توسعه ایمنی‌محور مسئله طراحی شبکه گسسته با در نظر گرفتن شاخص تصادفات

مقاله علمی – پژوهشی

مهرداد عسگری، دانشجو دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران محیط زیست ، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
امین‌میرزا بروجردیان*، دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: boroujerdian@modares.ac.ir

دریافت: ۱٤۰۳/۰۳/۱۱– پذیرش: ۱٤۰۳/۱۱/۰۱
صفحه ۱۱۲-۹۹

چکیده

مسئله طراحی شبکه به عنوان یک چارچوب تصمیم‌گیری، یک جهت گیری مبتنی بر سیاستگذاری در حوزه حمل و نقل را در بر می‌گیرد. این مسئله پایه مفهومی‌خود را در قلمرو بهینه‌سازی هزینه، با تاکید کلیدی بر هزینه‌های مربوط به زمان سفر می‌یابد. این در حالی است که دامنه هزینه‌ها در مسئله طراحی شبکه فراتر از زمان سفر است. این مطالعه یک کاوش دقیق از هزینه‌های جانبی ناشی از کاستی‌های ایمنی و تصادفات را دنبال می‌کند و مفهوم جدید مسئله طراحی شبکه ایمن را معرفی می‌کند. بررسی این موضوع با استفاده از شبکه سوفالز به عنوان مطالعه موردی در مدل لبلانک انجام شد و راهبرد بهینه بهبود شبکه را روشن کرد. مسئله لبلانک که شامل انتخابی از بین پنج پروژه با محدودیت بودجه است، منجر به سناریوی بهینه ۱۰۱۱۰ می‌شود که نشان‌دهنده اجرای پروژه‌های اول، سوم و چهارم است. معرفی ایمنی به عنوان یک عامل کلیدی در این مسئله، به ویژه در زمینه مثال لبلانک، نتایج جالبی به همراه دارد. در این سناریو، راه‌حل به ۰۱۱۱۰ تغییر می‌کند. رویکرد ترکیبی که هزینه‌های زمان سفر و تصادفات را در بر می‌گیرد، همراه با یک تحلیل حساسیت جامع که شدت و وزن حادثه را محاسبه می‌کند، یک تغییر پارادایم در راه‌حل مسئله ایجاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ایمنی حمل و نقل، طراحی شبکه، تابع عملکرد ایمنی

۱-مقدمه

تلفات ۱/۳ میلیون نفر در تصادفات جاده‌ای در جهان، بیانگر سطح اهمت مسئله ایمنی حمل ونقل است. علاوه بر این، پیامدهای اقتصادی تصادفات جاده‌ای است که تا ۳ درصد از ناخالص داخلی در بسیاری از کشورها را شامل می‌شود (WHO, 2021). در کشور ایران نیز تعداد فوتی‌های مربوط به تصادفات جاده‌ای در سال ۱٤۰۰ برابر با ۱٦۷۷۸ نفر بوده است (سازمان پزشکی قانونی، ۱٤۰۱). با توجه به این نگرانی‌های عمیق، کانون توجه باید به طور جدی بر ایمنی حمل و نقل و طراحی شبکه ایمن متمرکز شود. با رویکرد کلان، مطالعات عمدتاً بر جنبه‌های مختلف از جمله ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی و جمعیتی، الگوهای کاربری زمین، تولید و توزیع سفر و ویژگی‌های شبکه‌های جاده‌ای متمرکز شده‌اند (Wang et al., 2012). در این سطح، یک سیاست مهم در برنامه ریزی شبکه، تخصیص منابع برای افزایش ظرفیت جاده است که به عنوان مسئله طراحی شبکه شناخته می‌شود. اکثر مطالعات در ادبیات NDP بر توسعه فرمول‌های ریاضی و تکنیک‌های راه‌حل برای افزایش استفاده از شبکه‌های حمل‌ونقل از طریق بهبود یا افزودن لینک‌ها تمرکز دارند (Farahani et al., 2013). در این

زمینه، تمرکز مطالعات بر بررسی زمان سفر و هزینه‌های آن است، در حالی که جنبه ایمنی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، هدف از این مطالعه پرداختن به مسئله طراحی شبکه راه‌ها با در نظر گرفتن عوامل ایمنی است. به طور مشابه، ورود شاخص برابری به عنوان یک تلاش موازی در تکامل مفهوم NDP است. بهبهانی و همکاران (۲۰۱۹) یک چارچوب جدید برای ادغام ملاحظات برابری در NDP معرفی کرده‌اند (Behbahani et al., 2019). در یک مطالعه موردی، عدالت عمودی و افقی در مسئله طراحی شبکه مورد بررسی قرار گرفته است (Caggiani et al., 2017). مطالعات همچنین به محدودیت‌های مسئله در چارچوب یک مسئله طراحی شبکه برابری‌محور پرداخته‌اند (Caggiani et al., 2017). برابری به عنوان یک هدف اساسی در حوزه استراتژی‌های قیمت گذاری و طراحی شبکه ظاهر شده است (Najmi et al., 2023). در توسعه شبکه، دهنوی و همکاران (۲۰۱۲) نیز به الزامات محیطی پرداختند (Dehnavi et al., 2013). در این مقاله، مسائل طراحی شبکه توسعه داده می‌شود. با استفاده از توابع عملکرد ایمنی این توسعه منجر به مفهوم جدید مسئله طراحی شبکه ایمن (SNDP) می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

برای روشن کردن شکاف تحقیقاتی و دستیابی به مفهوم تکامل یافته SNDP، تاکید می‌شود که ایمنی شبکه حمل و نقل عمدتاً بر ارتباط بین ساختار کلی شبکه و تصادفات یا ارائه مدل‌های ارزیابی ایمنی شبکه متمرکز است. علاوه بر این، بررسی مسئله طراحی شبکه حمل و نقل نشان می‌دهد که عوامل ایمنی در نظر گرفته نشده‌اند. در نتیجه در این بخش، مطالعات مربوط به ایمنی شبکه، مسئله طراحی شبکه و انگیزه مطالعه دنبال می‌شود که درباره آن توضیح داده شده است.

۲-۱- ایمنی شبکه

در این زمینه عمده مطالعات در خصوص ارزیابی و رتبه بندی شبکه‌ها از منظر ایمنی است. برای رتبه‌بندی شبکه از نظر ایمنی، مدل‌های پیش‌بینی تصادف استفاده می‌شوند (Jasiūnienė et al., 2020). فانچلو و همکاران (۲۰۲۰) مدلی را برای ارزیابی ایمنی در شبکه حمل و نقل شهری معرفی کرده است (Fancello et al., 2020). در یک مطالعه موردی، گومز و همکاران (۲۰۱۸) نیز ارزیابی یک شاخص عملکرد ایمنی شبکه را انجام دادند (Gomes et al., 2018). اوینگ و دامبو (۲۰۰۹) یک مطالعه جامع با استفاده از تحلیل رگرسیون برای بررسی تأثیر محیط شهری بر ایمنی حمل و نقل انجام دادند (Ewing and Dumbaugh, 2009). معین‌الدینی و اسدی (۱۳۹۳) ارزیابی جامعی از الگوی شبکه راه‌های شهری انجام دادند که همبستگی مثبت و معناداری را بین کاهش تعداد گره‌ها در منطقه، کاهش طول سرانه بزرگراه‌ها و افزایش طول سرانه راه‌های شهری با بهبود نتایج ایمنی نشان داد (Moeinaddini et al., 2014). بررسی تأثیر الگوهای شبکه بر شدت تصادفات مربوط به کاربران آسیب‌پذیر جاده نشان می‌دهد که الگوهای با دسترسی محدود، احتمال تصادفات کمتری را در مقایسه با الگوهای معمولی و سایر تغییرات نشان می‌دهند (Rifaat et al., 2011). مارشال و گاریک (۲۰۱۱) نشان دادند که افزایش تراکم شبکه جاده‌ای، به ویژه با افزودن تقاطع‌ها در طول یک مسیر، منجر به کاهش فراوانی تصادفات می‌شود (Marshall and Garrick, 2011). بررسی ادبیات مربوطه شکاف قابل توجهی را در کشف رابطه بین شاخص‌های ایمنی و مسئله طراحی شبکه نشان می‌دهد. بخش زیر مروری بر مطالعاتی است که به طور خاص بر روی NDP تمرکز دارند.

۲-۲- مسئله طراحی شبکه

مسئله طراحی شبکه متمرکز بر دستیابی به یک پیکربندی شبکه بهینه برای مدیریت موثر هزینه‌های مرتبط با زمان سفر است. تاکید عمده تحقیقات در این زمینه در توسعه و فرمول‌بندی الگوریتم‌های حل است. مطالعات مربوط به طراحی شبکه گسسته الگوریتم‌های مختلفی از جمله روش کلونی مورچه‌ها (Poorzahedy and Abulghasemi, 2005)، تکنیک‌های خطی سازی و تقریب (Wang et al., 2015)، برنامه ریزی اعداد صحیح مختلط خطی (Farvaresh and Sepehri, 2011)، مفهوم تابع پشتیبانی (Gao et al., 2005)، الگوریتم‌های ژنتیک (Drezner and Wesolowsky, 2003)، الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی (Poorzahedy and Rouhani, 2007)، تجزیه با شبه بهینه‌سازی (Solanki et al., 1998) و سایر رویکردهای مرتبط. مسئله طراحی شبکه پیوسته از طریق الگوریتم‌های مختلفی از جمله الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده (Friesz et al., 1992)، الگوریتم هوک جیوز (Abdulaal

and LeBlanc, 1979)، الگوریتم تخصیص بهینه تکراری (Allsop, 1974)، الگوریتم خطی اعداد صحیح مختلط مسیر پایه (Wang and Lo, 2010) و غیره پرداخته شده است. در مطالعات مربوط به طراحی شبکه مختلط، الگوریتم‌های مختلفی ارایه شده‌اند. از جمله: برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (Luathep et al., 2011) و الگوریتم‌های ژنتیک (Cantarella and Vitetta, 2006) و چندین الگوریتم دیگر. این رویکردها در پرداختن به چالش‌ها و پیچیدگی‌های مرتبط با مسائل طراحی شبکه‌های مختلط مؤثر بوده‌اند. بر اساس مطالعات ارائه شده و شکاف تحقیقاتی شناسایی شده، این مطالعه با هدف پرداختن به مسئله طراحی شبکه ایمن انجام شده است. با این رویکرد، مطالعه تلاش می‌کند تا به پرسش‌های کلیدی زیر رسیدگی کند.

-آیا ایمنی نقشی جدی در مسئله طراحی شبکه ایفا می‌کند؟

-پاسخ شبکه به شاخص‌های ایمنی چیست؟

-وزن اختصاص داده شده به اثرات ایمنی تا چه حد بر نتیجه مسئله تأثیر می‌گذارد؟

-شدت و نوع حوادث چگونه بر حل مسئله تأثیر می‌گذارد؟

۳- روش تحقیق

در این بخش، به ترتیب ساختار مسئله طراحی شبکه ایمن، توابع عملکرد ایمنی، فرمول‌بندی الگوریتم مسئله و راه‌حل دنبال می‌شود.

۳-۱- مسئله طراحی شبکه ایمن با هزینه‌های ترکیبی وزنی

مسئله طراحی شبکه گسسته، به دنبال یافتن بهینه‌ترین وضعیت تخصیص منابع محدود برای توسعه و بهبود شبکه با انتخاب لینک‌های منتخب از بین لینک‌های نامزد است. عموما این مسئله به صورت دو سطحی (رهبر-پیرو) دنبال می‌شود. در سطح بالا (سطح رهبر)، مسئله طراحی شبکه با انتخاب لینک‌های بهینه و در سطح پایین (سطح پیرو)، مسئله تخصیص ترافیک در شبکه حل می‌گردد. فرم مسئله دو سطحی در رابطه ۱ ارایه شده است. متغیرها و پارامترهای مسئله در جدول ۱ خلاصه شده است.

$$\begin{aligned} &\min_{x \in X, y \in Y} \quad F(x,y) \\ &\text{subject to: } G_i(x,y) \le 0 \text{ for } i \in \{1,2,\dots,I\} \\ &y \in argmin\left\{f(x,z): g_j(x,z) \le 0, j \in \{1,2,\dots,J\}\right\} \end{aligned} \qquad (۱)$$

فرم اصلی مورد استفاده در این تحقیق از چارچوب ارائه شده توسط پورزاهدی که در معادله ۲ نشان داده شده است، پیروی می‌کند.

$$\begin{aligned} &\underset{y}{Min} \sum_{i,j \in (A \cup A_y)} x_{ij}{}^* t_{ij}(x_{ij}^*) \\ &s.t.: y_{ij} = 0 \; or \; 1 \quad \forall (i,j) \in A_y \\ &\sum_{i,j \in A_y} c_{ij} y_{ij} \le B \end{aligned} \qquad (۲)$$

x_{ij}^* نشان دهنده جریان تعادل کاربر در شبکه است که با حل مسئله زیر در $N\,(V, A \cup A_y)$ به دست می‌آید. با توجه به بردار پروژه‌های y:

$$\begin{aligned} &\underset{x}{Min} \sum_{i,j \in (A \cup A_y)} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}\,(u)du \\ &s.t.: \sum_{P \in P_{ks}} x_P^{ks} = d^{ks}, \qquad \forall (k,s) \in P \\ &x_P^{ks} \ge 0, \qquad \forall p \in p_{ks}\,, \qquad \forall (k,s) \in P \\ &x_{ij} = \sum\sum x_P^{ks}.\,\delta_{ij,p}^{ks} \quad \forall (i,j) \in A_y \end{aligned} \qquad (۳)$$

مسئله سطح بالا شامل جستجوی لینک‌های بهینه در میان لینک‌های نامزد است. متغیر x_{ij}^{*} مورد استفاده در تابع سطح بالا با حل مسئله تخصیص سطح پایین به دست می‌آید. یکی از جنبه‌های قابل توجه تحقیقات قبلی نادیده گرفتن نگرانی‌های ایمنی است. از این رو، یکی از مراحل اولیه این مطالعه، طراحی فرم مسئله با ترکیب شاخص‌های ایمنی است. به نظر می‌رسد که یک تابع اضافی را می‌توان با به حداکثر رساندن مؤلفه ایمنی در تابع هدف مسئله سطح بالا (رهبر) گنجاند.

جدول ۱. پارامترها و متغیرهای مسئله

$N\,(V, A)$	شبکه N شامل مجموعه بردارهای گره (V) و لینک (A)
(k, s)	مبدا (k)–مقصد(s)، هر (k, s) عضو P ، P : مجموعه جفت‌های مبدا–مقصد
y_{ij}	متغیر تصمیم پروژه، که بسته به رد یا قبول لینک (i,j), (i,j) عضو A_y که مقادیر ۰ یا ۱ را می‌پذیرد.
y	بردار (y_{ij}) با ابعادی برابر با تعداد عناصر A_y
d^{ks}	تقاضا از k به s که (k, s) ϵP و ثابت فرض می‌شود.
x_{ij}	جریان لینک (i,j), $(i,j) \epsilon A$
x_p^{ks}	جریان مسیر از مبدا (k) به مقصد (s)
x	بردار (x_{ij}) با ابعادی برابر با تعداد عناصر $A \cup A_y$
$t_{ij}(x_{ij})$	تابع تاخیر لینک
B	سطح بودجه
c_{ij}	هزینه ساخت و توسعه لینک

۳-۲- توابع عملکرد ایمنی (SPF)

نکته قابل توجه، ورود شاخص‌های ایمنی به مسئله است که نمایش دقیق فرمول‌بندی شده آنها را نشان می‌دهد. به بیان دیگر، در مسائل طراحی شبکه سنتی، تمرکز بهینه سازی صرفاً بر به حداقل رساندن زمان سفر برای کاربران است. این مسئله با استفاده از معادله ٤ به عنوان مدلی که رابطه بین زمان سفر و جریان ترافیک را نشان می‌دهد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تعریف تابع ایمنی که مشابه تابع زمان سفر ارائه شده در رابطه ۵، مدل رابطه بین ایمنی (s_{ij}) و جریان ترافیک مورد نیاز است.

$$t_{ij} = f(x_{ij}) \qquad (٤)$$

$$s_{ij} = g(x_{ij}) \qquad (۵)$$

مدل پیش بینی فراوانی تصادفات بر اساس معادله ٦ است (Lyon et al., 2016). توابع هزینه تصادف در جدول ۳ ارائه شده است (Harmon et al., 2018).

$$Total\ crashes = years * lenght * exp^{a} * AADT^{b} \qquad (٦)$$

جدول ۲. پارامترهای مدل پیش‌بینی

b	A
0.84	-7.16

جدول ۳. توابع هزینه تصادفات

شاخص	کیفیت سطح شدت تصادفات	هزینه (دلار)
K	جراحت مهلک	1,587,000
A	جراحت مشکوک جدی	132,600
B	جراحت جزئی	48,700
C	آسیب احتمالی	34,100
O	بدون صدمه ظاهری	6,100
K/A/B/ C		90,500
K/A/B/C/O		31,200

۳-۳- فرمول بندی مسئله طراحی شبکه ایمن

تابع هدف مسئله سطح بالا که در مطالعه پایه به صورت بهینگی سیستم (SO) و با مجموع حاصلضرب نرخ جریان هر لینک در زمان سفر آن است به صورت رابطه ۷ تغییر می‌یابد. در مسئله سطح بالا، مسئله بهینگی سیستم با تبدیل زمان به هزینه پولی در طول یک سال تغییر می‌یابد. از طرفی هزینه تصادفات در طول یک سال نیز مطابق با مدل‌های توابع عملکرد ایمنی و توابع هزینه تصادفات توسعه می‌یابد. تابع مسئله سطح بالا به صورت رابطه ۷ است.

$$time\ cost = x_{ij}{}^{*} t_{ij}\left(x_{ij}^{*}\right) * (1\ year: 365 * 24) * (value\ of\ time)$$

$$crash\ cost = crash\ in\ one\ year * unit\ crash\ cost \qquad (۷)$$

$$\underset{y}{Min} \sum_{i,j \in (A \cup A_y)} [time\ cost + crash\ cost]$$

$$\underset{y}{Min} \sum_{i,j \in (A \cup A_y)} [x_{ij}{}^{*} t_{ij}\left(x_{ij}^{*}\right) * (1\ year: 365 * 24) * (value\ of\ time) + crash\ in\ one\ year * unit\ crash\ cost]$$

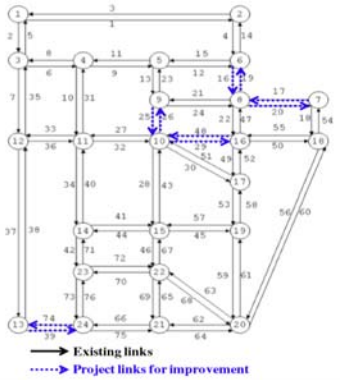
۳-٤-الگوریتم حل

این مطالعه از الگوریتم اکتشافی بازپخت شبیه سازی شده برای حل مسئله طراحی شبکه ایمن دو سطحی استفاده می‌کند. مسئله تخصیص که به عنوان مسئله سطح پایین عمل می‌کند، از طریق اجرای الگوریتم فرانک ولف پرداخته می‌شود. الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت نام خود را از تقلید آن از یک فرآیند خاص گرفته است و شباهت‌هایی با فرآیند آنیلینگ در حل مسئله از طریق بهینه‌سازی دارد. در طول این فرآیند، راه حل‌های مسئله به طور گسترده‌ای گرم می‌شوند که منجر به نوسانات قابل توجهی می‌شود. با گذشت زمان، دامنه این نوسانات به تدریج کاهش می‌یابد و راه‌حل‌ها را به راه‌حل بهینه نزدیک می‌کند. مقدمه اصلی الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت به کرک پاتریک و همکاران به سال ۱۹۸۳ نسبت داده شده است (Kirkpatrick et al., 1983). این فرآیند شامل تولید مکرر راه‌حل‌های همسایه و دنبال کردن انتخابی مسیرهای جستجو است که منجر به بهبود مقدار تابع هدف می‌شود. برای غلبه بر بهینه محلی، الگوریتم SA قابلیت پذیرش راه‌حل‌های کمتر از حد بهینه را معرفی می‌کند که با نزدیک‌تر شدن الگوریتم به تکمیل، احتمال پذیرش کاهش می‌یابد. در هر تکرار، تفاوت بین مقدار هدف راه‌حل فعلی که با $f(X)$ نشان داده می‌شود و مقدار هدف راه‌حل جدید که با $f(X')$ نشان داده می‌شود، به صورت $\Delta = f(X) - f(X')$ محاسبه می‌شود. اگر $\Delta \geq 0$ (برای یک مسئله کمینه سازی)، راه حل جدید X' بدون تردید پذیرفته می‌شود. با این

حال، اگر $\Delta < 0$، نشان دهنده راه حل بدتر است، راه حل جدید با احتمال $p = exp(-\Delta/T)$ پذیرفته می‌شود، که در آن T پارامتر دما مرتبط با وضعیت فعلی را نشان می‌دهد. این احتمال امکان پذیرش گاه به گاه راه حل‌های بدتر را فراهم می‌کند و فرار از بهینه محلی و کاوش در فضای راه حل را تسهیل می‌کند.

٤- مثال عددی و نتایج

یکی از مطالعات پایه در مسئله طراحی شبکه گسسته، مطالعه آقای لبلانک در سال ۱۹۷۵ است. در مطالعه لبلانک از شبکه سوفالز برای بررسی نتایج استفاده شده است. مسئله لبلانک به ارایه سناریوهای بهینه برای بهبود عملکرد شبکه از منظر رویکرد بهینگی سیستم (SO) می‌پردازد. شمای شبکه سوفالز در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات شبکه سوفالز در جدول ٤ آورده شده است. جدول ٤ ظرفیت و زمان سفر آزاد در لینک‌های شبکه سوفالز را ارایه نموده است. در جدول ٦ نیز ماتریس تقاضای مبدا-مقصد آورده شده است.



شکل ۱. شبکه سوفالز

جدول ٤. مشخصات شبکه سوفالز

از گره	به گره	ظرفیت	زمان سفر آزاد		از گره	به گره	ظرفیت	زمان سفر آزاد
1	2	25900	0.06		10	15	13512	0.06
1	3	23403	0.04		10	11	10000	0.05
2	1	25900	0.06		11	10	10000	0.05
2	6	4958	0.05		11	14	4876.51	0.04
3	1	23403	0.04		11	12	4908.83	0.06
3	4	17111	0.04		11	4	4908.83	0.06
3	12	23403	0.04		12	13	25900.2	0.03
4	3	17111	0.04		12	3	23403.47	0.04
4	5	17783	0.02		12	11	4908.83	0.06
4	11	4909	0.06		13	24	5091.26	0.04
5	4	17783	0.02		13	12	25900.2	0.03
5	6	4948	0.04		14	15	5127.53	0.05
5	9	10000	0.05		14	23	4924.79	0.04
6	2	4948	0.04		14	11	4876.51	0.04
6	5	4899	0.02		15	19	15650.8	0.04
6	8	4958	0.05		15	14	5127.53	0.05
7	8	7842	0.03		15	22	10315	0.04
7	18	23403	0.02		15	10	13512	0.06
8	6	4899	0.02		16	8	5045.82	0.05
8	7	7842	0.03		16	17	5229.91	0.02
8	16	5046	0.05		16	18	19679.9	0.03
9	8	5050	0.1		16	10	5133.5	0.05
9	10	7842	0.03		17	16	5229.91	0.02
9	17	10000	0.05		17	19	4823.95	0.02
10	9	5050	0.1		17	10	4993.51	0.08
10	11	13916	0.03		18	7	23403.47	0.02
10	16	4994	0.08		18	16	19679.9	0.03
10	17	5133	0.05		18	20	23403.47	0.04

جدول ۵. مشخصات شبکه سوفالز

شماره پروژه	هزینه	لینک	ظرفیت	زمان سفر آزاد
1	650,000	(6,8),(8,6)	5944	0.013
2	625,000	(9,10),(10,9)	15959	0.016
3	850,000	(13,24),(24,13)	5925	0.022
4	1,200,000	(10,16),(16,10)	5946	0.027
5	1,000,000	(7,8),(8,7)	8923	0.015

جدول ٦. ماتریس تقاضا مبدا-مقصد

Demand (1000 vehicles per day)																									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
1	0	1	1	5	2	3	5	8	5	13	5	2	5	3	5	5	4	1	3	3	1	4	3	1
2	1	0	1	2	1	4	2	4	2	6	2	1	3	1	1	4	2	0	1	1	0	1	0	0
3	1	1	0	2	1	3	1	2	1	3	3	2	1	1	1	2	1	0	0	0	0	1	1	0
4	5	2	2	0	5	4	4	7	7	12	14	6	6	5	5	8	5	1	2	3	2	4	5	2
5	2	1	1	5	0	2	2	5	8	10	5	2	2	1	2	5	2	0	1	1	1	2	1	0
6	3	4	3	4	2	0	4	8	4	8	4	2	2	1	2	9	5	1	2	3	1	2	1	1
7	5	2	1	4	2	4	0	10	6	19	5	7	4	2	5	14	10	2	4	5	2	5	2	1
8	8	4	2	7	5	8	10	0	8	16	8	6	6	4	6	22	14	3	7	9	4	5	3	2
9	5	2	1	7	8	4	6	8	0	28	14	6	6	6	9	14	9	2	4	6	3	7	5	2
10	13	6	3	12	10	8	19	16	28	0	40	20	19	21	40	44	39	7	18	25	12	26	18	8
11	5	2	3	15	5	4	5	8	14	39	0	14	10	16	14	14	10	1	4	6	4	11	13	6
12	2	1	2	6	2	2	7	6	6	20	14	0	13	7	7	7	6	2	3	4	3	7	7	5
13	5	3	1	6	2	2	4	6	6	19	10	13	0	6	7	6	5	1	3	6	6	13	8	8
14	3	1	1	5	1	1	2	4	6	21	16	7	6	0	13	7	7	1	3	5	4	12	11	4
15	5	1	1	5	2	2	5	6	10	40	14	7	7	13	0	12	15	2	8	11	8	26	10	4
16	5	4	2	8	5	9	14	22	14	44	14	7	6	7	12	0	28	5	13	16	6	12	5	3
17	4	2	1	5	2	5	10	14	9	39	10	6	5	7	15	28	0	6	17	17	6	17	6	3
18	1	0	0	1	0	1	2	3	2	7	2	2	1	1	2	5	6	0	3	4	1	3	1	0
19	3	1	0	2	1	2	4	7	4	18	4	3	3	3	8	13	17	3	0	12	4	12	3	1
20	3	1	0	3	1	3	5	9	6	25	6	5	6	5	11	16	17	4	12	0	12	24	7	4
21	1	0	0	2	1	1	2	4	3	12	4	3	6	4	8	6	6	1	4	12	0	18	7	5
22	4	1	1	4	2	2	5	5	7	26	11	7	13	12	26	12	17	3	12	24	18	0	21	11
23	3	0	1	5	1	1	2	3	5	18	13	7	8	11	10	5	6	1	3	7	7	21	0	7
24	1	0	0	2	0	1	1	2	2	8	6	5	7	4	4	3	3	0	1	4	5	11	7	0

جدول ۷. هزینه تصادفات و هزینه زمان در یک سال

سناریو	فراوانی تصادفات در یک سال	وسیله.ساعت	ارزش زمانی (دلار بر ساعت)	هزینه واحد تصادفات به دلار (K/A/B/C/O)	هزینه زمان در یک سال (10^6)	هزینه تصادفات در یک سال (10^6)	مجموع هزینه
00000	4,261	82527.66	0.33	31200	238.6	132.9	371.5
00001	4,232	80568.14	0.33	31200	232.9	132.0	365.0
00010	4,150	78640.28	0.33	31200	227.3	129.5	356.8
00011	4,115	76853.01	0.33	31200	222.2	128.4	350.6
00100	4,188	79043.81	0.33	31200	228.5	130.7	359.2
00101	4,153	77879.42	0.33	31200	225.1	129.6	354.7
00110	4,085	75100.28	0.33	31200	217.1	127.5	344.6
00111	4,046	74129.59	0.33	31200	214.3	126.2	340.5
01000	4,179	80291.88	0.33	31200	232.1	130.4	362.5
01001	4,137	78659.96	0.33	31200	227.4	129.1	356.5
01010	4,067	75361.33	0.33	31200	217.9	126.9	344.8
01011	4,038	75142.44	0.33	31200	217.2	126.0	343.2

ادامه جدول ۷. هزینه تصادفات و هزینه زمان در یک سال

سناریو	فراوانی تصادفات در یک سال	وسیله.ساعت	ارزش زمانی (دلار بر ساعت)	هزینه واحد تصادفات به دلار (K/A/B/C/O)	هزینه زمان در یک سال (۱۰^{۶})	هزینه تصادفات در یک سال (۱۰^{۶})	مجموع هزینه
01100	4,107	76996.23	0.33	31200	222.6	128.2	350.7
01101	4,075	75313.6	0.33	31200	217.7	127.1	344.8
01110	4,020	73185.88	0.33	31200	211.6	125.4	337.0
01111	3,981	71670.73	0.33	31200	207.2	124.2	331.4
10000	4,242	78061.96	0.33	31200	225.7	132.3	358.0
10001	4,196	75541.62	0.33	31200	218.4	130.9	349.3
10010	4,125	74591.16	0.33	31200	215.6	128.7	344.3
10011	4,094	72932.79	0.33	31200	210.8	127.7	338.6
10100	4,180	74746.57	0.33	31200	216.1	130.4	346.5
10101	4,135	73202.08	0.33	31200	211.6	129.0	340.6
10110	4,075	71088.42	0.33	31200	205.5	127.1	332.6
10111	4,040	69771.28	0.33	31200	201.7	126.0	327.7
11000	4,174	76219.61	0.33	31200	220.3	130.2	350.6
11001	4,126	73451.43	0.33	31200	212.3	128.7	341.1
11010	4,051	72585.37	0.33	31200	209.8	126.4	336.2
11011	4,010	70581.12	0.33	31200	204.0	125.1	329.1
11100	4,119	72988.73	0.33	31200	211.0	128.5	339.5
11101	4,071	70379.05	0.33	31200	203.5	127.0	330.5
11110	3,995	69593.08	0.33	31200	201.2	124.7	325.8
11111	3,957	67974.91	0.33	31200	196.5	123.5	320.0

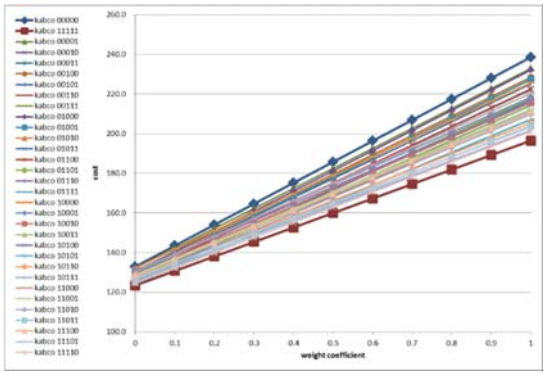
هزینه‌های ناشی از زمان سفر و نیز تصادفات در جدول ۷ ارایه شده است. مقدار هزینه زمان سفر در شبکه در حالتی هیچ یک از پروژها اجرا نشوند برابر با ۲۳۸,٦ میلیون دلار در سال است. چناچه هر پنج پروژه نامزد اجرا شوند این هزینه برابر با ۱۹٦,۵ میلیون دلار در سال است. هزینه‌های ناشی از تصادفات در حالت عدم اجرا و نیز اجرای همه گزینه‌ها به ترتیب برابر با ۱۳۲,۹ و ۱۲۳,۵ میلیون دلار در سال است. در حالت در نظر گرفتن جمع ساده هزینه‌ها این مقادیر به ترتیب برابر با ۳۷۱,۵ و ۳۲۰ میلیون دلار در سال است. به عبارتی می‌توان گفت درصد کاهش هزینه‌های زمان سفر در حالتی که همه ۵ پروژه نامزد اجرا شوند (نسبت به حالتی که هیچ پروژه‌ای اجرا نشود) برابر با ۱۷,٦ درصد است. از طرفی این درصد کاهش برای هزینه‌های مربوط به تصادفات در طول یک سال برابر با ۷,۱ درصد است. چناچه جمع ساده دو هزینه ملاک قرار گیرد این کاهش هزینه برابر با ۱۳,۹ درصد است. نکته قابل توجه دیگر این است که جمع ساده هزینه‌های زمان سفر و تصادفات چندان کار دقیقی نیست. به عبارتی در رویکرد ترکیبی مسئله سطح بالا (سطح رهبر)، اولویت‌دهی به هر یک از مفاهیم هزینه‌های تصادفات و زمان سفر ضروری است و این ملاحظه با وزن‌دار کردن دو هزینه مورد نظر دنبال شده است و تحلیل سناریوها بر این اساس نیز در جدول ۸ آورده شده است. رابطه وزنی دو شاخص مطابق رابطه ۸ است. حالت ضریب وزنی (α) برابر با ۱ بیانگر رویکرد مبتنی بر زمان سفر (مسئله لبلانک) است و حالت ضریب وزنی برابر با صفر بیانگر رویکرد هزینه‌های تصادفات است.

$$Total\ cost = \alpha * (Travel\ time\ cost) + (1-\alpha) * (Crash\ cost) \quad (۸)$$

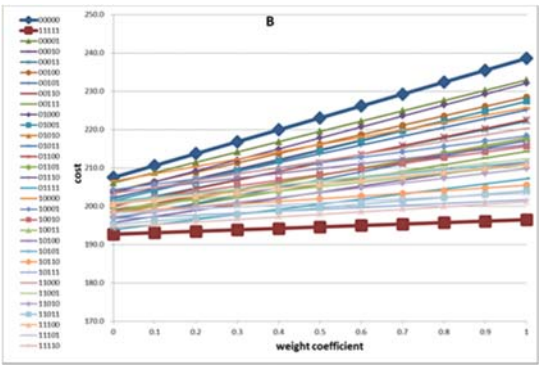
جدول ۸. تریدآف بین هزینه‌های تصادفات و زمان سفر

سناریو	A*T + (1-A)*C										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
00000	132.9	143.5	154.1	164.6	175.2	185.8	196.3	206.9	217.4	228.0	238.6
00001	132.0	142.1	152.2	162.3	172.4	182.5	192.6	202.6	212.7	222.8	232.9
00010	129.5	139.3	149.0	158.8	168.6	178.4	188.2	198.0	207.8	217.5	227.3
00011	128.4	137.8	147.1	156.5	165.9	175.3	184.7	194.0	203.4	212.8	222.2
00100	130.7	140.4	150.2	160.0	169.8	179.6	189.4	199.1	208.9	218.7	228.5
00101	129.6	139.1	148.7	158.2	167.8	177.4	186.9	196.5	206.0	215.6	225.1
00110	127.5	136.4	145.4	154.3	163.3	172.3	181.2	190.2	199.2	208.1	217.1
00111	126.2	135.0	143.8	152.7	161.5	170.3	179.1	187.9	196.7	205.5	214.3
01000	130.4	140.6	150.7	160.9	171.1	181.2	191.4	201.6	211.8	221.9	232.1
01001	129.1	138.9	148.7	158.6	168.4	178.2	188.1	197.9	207.7	217.6	227.4
01010	126.9	136.0	145.1	154.2	163.3	172.4	181.5	190.6	199.7	208.8	217.9
01011	126.0	135.1	144.2	153.3	162.5	171.6	180.7	189.8	199.0	208.1	217.2
01100	128.2	137.6	147.0	156.5	165.9	175.4	184.8	194.3	203.7	213.1	222.6
01101	127.1	136.2	145.2	154.3	163.4	172.4	181.5	190.5	199.6	208.7	217.7
01110	125.4	134.0	142.7	151.3	159.9	168.5	177.1	185.7	194.3	203.0	211.6
01111	124.2	132.5	140.8	149.1	157.4	165.7	174.0	182.3	190.6	198.9	207.2
10000	132.3	141.7	151.0	160.3	169.7	179.0	188.3	197.7	207.0	216.3	225.7
10001	130.9	139.7	148.4	157.1	165.9	174.6	183.4	192.1	200.9	209.6	218.4
10010	128.7	137.4	146.1	154.8	163.5	172.2	180.9	189.5	198.2	206.9	215.6
10011	127.7	136.0	144.3	152.7	161.0	169.3	177.6	185.9	194.2	202.5	210.8
10100	130.4	139.0	147.6	156.1	164.7	173.3	181.8	190.4	198.9	207.5	216.1
10101	129.0	137.3	145.5	153.8	162.0	170.3	178.6	186.8	195.1	203.4	211.6
10110	127.1	135.0	142.8	150.6	158.5	166.3	174.2	182.0	189.8	197.7	205.5
10111	126.0	133.6	141.2	148.7	156.3	163.9	171.4	179.0	186.6	194.1	201.7
11000	130.2	139.2	148.2	157.3	166.3	175.3	184.3	193.3	202.3	211.3	220.3
11001	128.7	137.1	145.5	153.8	162.2	170.5	178.9	187.3	195.6	204.0	212.3
11010	126.4	134.7	143.1	151.4	159.8	168.1	176.4	184.8	193.1	201.5	209.8
11011	125.1	133.0	140.9	148.8	156.7	164.6	172.5	180.4	188.2	196.1	204.0
11100	128.5	136.7	145.0	153.2	161.5	169.7	178.0	186.2	194.5	202.7	211.0
11101	127.0	134.7	142.3	150.0	157.6	165.2	172.9	180.5	188.2	195.8	203.5
11110	124.7	132.3	140.0	147.6	155.3	162.9	170.6	178.2	185.9	193.5	201.2
11111	123.5	130.8	138.1	145.4	152.7	160.0	167.3	174.6	181.9	189.2	196.5

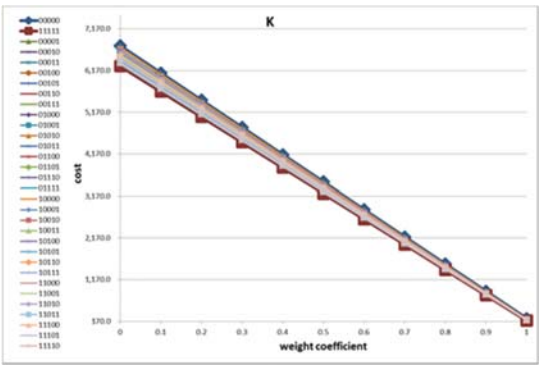
ترکیب وزنی هزینه‌های مربوط به زمان سفر و تصادفات نیز در جدول ۸ ارایه شده است. ضریب وزنی صفر به معنای رویکرد مطلق مبتنی بر تصادفات و ضریب وزنی ۱ نیز به معنای رویکرد مطلق مبتنی بر زمان سفر است. در مثال مسئله با افزایش ضریب وزنی، مقدار هزینه کلی افزایش می‌یابد چرا که در این مثال مقدار هزینه ناشی از زمان سفر نسبت به هزینه‌های تصادفات بیشتر است. ارتباط بین ضرایب وزنی مختلف و هزینه شبکه (هزینه‌های تصادفات و هزینه زمان سفر) در شکل ۲ آورده شده است. از روی نمودار واضح است که مقدار مجموع وزنی هزینه شبکه در حالت اجرای همه پروژه‌های بهبود نسبت به حالتی که هیچ یک از پروژه‌ها اجرا نمی‌شوند، کمتر شده است.



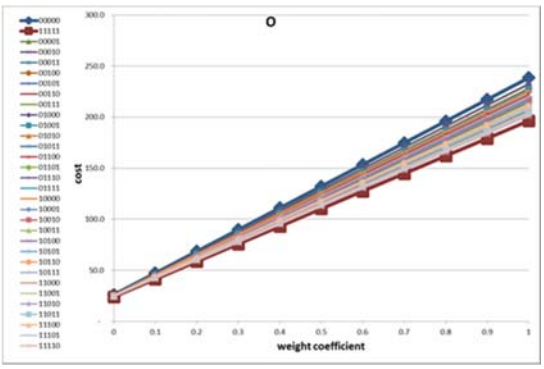
شکل ۲. ارتباط بین ضرایب وزنی و هزینه موجود در شبکه



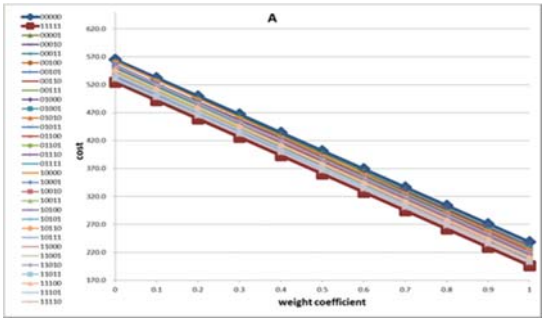
شکل ۳. ارتباط بین ضرایب وزنی و هزینه موجود در شبکه در حالت شدت تصادفات جراحت جزیی (B)



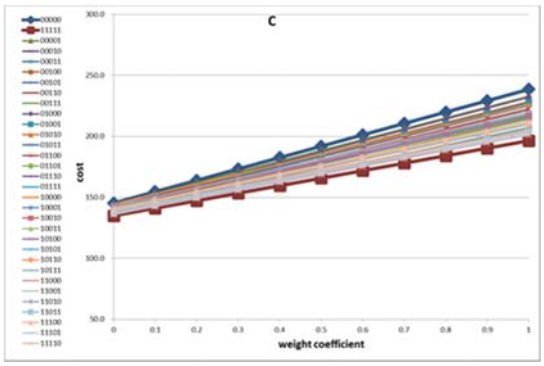
شکل ٤. ارتباط بین ضرایب وزنی و هزینه موجود در شبکه در حالت شدت تصادفات جراحت مهلک (K)



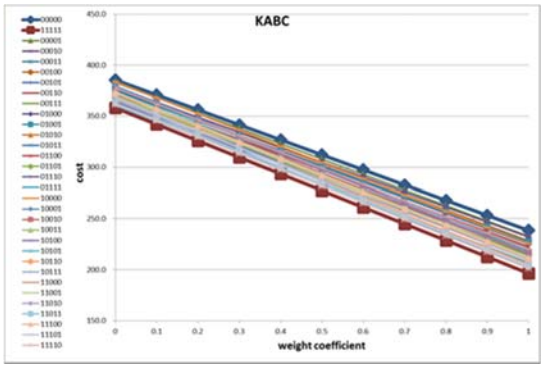
شکل ٥. ارتباط بین ضرایب وزنی و هزینه موجود در شبکه در حالت شدت تصادفات بدون صدمه (O)



شکل ٦. ارتباط بین ضرایب وزنی و هزینه موجود در شبکه در حالت شدت تصادفات جراحات مشکوک (A)



شکل ۷. ارتباط بین ضرایب وزنی و هزینه موجود در شبکه در حالت شدت تصادفات آسیب احتمالی (C)



شکل ۸ ارتباط بین ضرایب وزنی و هزینه موجود در شبکه در حالت شدت تصادفات KABC

۵- نتیجه‌گیری

با افزایش ضریب وزنی، لزوماً هزینه‌ها افزایشی نیست. بلکه بسته به نوع تصادفات و شدت آن‌ها این روند تغییر می‌یابد. در حالت تصادفات شدت O، با افزایش ضریب وزنی، مقدار هزینه کل افزایش می‌یابد و مقدار هزینه‌های مربوط به عدم اجرای پروژه‌ها بیشتر است. این در حالی است که در حالت شدت تصادفات KABC، با افزایش ضریب وزنی مقدار هزینه مجموع کاهش می‌یابد. دلیل آن این است که در این حالت و در مثال مسئله لبلانک هزینه‌های زمان سفر نسبت به هزینه‌های ایمنی کمتر است و با افزایش وزن هزینه‌های زمان سفر، هزینه مجموع هم کاهش می‌یابد. در حالت‌های A و K هم با توجه به غلبه هزینه‌های ایمنی در مثال شبکه سوفالز در مسئله لبلانک، با افزایش ضریب، مقدار هزینه مجموع کاهش می‌یابد. از طرفی در حالت شدت تصادفات B و C هم مشاهده می‌شود که افزایش ضریب وزنی، نمودار حالت صعودی دارد و این ناشی از غلبه هزینه‌های زمان سفر بر هزینه‌های ایمنی است. برای بررسی تاثیر ورود ایمنی، ابتدا مسئله سطح بالا صرفاً بر اساس ایمنی و شاخص تصادفات کل (K/A/B/C/O) حل شد. نتیجه این حالت برابر با سناریو ۰۱۱۱۰ است. بنابراین مشاهده می‌شود که با تغییر مفهوم مسئله سطح بالا، نتایج مسئله لبلانک تغییر می‌کند. به عبارتی این مسئله موید این است که هزینه‌ها صرفا هزینه زمان سفر نیست بلکه با تعریف و ورود هزینه‌های دیگر از جمله هزینه تصادفات می‌توان به سمت تکمیل و جامع نمودن مسئله حرکت نمود. در مرحله بعدی برای بررسی تاثیر ایمنی، در مسئله سطح بالا از مفهوم جمع ساده هزینه‌های ایمنی و زمان سفر استفاده شد. با تبدیل نمودن هزینه‌های تصادفات و زمان سفر به هزینه‌های دلار در طول یک سال، دو هزینه با صورت جمع گردید و با این مفهوم مسئله حل شد. نتیجه حل مسئله در جدول و با عنوان جمع هزینه‌ها نشان داده شده است. در این وضعیت، سناریوهای بهینه در انواع مختلف شدت تصادفات تغییر می‌کند. برای نوع تصادفات O، K/A/B/C/O، C ،B ،C /K/A/B سناریو بهینه برابر با ۱۰۱۱۰ یا همان سناریو بهنیه مسئله لبلانک است و برای

نوع تصادف A و K سناریو بهینه برابر با ۰۱۱۱۰ است. نتایج بیان می‌دارد که ایمنی نقش قابل توجهی بر مسئله طراحی شبکه دارد. با اضافه شدن مفهوم ایمنی به مسئله طراحی شبکه، جواب مسئله تغییر می‌یابد. با توجه به بررسی این موضوع در شبکه سوفالز و مسئله لبلانک، جواب مسئله دیگر ۱۰۱۱۰ نیست. حالتی که صرفاً هزینه تصادفات معیار قرار گیرد، جواب مسئله برابر با ۰۱۱۱۰ است. در حالتی که هزینه‌های مربوط به تلفات زمان سفر و تصادفات جمع شود، جواب مسئله برابر با ۱۰۱۱۰ است. علت این موضوع که در حالت مجموع ساده هزینه‌ها جواب مسئله تغییر نمی‌کند، غلبه هزینه‌های زمان سفر در مثال است. برای تدقیق این موضوع از حالت جمع ساده هزینه‌ها به سمت جمع وزنی هزینه‌ها حرکت شد. نکته جالب توجه این است که در وزن‌های مختلف مقدار جواب مسئله متغیر است. از طرفی نتایج مسئله نشان می‌دهد که نوع و شدت تصادفات نیز بر جواب مسئله اثرگذار است. نتایج نشان می‌دهند که ورود مفهوم ایمنی در مسئله طراحی شبکه، جای کار بیشتری دارد و بیانگر این است که دو مولفه شاخص ایمنی (شاخص‌سازی، نوع و شدت شاخص) و وزن و اهمیت شاخص دارای اثری جدی در جواب مسئله است. بنابراین در حالات، مثال‌ها و کاربردهای مختلف، تصمیم‌گیر در طراحی شبکه می‌تواند در یک تریدآف دقیق بین ایمنی و زمان سفر، بهترین وضعیت را برای شبکه طراحی نماید.

٦- مراجع

-سازمان پزشکی قانونی (۱٤۰۱). مقایسه آمار متوفیات حوادث رانندگی ترافیکی سال ۱۳۹۹ و ۱٤۰۰.

-Abdulaal, M., & LeBlanc, L. J. (1979). Continuous equilibrium network design models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 13(1), 19-32.

-Allsop, R. E. (1974, August). Some possibilities for using traffic control to influence trip distribution and route choice. *In Transportation and Traffic Theory*, proceedings (Vol. 6).

-Behbahani, H., Nazari, S., Kang, M. J., & Litman, T. (2019). A conceptual framework to formulate transportation network design problem considering social equity criteria. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 125, 171-183.

-Caggiani, L., Camporeale, R., & Ottomanelli, M. (2017). Facing equity in transportation Network Design Problem: A flexible constraints based model. *Transport Policy*, 55, 9-17.

-Caggiani, L., Camporeale, R., Binetti, M., & Ottomanelli, M. (2017). A road network design model considering horizontal and vertical equity: Evidences from an empirical study. Case studies on transport policy, 5(2), 392-399.

-Cantarella, G. E., & Vitetta, A. (2006). The multi-criteria road network design problem in an urban area. *Transportation*, 33(6), 567-588.

-Dehnavi, H. K., Rezvan, M. T., Shirmohammadli, A., & Vallée, D. (2013). A solution for urban road selection and construction problem using simulation and goal programming—case study of the city of Isfahan. *Transport Policy*, *29*, 46-53.

-Drezner, Z., & Wesolowsky, G. O. (2003). Network design: selection and design of links and facility location. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(3), 241-256.

-Ewing, R., & Dumbaugh, E. (2009). The built environment and traffic safety: a review of empirical evidence. *Journal of Planning Literature*, 23(4), 347-367.

-Fancello, G., Carta, M., & Serra, P. (2020). Data Envelopment Analysis for the assessment of road safety in urban road networks: A comparative study using CCR and BCC models, Case Studies on Transport Policy, *8*(3), 736-744.

-Farahani, R. Z., Miandoabchi, E., Szeto, W. Y., & Rashidi, H. (2013). A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 281-302.

-Farvaresh, H., & Sepehri, M. M. (2011). A single-level mixed integer linear formulation for a bi-level discrete network design problem. Transportation Research Part E. *Logistics and Transportation Review*, 47(5), 623-640.

-Friesz, T. L., Cho, H. J., Mehta, N. J., Tobin, R. L., & Anandalingam, G. (1992). A simulated annealing approach to the network design problem with variational inequality constraints. *Transportation Science*, 26(1), 18-26.

-Gao, Z., Wu, J., & Sun, H. (2005). Solution algorithm for the bi-level discrete network

-Najmi, A., Waller, T., & Rashidi, T. H. (2023). Equity in network design and pricing: A discretely-constrained MPEC problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 176, 103800.
-Poorzahedy, H., & Abulghasemi, F. (2005). Application of ant system to network design problem. *Transportation,* 32(3), 251-273.
-Poorzahedy, H., & Rouhani, O. M. (2007). Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 578-596.
-Rifaat, S. M., Tay, R., & De Barros, A. (2011). Effect of street pattern on the severity of crashes involving vulnerable road users. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 276-283.
-Solanki, R. S., Gorti, J. K., & Southworth, F. (1998). Using decomposition in large-scale highway network design with a quasi-optimization heuristic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(2), 127-140.
-Wang, D. Z., & Lo, H. K. (2010). Global optimum of the linearized network design problem with equilibrium flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(4), 482-492.
-Wang, D. Z., Liu, H., & Szeto, W. Y. (2015). A novel discrete network design problem formulation and its global optimization solution algorithm. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 79, 213-230.
-Wang, X., Jin, Y., Abdel-Aty, M., Tremont, P. J., & Chen, X. (2012). Macrolevel model development for safety assessment of road network structures. *Transportation Research Record,* 2280(1), 100-109.
-Who (2021). Road traffic injuries. who.int. https://www.who.int/news-room/fact sheets/detail/road-traffic-injuries.
design problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(6), 479-495.
-Gomes, S. V., Cardoso, J. L., & Azevedo, C. L. (2018). Portuguese mainland road network safety performance indicator. Case Studies on Transport Policy, *6*(3), 416-422.
-Harmon, T., Bahar, G. B., & Gross, F. B. (2018). Crash costs for highway safety analysis (No. FHWA-SA-17-071). United States. *Federal Highway Administration.* Office of Safety.
-Jasiūnienė, V., Ratkevičiūtė, K., & Peltola, H. (2020). Road Network Safety Ranking Using Accident Prediction Models. In Vision Zero for Sustainable Road Safety in Baltic Sea Region: Proceedings of the International Conference Vision Zero for Sustainable Road Safety in Baltic Sea Region. 5–6 December 2018, Vilnius, Lithuania, *Springer International Publishing*. 166-176.
-Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science,* 220(4598), 671-680.
-Luathep, P., Sumalee, A., Lam, W. H., Li, Z. C., & Lo, H. K. (2011). Global optimization method for mixed transportation network design problem: a mixed-integer linear programming approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(5), 808-827.
-Lyon, C., Persaud, B. N., & Gross, F. B. (2016). The Calibrator-An SPF Calibration and Assessment Tool User Guide (No. FHWA-SA-17-016). United States. *Federal Highway Administration*. Office of Safety.
-Marshall, W. E., & Garrick, N. W. (2011). Does street network design affect traffic safety? *Accident Analysis & Prevention*, 43(3), 769-781.
-Moeinaddini, M., Asadi-Shekari, Z., & Shah, M. Z. (2014). The relationship between urban street networks and the number of transport fatalities at the city level. *Safety Science*, 62, 114-120.

Safety-Oriented Development of Discrete Network Design Problem Considering Accident Index

Mehrdad Asgari, Ph.D., Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Amin Mirza Boroujerdian, Associate Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

E-mail: boroujerdian@modares.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT
The network design problem, functioning as a decision-making framework, embodies a policy-based orientation. This problem finds its conceptual footing in the realm of cost optimization, with a key emphasis on the travel time-related expenditures. However, the scope of costs in the network design problem extends beyond travel time. This study undertakes a meticulous exploration of the ancillary costs stemming from safety shortcomings and accidents and introduces the novel concept of the Safe Network Design Problem (SNDP). The investigation of this issue was carried out using the Sioux Falls network as a case study in LeBlanc's model, shedding light on the optimal network improvement strategy. The LeBlanc problem, comprising a selection among five projects within a budget constraint, resulted in the optimal scenario of 10110, indicating the execution of the first, third, and fourth projects. The introduction of safety as a key factor in the problem, particularly in the context of LeBlanc's example, yields intriguing results. In this scenario, the solution shifts to 01110. The combined approach that encompasses travel time costs and accidents, coupled with a comprehensive sensitivity analysis that accounts for accident severity and weighting, engenders a paradigm shift in the solution to the problem.

Keywords: Transportation Safety, Network Design, Safety Performance Function