فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و پنجم، شماره ۱۰۱، تابستان ۱۴۰۴، ص. ۳۴-۲۹

بررسی تأثیر ایجاد میدان در تقاطعات در شبکه راه‌های شهری

مهرداد عسگری، دانشجو دکتری مهندسی راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

امین میرزا بروجردیان (مسئول مکاتبات)، دانشیار گروه مهندسی راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: Boroujerdian@modares.ac.ir

چکیده

شبکه راه‌های شهری با هدف کاهش زمان سفر کاربران طراحی می‌شود. در کنار این هدف لازم است تا با توجه به فراوانی قابل‌توجه وقوع تصادفات در راه‌ها، ایمنی کاربران نیز افزایش یابد. بررسی مسائل کلاسیک طراحی شبکه نشان می‌دهد در این مسائل تمرکز بر توسعه الگوریتم‌های حل است و شاخص‌های ایمنی چندان موردتوجه قرار نگرفته است. در مطالعه حاضر بررسی الگوی بهینه و ایمن شبکه راه‌های شهری (کدام لینک در شبکه توسعه یابد) با تمرکز بر ایجاد میادین در نودهای شبکه دنبال می‌شود. برای بررسی این موضوع از یک مدل دوسطحی بهینه‌سازی که در سطح بالا طراحی شبکه و در سطح پایین مسئله تخصیص حل می‌شود استفاده شده است. داده‌های استفاده‌شده در مطالعه مربوط به شبکه مطالعه موردی سوفالز است. در این مطالعه به این موضوع پرداخته می‌شود که تغییر وضعیت تقاطعات در شبکه چه تأثیری بر پاسخ بهینه و ایمن شبکه در انتخاب لینک‌های قابل توجیه دارد. نتایج مطالعه نشان می دهد که در حالت کلی تبدیل تقاطعات به میدان در محل نودها، باعث افزایش کلی ایمنی در شبکه می‌شود. از طرفی بر اساس نتایج می‌توان گفت که افزایش تعداد پروژه‌های ایجاد میدان دارای یک همبستگی مستقیم با افزایش ایمنی در شبکه است. درحالی‌که افزایش تعداد پروژه‌های توسعه لینک به‌تنهایی لزوماً باعث بهبود وضعیت کلی شبکه نمی‌شود. این مطالعه می‌تواند یک رویکرد جدید در توسعه شهرهای جدید و نیز اصلاح شبکه‌های موجود ارائه دهد. در چنین شرایطی می‌توان یک چهارچوب تصمیم‌یاری هوشمندی در نظر گرفت که نه‌تنها کاهش زمان سفر کاربران را توجه دارد بلکه ایمنی نیز اولویت یافته است.

واژه‌های کلیدی: مهندسی ترافیک، حمل‌ونقل، طراحی شبکه، میدان

۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

راه‌های درون‌شهری به‌عنوان اجزا یک شبکه، وظیفه ارائه تسهیلات به کاربران را دارند. طراحی شبکه راه‌های درون‌شهری همواره به‌عنوان یک مسئله قابل‌توجه در مطالعات پژوهشگران حوزه مهندسی راه و حمل‌ونقل دنبال شده است. طراحی این شبکه باید به‌گونه‌ای باشد تا کاربران راه بالاترین سطح رضایت را از خدمات موجود داشته باشند. تکیه اصلی مسائل طراحی بر کاهش زمان سفر طی شده برای کاربران است. این در حالی است که کمتر به مسئله ایمنی کاربران توجه شده است. تلفات سالانه ۱/۳ میلیون نفر در تصادفات جاده‌ای در جهان، بیانگر سطح اهمت مسئله ایمنی راه‌ها است. علاوه بر این، پیامدهای اقتصادی تصادفات جاده‌ای تا ۳ درصد از تولید ناخالص داخلی در بسیاری از کشورها را شامل می‌شود. با توجه به این نگرانی‌های عمیق، کانون توجه باید به‌طورجدی بر ایمنی حمل‌ونقل و طراحی شبکه ایمن متمرکز شود. با رویکرد کلان، مطالعات عمدتاً بر جنبه‌های مختلف ازجمله ویژگی‌های اجتماعی–اقتصادی و جمعیتی، الگوهای کاربری زمین، تولید و توزیع سفر و ویژگی‌های شبکه‌های جاده‌ای متمرکز شده‌اند. در این سطح، یک سیاست مهم در برنامه‌ریزی شبکه، تخصیص منابع برای افزایش ظرفیت جاده است که به‌عنوان مسئله طراحی شبکه (NDP)[1] 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. در این زمینه، تمرکز مطالعات بر بررسی زمان سفر و هزینه‌های آن است درحالی‌که جنبه ایمنی کمتر موردتوجه قرار گرفته است؛ بنابراین، هدف از این مطالعه پرداختن به مسئله طراحی شبکه راه‌ها با در نظر گرفتن عوامل ایمنی با رویکرد تبدیل تقاطعات به میدان در شبکه به‌عنوان یک مطالعه موردی است. در مطالعه حاضر، مسائل طراحی شبکه توسعه داده می‌شود و با استفاده از توابع عملکرد ایمنی این توسعه منجر به مفهوم جدید مسئله طراحی شبکه ایمن (SNDP) می‌شود. ادبیات نشان می‌دهد که مفهوم SNDP دارای یک نوآوری در حوزه طراحی شبکه است. البته به‌طور مشابه، ورود شاخص‌هایی مثل شاخص برابری (equity) به‌عنوان یک تلاش موازی در تکامل مفهوم NDP بوده است. لذا می‌توان گفت که این مطالعه به دنبال ورود شاخص ایمنی در مسئله کلاسیک طراحی شبکه با تمرکز بر ایمنی نودها و با تبدیل تقاطعات به میدان است.

۲. روش پژوهش

برای بررسی تأثیر توابع عملکرد ایمنی در طراحی شبکه، ابتدا فرمول‌بندی مسئله طراحی شبکه کلاسیک ارائه می‌شود. پس‌ازآن، توابع عملکرد ایمنی متناسب با مسئله انتخاب می‌گردد. در ادامه فرمول‌بندی مسئله طراحی شبکه ایمن ارائه می‌شود و درنهایت الگوریتم حل مسئله توضیح داده می‌شود. در این بخش ابتدا طراحی فرمول‌بندی مسئله دنبال می‌شود و در ادامه با ارائه توابع مناسب عملکرد ایمنی، مسئله فرمول‌بندی می‌گردد.

رابطه ۱ فرمول‌بندی دوسطحی مسئله را نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز پارامترها و متغیرها را ارائه کرده است.

$$\min_{m \in M, n \in N} G(m,n) \quad (۱)$$

$$\text{subject to: } F_i(m,n) \le 0 \text{ for i} \in \{1,2,...,I\} \quad (۲)$$

$$y \in \text{argmin}\{g(x,z) : f_j(x,z) \le 0, j \in \{1,2,...,J\}\} \quad (۳)$$

رابطه ۴، نشان می‌دهد که زمان سفر تابعی از جریان ترافیک است. این مدل، پایه حل مسئله سطح پایین یا همان مسئله تخصیص است. برای مدل ایمنی نیز باید رابطه‌ای مشابه با آن مطابق رابطه ۵ موجود باشد.

$$t_{ij} = t(x_{ij}) \quad (۴)$$

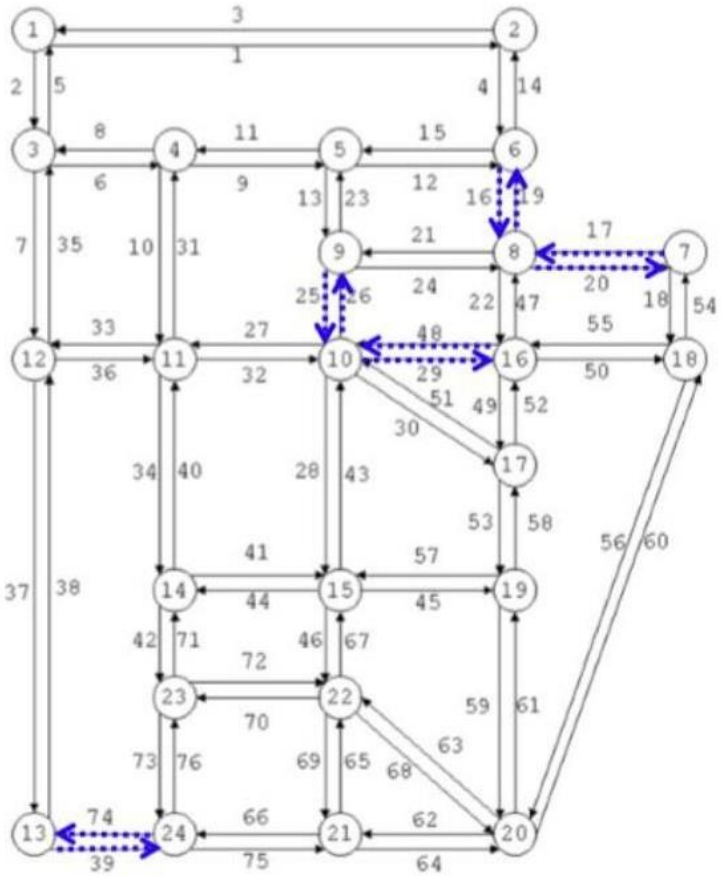
$$s_{ij} = s(x_{ij}) \quad (۵)$$

الگوریتم مورداستفاده در این مطالعه، الگوریتم باز پخت شبیه‌سازی شده است. برای مسئله سطح پایین نیز از الگوریتم فرانک ولف بهره گرفته شده است. الگوریتم باز پخت

شبیه‌سازی، فرآیند بهینه‌سازی خود را از یک فرآیند صنعتی به نام آنیلینگ در رشته مواد و متالوژی تقلید می‌کند. در این فرآیند پاسخ‌های مسئله به‌صورت مداوم دمای حرارت بیشتری تجربه می‌کنند. با مرور زمان، این نوسانات کاهش پیدا می‌کند تا پاسخ را به حالت بهینه نزدیک نماید. کرک پاتریک و همکاران نخستین کسی بود که این ایده را برای مسائل بهینه‌سازی به کار برد. در این فرآیند، پاسخ‌های همسایگی به‌طور مداوم تولید می‌شوند و مسیرهای جست‌وجو به‌صورت انتخابی دنبال می‌شود تا وضعیت بهینه محقق شود. نکته قابل‌توجه این است که برای رهایی از پاسخ‌های محلی، مدل پاسخ‌های کمتر از حالت بهینه را هم می‌پذیرد که با کامل‌تر شدن الگوریتم، احتمال پذیرش آن نیز کمتر می‌گردد. در هر نوبت، تفاوت مقدار جدید و قبلی که به ترتیب با نماد $f(X')$ و $f(X)$ نشان داده می‌شود، مقداری به نام $\Delta = f(X) - f(X')$ نیز به دست می‌آید. در هر حالت، هنگامی پاسخ جدید X' به‌طور قطعی پذیرفته می‌شود که برای یک مسئله کمینه‌سازی $\Delta \geq 0$ باشد. چنانچه مقدار $\Delta \leq 0$ باشد به معنای مطلوب نبودن پاسخ است اما این پاسخ جدید با احتمال $p = \exp(-\Delta / T)$ پذیرفته می‌گردد. در این رابطه مقدار T پارامتر حرارت است.

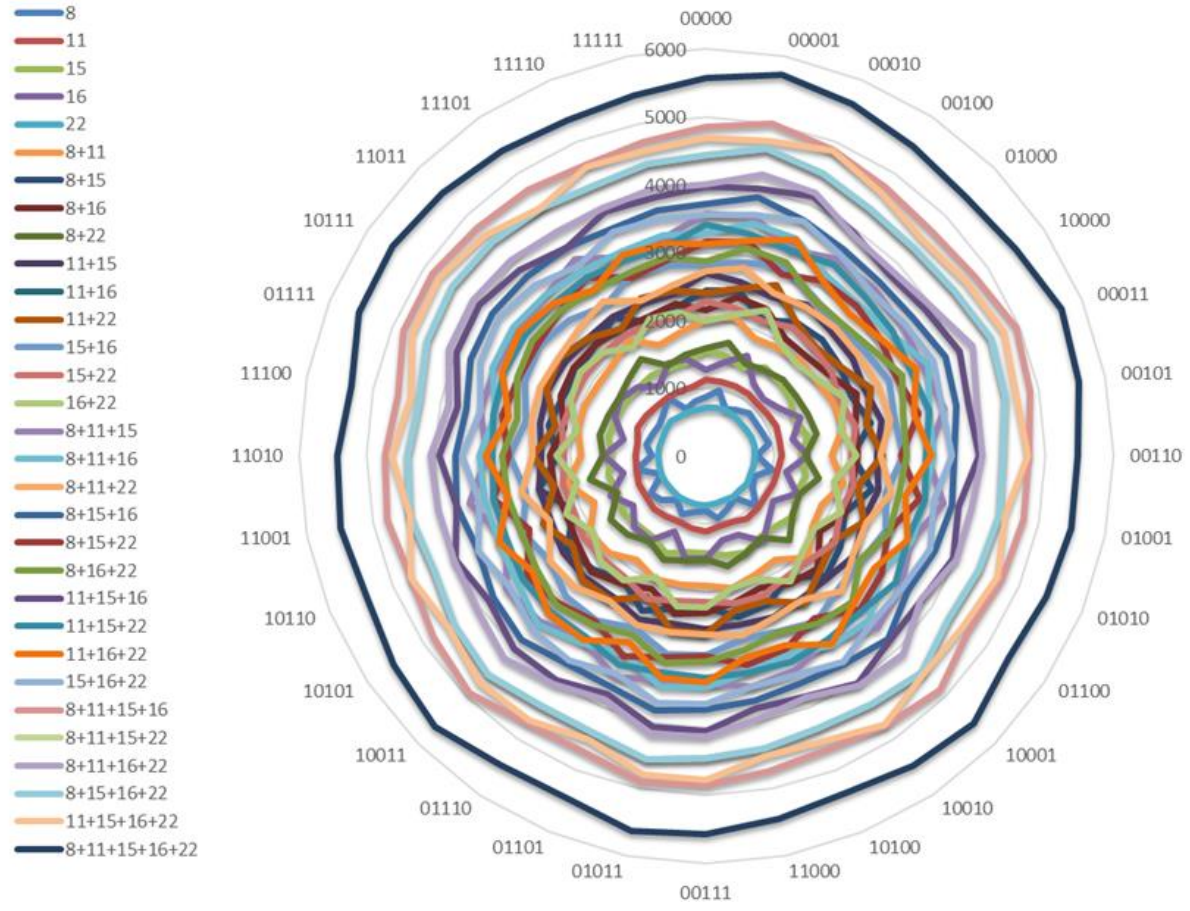
۳. مطالعه موردی و نتایج

شکل ۱، شبکه سوفالز را به‌عنوان یک شبکه پایه در مطالعات طراحی شبکه نشان می‌دهد. در این شبکه ۲۴ نود و ۷۶ لینک وجود دارد. مسئله کلاسیک طراحی شبکه به دنبال یافتن سناریو بهینه برای توسعه شبکه است.



شکل ۱. شبکه سوفالز

مسئله اصلی شبکه انتخاب از بین ۵ پروژه بهبود لینک است که ۳۲ سناریو مختلف را ارائه می‌دهد. از طرفی با توجه به وجود ۵ تقاطع چهارراهی در شبکه (گره‌های تا) ۳۲ سناریو مختلف نیز برای تبدیل هر یک از آن‌ها به میدان وجود دارد. در حالت کلی تعداد سناریوها باربر با ۳۲*۳۲ و برابر با ۱۰۲۴ حالت مختلف است. به‌عنوان‌مثال فراوانی وقوع تصادفات در حالت عدم اجرای هیچ‌یک از پروژه‌های بهبود (۰۰۰۰۰) در گره ۸ برابر با ۷۸٫۸ مورد است. این تعداد برای گره‌های ۱۱ تا ۲۲ نیز به ترتیب برابر با ۷۲٫۲، ۱۲۱٫۶، ۸۲٫۱ و ۸۳ مورد است. در حالت اجرای همه پروژه‌های بهبود لینک (۱۱۱۱۱) نیز فراوانی وقوع تصادفات در گره‌ها به ترتیب برابر با ۷۸٫۳، ۶۷٫۱، ۱۱۴٫۹، ۸۲٫۷ و ۸۲٫۱ مورد است.



شکل ۲. کنتورهای شاخص ایمنی

بررسی کلی کنتورهای شاخص بهبود نشان می‌دهد برخلاف افزایش تعداد لینک‌های بهبود در شبکه که لزوماً منجر به افزایش ایمنی در شبکه نمی‌شود ولی افزایش تعداد تبدیل تقاطعات به میدان باعث بهبود بیشتر می‌گردد. بیشترین سطح کنتور مربوط به وضعیت اجرای ۵ تبدیل تقاطع و کمترین سطح کنتور مربوط به اجرای یک تبدیل تقاطع است.

بررسی نتایج مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از میدان می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در پاسخ مسئله طراحی شبکه از منظر ایمنی داشته باشد. در حالت کلی تبدل تقاطعات به میدان به‌عنوان یک راهکار جایگزین در دستور کار پژوهشگران و تصمیم گیران است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تبدیل تقاطع‌ها به میدان‌ها می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر ایمنی و کارایی جاده‌ها داشته باشد؛ اما نکته قابل‌توجه در مطالعه حاضر این است که بررسی تأثیرات تبدیل تقاطعات به میدان در مطالعات قبلی عموماً در وضعیت نقطه‌ای دیده شده‌اند و این در حالی است

که در این مطالعه فرآیند تبدیل تقاطعات به میدان در یک وضعیت شبکه‌ای مطالعه شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در یک رویکرد شبکه‌ای روشن می‌شود که با افزایش تعداد پروژه‌های بهبود لینک در شبکه لزوماً شاخص بهبود ایمنی صعودی نیست. علی‌رغم پروژه‌های بهبود لینک، پروژه‌های اجرای میدان می‌تواند باعث افزایش شاخص بهبود ایمنی در شبکه شود و با افزایش تعداد پروژه‌های تبدیل تقاطع، شاخص بهبود ایمنی افزایش می‌یابد. منطق هزینه فایده پروژه‌ها نشان می‌دهد بسته به اینکه کدام تقاطع و یا تقاطعات در شبکه تبدیل به میدان می‌شوند، رفتار پروژه‌های بهبود لینک کاملاً متغیر است و در برخی موارد عدم اجرای پروژه‌ها (به‌عنوان یک سناریو) بهترین گزینه (وضعیت بهینه) در شبکه است. درمجموع:

- در تصمیم‌گیری‌ها از شاخص ایمنی استفاده شود: ترکیب شاخص‌های ایمنی در مدل‌های طراحی شبکه
- قبل از اجرای پروژه یک تحلیل دقیق انجام بشود: بررسی تأثیرات متقابل بین اجرای پروژه‌های بهبود لینک و تبدیل تقاطعات به میدان برای افزایش ایمنی و کارایی شبکه
- سناریوها بر اساس شاخص‌های هزینه، ترافیک و ایمنی اولویت‌بندی شود: تأکید بر سناریوهایی که بیشترین تأثیر در بهبود هم‌زمان شاخص‌ها دارند
- سناریوهای پیشنهادی مکرراً و به‌صورت منعطف بررسی و پایش شوند: ارزیابی تأثیر پروژه‌های اجراشده با استفاده از آزمایش‌های دوره‌ای و به‌روز کردن بر اساس داده‌های جدید به‌دست‌آمده
- از منطق هزینه فایده غفلت نشود: استفاده از این منطق در تصمیم‌گیری برای طراحی شبکه مطلوب

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Network Design Problem

۶. مراجع

– Who (2021). Road traffic injuries. who.int. https://www.who.int/news-room/fact sheets/detail/road-traffic-injuries.

– 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.

– 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.

– Yu, B., Kong, L., Sun, Y., Yao, B., & Gao, Z. (2015). A bi-level programming for bus lane network design. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 55, 310-327.

– 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., 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.

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

– 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.