذاری است که بر اساس عواملی همچون اهمیت یا حساسیت شبکه تعیین می‌شود.

۳-۲- حل مدل بهینه‌سازی

الگوریتم حل مدل فوق در فلوچارت شکل (۱) نمایش داده شده است. به طور کلی می‌بایست، یک حالت قابل قبول سرمایه‌گذاری برای شبکه انتخاب شود و تأثیر آن روی سیستم بررسی گردد. سپس فاکتورهای ارزیابی شبکه (قابلیت اطمینان زمان سفر و اتصال) مورد بررسی قرار گیرند.

به قابلیت بهره‌برداری شبکه حمل و نقلی دارد. پر واضح است که این امدادسانی زمانی تأثیرگذار و نجات دهنده خواهد بود که در محدوده زمانی مشخصی انجام پذیرد. بدین ترتیب، از یک سو شبکه حمل و نقلی می‌بایست تأمین کننده حداقل یک مسیر بین مراکز جمعیتی مختلف شهر باشد، تا اتصال بین نقاط مختلف شبکه حفظ شود و از سوی دیگر لازم است خدمت‌دهی در این اتصال را نیز با کیفیت مطلوبی فراهم کند. منظور از کیفیت مطلوب برای یک شبکه حمل و نقلی در شرایط بروز حادثه، قابلیت پاسخگویی به تقاضای حمل و نقلی در یک زمان مشخص است. بدین ترتیب، قابلیت اطمینان یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزان و سرمایه‌گذاران در زمینه طراحی شبکه محسوب می‌شود. با توجه به حائز اهمیت بودن هر دو فاکتور دسترسی و زمان سفر، قابلیت اطمینان‌های متناظر با آن‌ها، قابلیت اطمینان هر جفت مبدأ-مقصد و قابلیت اطمینان زمان سفر کل شبکه، به عنوان شاخص‌های مناسب ارزیابی شبکه انتخاب شده‌اند.

۳- مدل اولویت‌بندی کمان‌ها جهت سرمایه‌گذاری بهینه روی شبکه

۳-۱- ارائه مدل

فرض کنید هر کمان دارای سه سطح عملکردی با تعاریف زیر باشد:

عملکرد کامل: که در آن آسیب‌دیدگی کمان ناچیز است. چنین کمانی عملکرد عادی خود را پس از بروز حادثه نیز حفظ می‌کند.

عملکرد متوسط: که در آن آسیب‌دیدگی کمان قابل توجه است و افت سطح سرویس‌دهی آن در قالب افزایش زمان سفر نشان داده می‌شود.

بدون عملکرد: که در آن کمان به طور کامل قطع شده است.

توابع عملکردی کمان‌ها، توابع گسسته‌ای هستند که احتمال وقوع هر کدام از حالات فوق را برای شبکه مشخص می‌کنند.

همچنین فرض کنید که برای هر کمان امکان یک سطح سرمایه‌گذاری وجود دارد. این سرمایه‌گذاری تابع عملکردی اجزا را تغییر می‌دهد. بدین معنا که پلی که با صرف بودجه، مقاوم‌سازی لرزه‌ای شود، در شرایط بروز حادثه‌ای مانند زمین لرزه، رفتار قابل اطمینان‌تری از خود نشان می‌دهد. پس از وقوع حادثه، بعضی از کمان‌ها دچار خرابی کامل و بعضی دچار آسیب شده‌اند. افت سطح سرویس در هر کمان با تغییرات در زمان سفر آن

محاسبه شود. مقدار این شاخص‌ها به تخصیص تقاضا وابسته است. بدین ترتیب می‌بایست در سطح پایین تخصیص انجام گیرد و زمان سفر روی شبکه بر اساس آن محاسبه شود. برای استفاده از تخصیص مطابق توضیحات بخش ۴-۱ از روش همه یا هیچ استفاده می‌شود.

در فلوچارت شکل (۱)، بخشی که در خط چین قرار گرفته شده است، مراحل مربوط به محاسبه برازندگی برای هر کروموزوم را نشان می‌دهد. نحوه برآورد قابلیت اطمینان زمان سفر و اتصال در بخش ۴ آورده شده است. برای محاسبه برازندگی، پس از تولید محتمل‌ترین حالت توسط الگوریتم ORDER-M، تخصیص در هر حالت بر اساس زمان سفر کمان-ها متأثر از عملکرد آن‌ها (کامل، متوسط، بدون عملکرد) انجام می‌گیرد. سپس در هر حالت زمان سفر کل شبکه و اتصال همه ODها بررسی می‌گردد. آن‌گاه کرانه بالا و پایین و در نهایت تقریبی از قابلیت اطمینان از روی رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

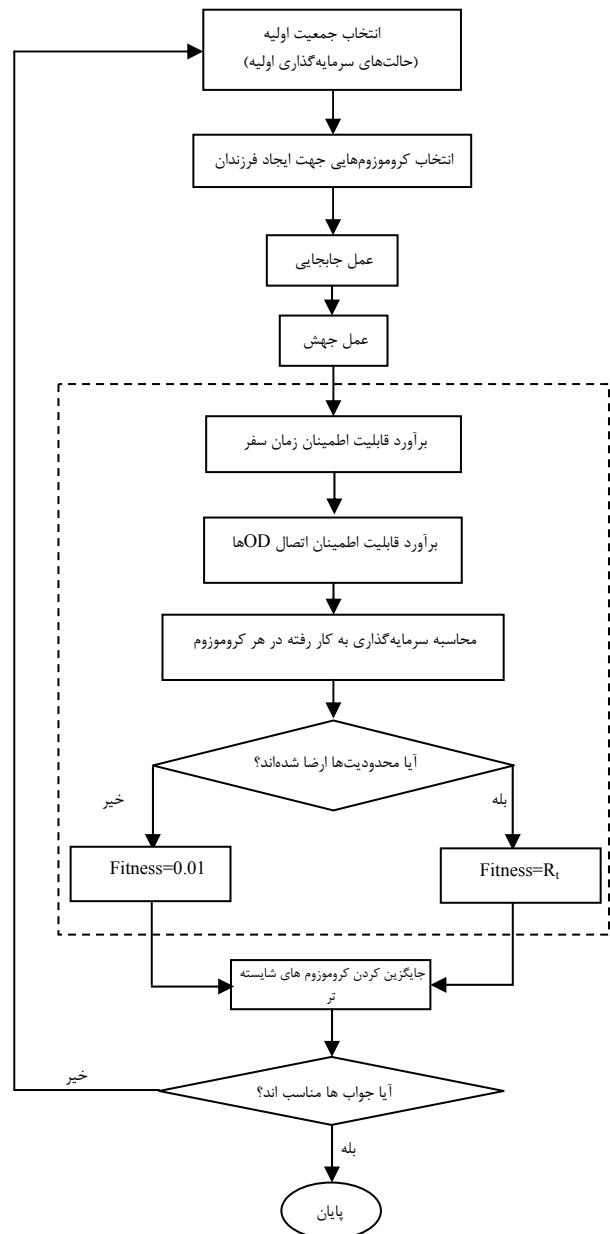
۴- برآورد قابلیت اطمینان

همان‌طور که در بخش ۳-۲ اشاره شد، تابع برازندگی برای هر کروموزوم در هر تکرار از الگوریتم ژنتیک، به میزان قابلیت اطمینان زمان سفر و اتصال که به عنوان شاخص‌های کارایی در این مطالعه انتخاب شده‌اند، بستگی دارد. در بخش ۴-۱ به روش کلی به کار گرفته شده جهت برآورد قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود و در بخش ۴-۲ الگوریتم گام به گام مورد استفاده در این مقاله ارائه می‌گردد.

۴-۱- روش کلی برآورد قابلیت اطمینان

یکی از روش‌های متداول تقریبی محاسبه قابلیت اطمینان، محاسبه کرانه‌های بالا و پایین آن می‌باشد. بدیهی است هر چه کرانه‌های بالا و پایین به هم نزدیک‌تر باشند، میزان تقریب کمتر و محاسبه قابلیت اطمینان دقیق‌تر خواهد بود. Li و Silvester روش عمومی پیدا کردن امید ریاضی یک پارامتر را برای تقریب کرانه بالا و پایین در یک شبکه احتمالی به کار گرفته‌اند [۱۵]. فرض کنید X پارامتر عمومی مورد نظر برای محاسبه می‌باشد و مقدار این پارامتر بسته به این که شبکه در چه حالتی (S_K) قرار داشته باشد، تغییر می‌کند. یعنی X تابعی است از S_K که به صورت $X(S_K)$ نشان داده می‌شود.

در چنین فضای گسسته‌ای، برای پیدا کردن امید ریاضی پارامتر مورد نظر $E[X]$ ، کافی است مقدار $X(S_K)$ را در هر حالت در احتمال رخداد آن ضرب کنیم:



شکل ۱- فلوچارت حل مدل

چنانچه با کنترل شاخص عملکردی، حالت شبکه "مناسب" ارزیابی شود، حالت سرمایه‌گذاری پذیرفته شده (در صورت بهینه بودن) و در غیر این صورت حالت جدیدی انتخاب و بررسی می‌گردد. برای جستجوی مؤثر حالت‌های مختلف سرمایه‌گذاری در فضای جواب قابل قبول، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی در واقع یک مدل دو سطحی است. در سطح اول، حالت سرمایه‌گذاری انتخاب می‌شود. در این سطح برای محاسبه تابع برازندگی در هر مرحله می‌بایست قابلیت اطمینان‌های زمان سفر و اتصال

منظور، پس از تولید حالات شبکه، وضعیت شاخص مورد نظر بررسی می‌گردد. چنانچه در آن حالت شبکه، شاخص مورد نظر در وضعیت مطلوبی قرار داشته باشد، ارزش آن حالت یعنی همان پارامتر $X(S_K)$ ، ۱ و در غیر این صورت این ارزش برابر صفر خواهد بود. در محاسبه قابلیت اطمینان زمان سفر کل شبکه، پس از تخصیص تقاضا به هر کمان، زمان سفر از مجموع ضرب تقاضای هر کمان در زمان صرف شده روی آن کمان محاسبه می‌شود (رابطه (۶)).

$$(۳) \quad T = \sum_{i=1}^A q_i t_i$$

که در آن؛

T : زمان سفر کل شبکه

q_i : تقاضای تخصیص یافته به کمان

t_i : زمان صرف شده در کمان

سیس زمان سفر کل شبکه هر حالت با بیشینه زمان سفر قابل قبول مقایسه می‌گردد. چنانچه زمان سفر به دست آمده از مقدار بیشینه در نظر گرفته شده کمتر یا با آن مساوی باشد، ارزش آن حالت ۱ و در غیر این صورت ارزش برابر صفر خواهد بود. برای مشخص کردن حداکثر زمان قابل قبول، ضریبی مانند θ تعریف می‌شود. اعمال این ضریب به زمان سفر کل شبکه در شرایط اولیه شبکه، حداکثر زمان قابل قبول را نشان می‌دهد (رابطه (۷)). انتخاب این ضریب به نظر تصمیم‌گیرنده وابسته است. بدیهی است هر چه این ضریب کوچک‌تر انتخاب شود، به معنای سختگیری بیشتر روی عملکرد مطلوب شبکه خواهد بود. یعنی باید شبکه به نحوی ارتقاء یابد که در بدترین شرایط حادثه نیز بهترین عملکردی نزدیک به عملکرد معمول خود داشته باشد و دچار کمترین میزان آسیب دیدگی گردد.

$$(۷) \quad T_{\max} = \theta \times T_0$$

که در آن

T_{\max} : حداکثر زمان سفر قابل قبول شبکه

T_0 : زمان سفر کل شبکه در شرایط اولیه شبکه

θ : ضریب تبدیل زمان سفر شبکه در شرایط عادی به حداکثر زمان سفر قابل قبول شبکه.

$$(۱) \quad E[X] = \sum X(S_K) \cdot P(S_K)$$

که در آن؛ $P(S_K)$: احتمال رخداد حالت K بوده و K تعداد حالات ممکن برای شبکه می‌باشد.

حال چنانچه X که در توضیح بالا، یک پارامتر عمومی تعریف شده است، همان شاخص کارایی شبکه باشد، در نهایت پیدا کردن $E[X]$ طبق تعریف، به معنای پیدا کردن قابلیت اطمینان، R خواهد بود.

اما همان‌طور که اشاره شد، اساسی‌ترین مشکل در این روش، ارزیابی کلیه حالات محتمل شبکه است. به همین دلیل، چنانچه بخشی از کل حالات انتخاب شود (m حالت) به طوری که بتواند پوشش خوبی از کل حالات موجود در شبکه به دست دهد، می‌توان کرانه بالا و پایین قابلیت اطمینان را از روابط (۳) و (۴) تقریب زد:

$$(۳) \quad R_L = \sum_{K=1}^m P(S_K) \cdot X(S_K) + \left(1 - \sum_{K=1}^m P(S_K)\right) \cdot (X_{Worst})$$

$$(۴) \quad R_U = \sum_{K=1}^m P(S_K) \cdot X(S_K) + \left(1 - \sum_{K=1}^m P(S_K)\right) \cdot (X_{Best})$$

که در آن

$P(S_k)$: احتمال رخداد حالت k

$X(S_k)$: مقدار شاخص مورد نظر در حالت k

m : محتمل‌ترین حالات انتخاب شده

R_L : کرانه پایین قابلیت اطمینان

R_U : کرانه بالای قابلیت اطمینان

X_{Best} : مقدار شاخص در بهترین حالت که معادل ۱ است.

X_{Worst} : مقدار شاخص در بدترین حالت که معادل ۰ است.

در نهایت قابلیت اطمینان از میانگین‌گیری کرانه بالا و پایین محاسبه شده، تقریب‌زده می‌شود:

$$(۲) \quad \bar{R} = \frac{R_U + R_L}{2}$$

برای محاسبه قابلیت اطمینان شبکه، که در آن شبکه می‌تواند تنوع حالاتی به تعداد N^M داشته باشد (M : تعداد کمان‌ها، N : تعداد حالات ممکن برای هر کمان)، می‌بایست پس از انتخاب تأثیرگذارترین حالات بر مقدار قابلیت اطمینان، قابلیت اطمینان زمان سفر یا اتصال در آن حالت ارزیابی شود. بدین

مسیر را (بر مبنای زمان سفر) تا مقصد مورد نظر دارند. با توجه به این که بخش قابل توجهی از تقاضای پس از وقوع حادثه، تقاضای امداد رسانی است و میزان آن با توجه به ظرفیت کمان‌ها مقدار کمی است، می‌توان از روش تخصیص همه یا هیچ استفاده نمود. استفاده از این روش، با توجه به نیاز به تکرار برای چندین هزار حالت در محاسبه قابلیت اطمینان، صرفه‌جویی قابل توجهی را در زمان پدید می‌آورد.

۴-۲- الگوریتم برآورد قابلیت اطمینان

برای محاسبه شاخص‌های کارایی در هر حالت سرمایه‌گذاری شبکه، از الگوریتم زیر استفاده شده است:

گام اول: ورودی‌های شبکه شامل گره‌ها، کمان‌ها، ماتریس تقاضا، زمان سفر روی هر کمان، حالات مختلف عملکردی هر کمان و احتمال وقوع آن‌ها را مشخص کنید.

گام دوم: تقاضا را به شرایط اولیه شبکه تخصیص دهید و مقدار T_0 و θ را مشخص کنید.

گام سوم: حالات مختلف شبکه را تولید کنید. به طوری که پوشش مناسبی از کل فضای احتمالی مسئله ایجاد نماید. مقدار این پوشش بستگی مستقیم به ابعاد شبکه، دقت مورد نیاز و زمان تحت اختیار دارد. برای تولید بهینه این حالات از الگوریتم ORDER-M استفاده نمایید.

گام چهارم: برای هر حالت احتمال وقوع را محاسبه کنید.

گام پنجم: برای هر حالت، تقاضا را به شبکه تخصیص دهید.

گام ششم: برای هر حالت، زمان سفر کل را محاسبه کنید. (T)

گام هفتم: میزان θT_0 را مشخص کنید. این مقدار، حداکثر زمان قابل قبول برای زمان سفر کل شبکه است. همه حالات را برای زمان سفر کنترل کنید. برای هر حالت که در آن $T \leq \theta T_0$ ، ارزش ۱ و در غیر این صورت ارزش ۰ را اختصاص دهید. منظور از ارزش، همان پارامتر $X(S_K)$ در روابط (۳) و (۴) می‌باشد.

گام هشتم: برای همه حالات شرایط اتصال را کنترل نمایید. می‌بایست بین تمامی مبادی و مقاصد حداقل یک مسیر موجود باشد. در صورت برقراری اتصال، ارزش ۱ و در غیر این صورت ارزش ۰ را اختصاص دهید.

گام نهم: کرانه بالا و پایین قابلیت اطمینان‌های زمان سفر و اتصال را از روابط (۳) و (۴) و میانگین این دو کرانه (مطلوب مسئله) را از رابطه (۷) محاسبه نمایید.

بدیهی است هر چه حساسیت شبکه بیشتر و حفظ عملکرد آن مهمتر باشد، می‌بایست θ عدد کوچک‌تری انتخاب شود. بدین ترتیب در شرایط بروز بحران نیز، شبکه می‌تواند با عملکردی نزدیک به شرایط عادی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

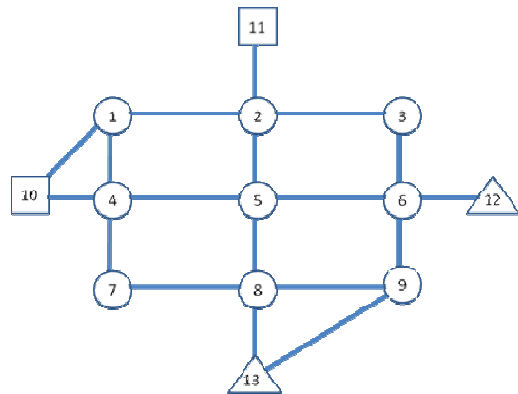
با توجه به این که افزایش ابعاد شبکه و افزایش حالاتی که هر کمان از شبکه می‌تواند داشته باشد، تعداد حالات شبکه را به طور نمایی افزایش می‌دهد، بررسی کلیه حالات محتمل شبکه حتی در شبکه‌های کوچک، کاری بسیار وقت‌گیر و طولانی خواهد بود. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد، با پذیرش تقریب، از بعضی حالات شبکه که در محاسبه قابلیت اطمینان (به دلیل احتمال پایین وقوع) تأثیرگذاری کمتری دارند، صرف نظر شود. در مقابل تأثیرگذارترین حالات مشخص شده و شاخص مورد نظر (مانند زمان سفر شبکه یا اتصال مبدأ-مقصد) در آن بررسی گردد. تأثیرگذارترین حالات بر مقدار قابلیت اطمینان، حالاتی هستند که احتمال بیشتری برای وقوع داشته باشند؛ به نحوی که مجموع این حالات بتواند پوشش قابل توجهی از کل حالات محتمل شبکه ایجاد نماید. بدیهی است هر چه این پوشش به ۱۰۰٪ نزدیک‌تر باشد، مقدار قابلیت اطمینان دقیق‌تر محاسبه می‌شود و در مقابل هر چه پوشش از ۱۰۰٪ کمتر باشد، از تقریب بیشتری جهت برآورد مقدار قابلیت اطمینان استفاده شده است.

الگوریتم ORDER-M، توسط Li و Silvester برای مشخص کردن محتمل‌ترین حالات ممکن یک شبکه به ترتیب کاهشی طراحی شده است [۱۵]. در نسخه اولیه این الگوریتم، هر کمان می‌تواند فقط در حالت قطع یا وصل عمل کند. الگوریتم ORDER-M برای تولید محتمل‌ترین حالات برای شبکه‌ای که دارای کمان‌های چند مده (بیش از دو مد) باشد توسط Shen-Neng و Li اصلاح شد [۱۶]. با استفاده از این الگوریتم، می‌توان بدون نیاز به تولید کلیه حالات شبکه، صرفاً حالاتی را که بتوانند با تقریب مناسبی نمایانگر کل حالات شبکه باشد تولید نمود. بدین ترتیب با ارزیابی همین تعداد حالات، که پوشش قابل قبولی از فضای مسئله داشته باشند، تقریب مناسبی از عملکرد شبکه حاصل نمود. در این مقاله از الگوریتم دوم استفاده شده است.

همان طور که پیش از این اشاره شد، برآورد قابلیت اطمینان زمان سفر به میزان تقاضای اختصاص داده شده به هر کمان وابسته است. با در نظر گرفتن تابع زمان سفر کمان‌ها به صورت یک تابع گسسته، فرض شده است پس از وقوع حادثه، اطلاع رسانی به کاربران به صورت کامل انجام می‌گیرد. یعنی کاربران برای انتخاب مسیر اطلاعات کافی برای پیدا کردن کوتاه‌ترین

۵- به کارگیری مدل

شبکه انتخابی در شکل (۲) نشان داده شده است. این شبکه دارای ۱۳ گره، ۱۸ کمان و ۴ مبدا و مقصد می‌باشد و ارتباط بین گره‌ها به صورت دو طرفه می‌باشد. میزان تقاضا پس از بروز حادثه، همان تقاضای امداد رسانی است. ماتریس OD در جدول (۱) و احتمال عملکرد هر کمان در هر کدام از سطوح عملکردی، قبل و بعد از سرمایه‌گذاری به شرح جدول (۲) می‌باشد.



شکل ۲- شبکه انتخابی مثال

جدول ۱- ماتریس تقاضای شبکه

	۱۲	۱۳
۱۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۱	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۲- احتمال عملکردی کمان‌ها

بدون عملکرد	عملکرد متوسط	عملکرد کامل	
پیش از سرمایه‌گذاری	۵٪	۱۵٪	۸۰٪
پس از سرمایه‌گذاری	۱۰٪	۸۴٪	۶٪

فرض‌ها و ورودی‌ها در این مثال‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- تمامی کمان‌ها دو طرفه هستند.
- ماتریس تقاضا ثابت فرض می‌شود.
- هر کمان می‌تواند قبل و پس از سرمایه‌گذاری، سه مدل عملکردی داشته باشد. زمان سفر برای عبور از کمان سالم، دو واحد زمانی، برای کمان‌های با عملکرد متوسط، چهار واحد زمانی و برای کمان‌های قطع شده، بی‌نهایت است.
- احتمال وقوع مدهای عملکردی قبل و پس از سرمایه‌گذاری، مقداری مشخص و ثابت است.

- مجموعاً هشت واحد سرمایه‌گذاری در اختیار است و هر کمان می‌تواند حداکثر یک واحد را به خود اختصاص دهد.

برای این مثال $\theta=1.5$ و $\alpha=0.85$ انتخاب شده و مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک با پارامترهای بهینه نرخ تقاطع و جهش به ترتیب برابر 0.5 و 0.12 حل شده است. تعداد کروموزوم‌ها در هر نسل ۲۰ کروموزوم انتخاب شده و از روش‌های چرخ رولت، تک‌نقطه‌ای و یکنواخت به ترتیب جهت اعمال انتخاب، جابجایی و جهش استفاده شده است. برای هر عضو از جمعیت در هر مرحله از الگوریتم ژنتیک حالتی که بتواند در بدترین شرایط حداقل 0.85 شبکه را پوشش دهند، تولید شده‌اند. لازم به توضیح است که کلیه حالات ممکن برای چنین شبکه‌ای با توجه به تعداد کمان‌ها و تعداد مدهای عملکردی برابر 3^{18} یا $489,420,387$ حالت خواهد بود که با پذیرش تقریب برای برآورد و استفاده از الگوریتم ORDER-M به 10000 حالت کاهش می‌یابد.

جواب بهینه برای این مثال (۰۱۰۰۰۱۰۱۱۱۱۰۱۰۰۰۰۱) یعنی سرمایه‌گذاری روی کمان‌های دوم، ششم، هشتم، نهم، دهم، یازدهم، سیزدهم، چهاردهم و هجدهم می‌باشد. در این نقطه قابلیت اطمینان زمان سفر به مقدار بیشینه $0.94/0.80$ و قابلیت اطمینان اتصال به بیش از 0.85 برای هر OD و پوشش شبکه به $0.89/0.50$ می‌رسد. جدول (۳)، تأثیر سرمایه‌گذاری را بر بهبود قابلیت اطمینان شبکه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، سرمایه‌گذاری روی کمان‌ها توانسته است قابلیت اطمینان اتصال را با ارتقای متوسط 12 درصدی برای اتصال مبدأ-مقصد تا بیش از 0.85 افزایش دهد. این سرمایه‌گذاری همچنین موجب شده است قابلیت اطمینان زمان سفر با 28 درصد بهبود به بیش از 0.80 ارتقاء یابد. این بدان معناست که در صورت بروز حادثه، شبکه می‌تواند با احتمال بیش از 0.80 اتصال بین هر جفت OD را در زمانی با حداکثر افزایش 50 ٪ نسبت به شرایط معمول فراهم نماید. جهت مقایسه بهتر بهبود عملکرد شبکه پس از سرمایه‌گذاری، نمودارهای میله-ای متناظر با هر جدول در شکل (۳) آورده شده است.

شکل (۴) نحوه همگرایی الگوریتم ژنتیک را تا رسیدن به جواب بهینه نشان می‌دهد. همچنان که در این شکل مشخص است، الگوریتم پس از 15 تکرار به جواب بهینه رسیده است.

می‌دهد که برآورد تقریبی قابلیت اطمینان با کمتر از ۳٪ خطا توانسته است پارامترهای مورد نظر را با دقت قابل قبولی تقریب بزند.

جدول ۴- مقایسه شبیه‌سازی و روش تقریبی ارائه شده در محاسبه قابلیت اطمینان در نقطه جواب بهینه

قابلیت اطمینان دسترسی			OD
درصد خطا	شبیه‌سازی مونت کارلو	روش تقریبی	
۲/۲۵٪	۰/۹۰۱۴	۰/۸۸۱۶	۱۲-۱۰
۱/۳۳٪	۰/۸۹۱۱	۰/۸۷۹۴	۱۳-۱۰
۲/۲۴٪	۰/۸۷۰۳	۰/۸۵۱۲	۱۲-۱۱
۱/۷۹٪	۰/۸۶۵۴	۰/۸۵۰۱	۱۳-۱۱
قابلیت اطمینان زمان سفر شبکه			OD
درصد خطا	شبیه‌سازی مونت کارلو	روش تقریبی	
۱/۴۷٪	۰/۸۲۱۳	۰/۸۰۹۴	

۶- نتیجه‌گیری

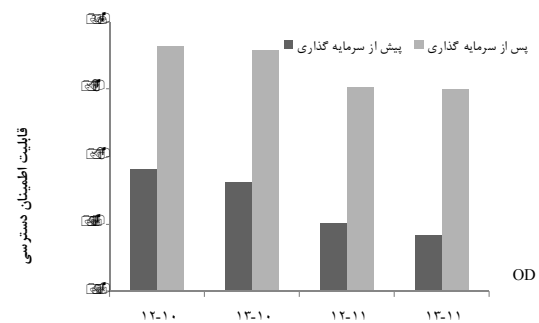
در این مقاله مدلی جهت سرمایه‌گذاری بهینه بر روی شبکه حمل و نقلی با هدف حفظ عملکرد آن پس از وقوع حادثه ارائه شد و دو قابلیت اطمینان اتصال مبدأ- مقصدها و زمان سفر کل شبکه به عنوان شاخص‌های کارایی شبکه معرفی شدند.

باید توجه داشت که برآورد قابلیت اطمینان از طریق روش تقریبی ارائه شده با محدودیت‌هایی مواجه است. با افزایش ابعاد شبکه، تعداد حالات مورد نیاز برای بررسی که بتواند پوشش خوبی از کل حالات محتمل ایجاد کند، بسیار زیاد خواهد بود. هر چند این تعداد از کل حالات موجود چندین برابر کمتر است، اما خود عدد بزرگی است که محاسبات را طولانی و زمان‌بر خواهد کرد. همچنین این مشکل در شبکه‌هایی که تفاوت بین احتمال عملکردهای حالات مختلف آن به هم نزدیک باشد نیز رخ می‌دهد. برای مثال احتمال وقوع (۳۰، ۳۰، ۴۰) متناظر با حالات عملکردی کمان‌ها برای به کارگیری در این الگوریتم مناسب نیستند. این در حالی است که می‌توان احتمال وقوع (۸۵، ۷، ۸) را به راحتی در این الگوریتم به کار برد.

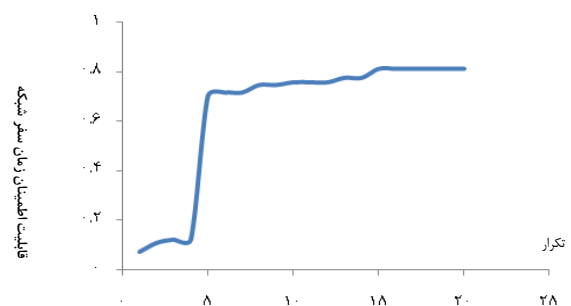
تعمیم مدل فوق برای شبکه‌هایی که دارای تابع عملکردی پیوسته می‌باشند، در نظر گرفتن چند سطح سرمایه‌گذاری به جای یک سطح، و تأثیرپذیری ظرفیت کمان‌ها و در نتیجه تأثیرگذاری آن روی زمان سفر هر کمان می‌تواند در شرایط واقعی‌تر در تصمیم‌گیری به کار گرفته شوند. همچنین می‌توان از

جدول ۳- تأثیر سرمایه‌گذاری بر قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان دسترسی			OD
درصد تغییرات	پس از سرمایه‌گذاری	پیش از سرمایه‌گذاری	
۱۱/۴۲٪	۰/۸۸۱۶	۰/۷۹۱۲	۱۲-۱۰
۱۲/۴۸٪	۰/۸۷۹۴	۰/۷۸۱۸	۱۳-۱۰
۱۳/۲۸٪	۰/۸۵۱۲	۰/۷۵۱۴	۱۲-۱۱
۱۴/۶۴٪	۰/۸۵۰۱	۰/۷۴۱۳	۱۳-۱۱
قابلیت اطمینان زمان سفر شبکه			OD
درصد تغییرات	پس از سرمایه‌گذاری	پیش از سرمایه‌گذاری	
۲۸/۱۳٪	۰/۸۰۹۴	۰/۶۳۱۷	



شکل ۳- تأثیر سرمایه‌گذاری بر قابلیت اطمینان



شکل ۴- نحوه همگرایی الگوریتم ژنتیک

جهت کنترل صحت برآورد قابلیت اطمینان از روش ارائه شده، در نقطه بهینه قابلیت اطمینان از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. بدین منظور قابلیت اطمینان‌های زمان سفر و شبکه و اتصال OD در نقطه جواب مجدداً با به کارگیری روش شبیه‌سازی مونت کارلو محاسبه شده‌اند. شبیه‌سازی تا حاصل شدن دقت ۰/۰۰۱ تکرار شده‌اند. نتایج به دست آمده در جدول (۴) آورده شده است. مقایسه اعداد این جدول نشان

- Resource Allocation", *Journal of Applied Science*, 2008, 8 (13), 2404-2411.
- [9] Taylor, M. A. P., D' Este, G. M., "Concepts of Network Vulnerability and Applications to the Identification of Critical Elements of Transport Infrastructure", the 26th Australian Transport Research Forum, Wellington, New Zealand, 2003.
- [10] Joseph, Y. J. C., "Flexible Management of Transportation Networks", PhD Thesis, University of California USA, 2010.
- [11] Chen, A., Kim, J., Zhou, Z., Chootinan, P., "Alpha Reliable Network Design Problem", *Transportation Research Record*, 2008, 2029, 49-57.
- [12] Yin, Y., Madanat, S. M., Lu, X. Y., "Robust Improvement Schemes for Road Networks under Demand Uncertainty", *European Journal of Operational Research*, 2009, 198 (2), 470-479.
- [13] Dimitriou, L., Stathopoulos, A., "Reliable Stochastic Design of Road Network System", *International Journal of Industrial and System Engineering*, 2008, 3 (5), 549-574.
- [14] Shariat Mohaymany, A., Babaei, M., "An Approximate Reliability Evaluation Method for Improving Transportation Network Performance", *Transport*, 2010, 25 (2), 193-202.
- [15] Li, V., Silvester, J., "Performance Analysis of Networks with Unreliable Components", *IEEE Transactions on Communications*, 1984, 32, 1105-1111.
- [16] Chiou, S., Li, V., "Reliability Analysis of a Communication Network with Multimode Components", *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 1986, SAC-4 (7), 1156-1161.
- ایده فوق برای بهینه‌سازی شبکه حمل و نقل همگانی برای بهبود سرویس‌دهی به شهروندان و یا شبکه شهری تحت نوسانات روزانه عرضه ناشی از حوادث کوچک مانند تصادفات نیز بهره‌جست.
- ۷- مراجع**
- [1] Due, Z. P., Nicholson, A. J., "Degradable Transportation Systems: Sensitivity & Reliability Analysis", *Transportation Research Part B: Methodological*, 1997, 31 (3), 225-237.
- [2] Yin, Y., Ieda, H., "Optimal Improvement Scheme for Network Reliability", *Transportation Research Record*, 2002, 1783, 1-6.
- [3] Chen, A., Yang, H., Lo, H. K., Tang, W. H. "Capacity Reliability of a Road Network: An assessment Methodology and Numerical Results", *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002, 36 (3), 225-252.
- [4] Poorzahedi, H., Shetab Bushehri, S. N., "Network Performance Improvement under Stochastic Events with Long-term Effects", *Transportation*, 2005, 32, 65-85.
- [5] Sanchez-Silva, M., Daniels, M., Lleras, G., Patino, D., "A Transport Network Reliability Model for the Efficient Assignment of Resources", *Transportation Research Part B: Methodological*, 2005, 39, 47-63.
- [6] Chootinan, P., Wong, S. C., Chen, A., "A Reliability-Based Network Design Problem", *Journal of Advanced Transportation*, 2005, 39 (3), 247-270.
- [7] Sumalee, A., Watling, D. P., Nakayama, S., "Reliable Network Design Problem, the Case with Uncertain Demand & Total Travel Time Reliability", *Transportation Research Record*, 2006, 1964, 81-90.
- [8] Golroo, A., Shariat Mohaymani, A., "Upgrading of Degradable Transportation Network by Investment Prioritization in

EXTENDED ABSTRACT

Reliability Based Resource Allocation for Transportation Network

Afshin Shariat Mohaymany*, Shideh Ehteshamrad, Mohsen Babaei

Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Department of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Received: 23 June 2011; **Accepted:** 26 December 2012

Keywords:

Investment assignment, Network travel time reliability, Connectivity reliability, Genetic algorithm, Most probable states, Monte-Carlo simulation

1. Introduction

Transportation networks are highly vulnerable to natural disasters such as earthquake. However, they are expected to perform properly in all circumstances. They are expected to connect different parts of the network and provide these connections with a proper level of service. Since transportation networks today are undividable sections of modern lives, being equipped with a sustainable and reliable network is a vital requirement of each society.

Transportation authorities are always concerning about the improvement of the network influenced by the external effects as well as its the repair and maintenance due to the stochastic environment encompassing the network. However, their permanent constraint is the limitation of budget available. As a result, to get closer to the subject of improving the network's performance, it is necessary to allocate resources to the network components in an optimized manner.

2. Methodology

2.1. Network performance measures

During the occurrence of a disaster, the basic necessity for the injured is to receive emergency services which are directly dependent on serviceability of the network. Clearly the services are effective and savior if only they are offered in a predefined time threshold. It means that not only the network should provide at least one route between different population centers, but also it should provide a proper serviceability for each route. "Proper serviceability" here means providing complete service to demand in a pre-determined threshold of travel time. As this serviceability is uncertain, the reliability term is engaged which has become important parameters for planners and authorities recently. Hence, as connection and travel time are both necessary, under uncertain conditions, their respective reliability indicators are chosen as proper performance measures of the network.

2.2. Resource allocation problem: Model formulating

Suppose each link has 3 modes of performance as following definitions:

Normal: Link is not degraded and performs normally.

Degraded: Link is degraded.

Failed: Link is totally failed.

* Corresponding Author

E-mail addresses: shariat@iust.ac.ir (Afshin Shariat Mohaymany), shideh_ehtesham@yahoo.com (Shideh Ehteshamrad), babaei@iust.ac.ir (Mohsen Babaei).

Performance function of each link is a discrete function reflecting the probability of occurrence of the abovementioned modes. Suppose there is one level of investment available for each link. Investing on a link leads to performance function improvement. For example, a bridge which is rehabilitated can perform more reliable encountering a destructive event than it would in its current situation. Any decrease in link's performance is considered as an increase in its travel time.

Now, what to be done here is to find the optimized subset of links as candidates for investment which maximize time reliability measure while preserving connectivity reliability measure subject to budget limitation.

2.3. Solution algorithm

The solution algorithm consists of the selection of a feasible scenario of investment and then to investigate how it affects the whole network performance. The reliability measures (network travel time reliability and connectivity reliability of each OD) are taken into account. After controlling the constraints and reliability measures, if the network is realized as "proper", the scenario is accepted. Otherwise, a new scenario should be studied. In this regard, genetic algorithm is employed as an effective method of search in discrete integer problems. Note that the proposed model is in fact a bi-level model. In the upper level, a scenario is chosen. Then travel time reliability of the network and the connectivity reliability of each OD are estimated. As these measures depend on the demand assigned to each route, in the lower level, an appropriate assignment method is to be employed to specify link's flow. In this regard, the 'all or nothing' method is employed as the assignment method.

3. Results and discussion

It is to be mentioned that the proposed reliability approximation method shows some sorts of limitations through several usage of the method in different networks. For example, increasing the dimension of network leads to a great sudden increase in required probable states to provide a proper coverage. Although the number of required states considerably less than the number of whole probable states, it is still a huge number which makes the algorithm very time consuming.

The same problem will occur if the probabilities of the modes of each link are very close to each other. For example sign the algorithm for a link with the set of mode probabilities of (40, 30, 30) is inappropriate while the same algorithm is very efficient and useful for a link with probability set of (8, 7, 85).

4. Conclusions

The provision of emergency services after a disaster is the most important factor to survive the wounded. This issue directly depends on serviceability of the network, which is highly vulnerable to natural disasters. In this paper, a resource allocation model was proposed for degradable transportation networks. In the proposed model, the network travel time reliability and the connectivity reliability of each OD of the network were chosen as two important performance measures under the effect of different type of disasters, e.g. earthquake.

Although applying the reliability approximation method will make the challengeable procedure of reliability approximation more efficient, it is does not show the same efficiency in larger or more variable probable state for links. However it can be applied in small size networks, as shown in the numerical example of this paper.

For further studies, it is suggested to develop a model for networks with continuous performance function, assuming more than 1 level of investment allowed for each link, or continuous travel time functions which are affected by flow. These changes would lead to more real network studies. In addition the proposed idea can be developed for daily or slight fluctuation of capacity produced by events such as accidents or road maintenance activities.

5. References

- [1] Taylor, M. A. P., D' Este, G. M., "Concepts of Network Vulnerability and Applications to the Identification of Critical Elements of Transport Infrastructure", the 26th Australian Transport Research Forum, Wellington, New Zealand, 2003.
- [2] Li, V., Silvester, J., "Performance Analysis of Networks with Unreliable Components", IEEE Transactions on Communications, 1984, 32, 1105-1111.
- [3] Chiou, S., Li, V., "Reliability Analysis of a Communication Network with Multimode Components", IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 1986, SAC-4 (7), 1156-1161.