Karafan

Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University

Spring 2024, Vol. 21, No. 1, p. 607-626

Journal Homepage: https://karafan.tvu.ac.ir/?lang=en

TVU

dor:10.48301/KSSA.2024.432877.2798

Investigating the Effect of Signalized Intersections on the Safe Design of Urban Road Networks

Mehrdad Asgari[1], Amin Mirza Boroujerdian[2*]

[1]PhD Candidate at Road and Transportation Engineering, Tarbiat Modares Univerty, Tehran, Iran.
[2]Associate Professor at Road and Transportation Engineering, Tarbiat Modares Univerty, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 01.02.2024
Revised: 02.10.2024
Accepted: 04.14.2024

Keyword:
Road Engineering
Transportation Network
Traffic Safety
Urban Infrastructure Design
Safety Performance Functions

***Corresponding Author:**
Amin Mirza Boroujerdian
Email:
boroujerdian@modares.ac.ir

ABSTRACT

The road network represents a fundamental component of a city's infrastructure, catering to the needs of its populace. The design and provision of an efficient urban transportation network wield a direct influence on the quality of services demanded by users and concurrently serve as a linchpin for advancing other infrastructure development. Given this context, a pivotal requirement emerges to formulate inclusive urban networks that systematically incorporate critical medical components within their design. A salient observation lies in the fact that the foundation of city road network design predominantly revolves around enhancing the travel time for transportation network users, while other aspects, notably user safety, have been overlooked. The primary hurdle in road network design revolves around discerning the optimal choice for improving the network taking into account the numerous constraints embedded in the problem. Typically, this challenge is addressed through a dual-level model, where the lower level grapples with the intricacies of traffic flow assignment, and the upper level navigates the complexities of determining the most fitting network enhancement option, guided by the objective function of travel time. To address the identified gap, this study integrated indicators and models for accident prediction and to investigate the safety impact, the problem was solved in the Sioux Falls network. The answer to the Sioux Falls problem in LeBlanc's classic study is 10110. However, with the inclusion of the accident index of intersections and nodes, the answer to the problem was completely different.

©2024 the authors. Published by National University of Skills, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

E-ISSN: 2538-4430
ISSN: 2382-9796

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Urban roads, as components of a smart network, have the task of providing facilities to different users. The design of urban road networks has always been considered a significant issue in the studies of researchers in the field of road and transportation engineering. The design of this network should be such that users have the highest level of satisfaction from the available services. The main focus of this issue is to reduce travel time for users. At the same time, less attention has been paid to the issue of user safety. The loss of 1.3 million people per year in the world and more than 16 thousand people in 2021 in Iran shows the urgency of this issue. The network design problem seeks to allocate limited resources for network development. This problem is considered a two-level model. The high-level problem (leader level) provides the optimal network design and the allocation problem is solved at the low level (follower level). It is noteworthy that the high level of the problem is generally a single factor and safety issues have not been investigated. Similar studies have dealt with the issue of equality being added to the model including the design of the horizontal and vertical justice network, network design with equity-based pricing strategy, and the role of environmental considerations in network design. In the present study, the impact of lighted intersections on the safe design of urban road networks was studied by entering the accident index.

Methodology

The network design problem strives to identify the most optimal scenario by taking into consideration the constraints associated with the problem. Typically, this problem is solved using a two-level form. The network design problem is solved at the top level, known as the leader level, while the assignment problem is addressed at the bottom level, referred to as the follower level. The discrete network design problem aims to achieve the most optimal assignment of limited resources for network development and improvement. This is accomplished by selecting the optimal links from a set of candidate links.

Results and discussion

The estimation of the number of accidents at intersections based on the allocated flow rate in the Sioux Falls network problem is presented in the main text. It is clear that in general, the number of accidents estimated is higher in the case without lights. The data tables are for 19 nodes and for 32 states considered in the Sioux Falls network problem in LeBlanc's study. The important point is that the answer to the Leblanc problem in the Sioux Falls network is equal to a unique answer and equal to the 10110 scenario. In other words, in LeBlanc's problem, choosing among the 5 candidate projects of Steph, the answer to the problem is equal to the implementation of the first, third, and fourth projects. The focus of the LeBlanc problem and, in general, the classical problems of solving the network is to find the optimal situation of the problem with a focus on reducing the travel times of road users in the system. The answer 10110 in the LeBlanc problem also means that by implementing this scenario, the network is in its best condition to provide travel time-based services to

users. To investigate the impact of safety in this study, the scenario of lighting intersections in the network was followed. The estimated number of accidents at node number 24 in the Sioux Falls network in the illuminated state in scenario 00000 is equal to 129 accidents. The number of accidents met in this node in scenario 00100 is equal to 149 accidents. This means that if the implementation of third projects improves the network in terms of travel time of road users, it will also increase the number of estimated accidents in the network. On the other hand, for example, in node number 9, if no project is implemented, the estimated number of accidents is equal to 230, while in the case of scenario 10110, the number is reduced to 198. The results of selected scenarios are presented in Table 1.

Table 1. Results.

Row number	Node	Scenario	Row number	Node	Scenario
1	8	11001	11	12	10010
2	11	00000	12	14	01000
3	15	01100	13	17	10100
4	16	00010	14	18	10111
5	20	10111	15	19	10100
6	22	00010	16	21	00100
7	3	10100	17	23	00101
8	4	10101	18	24	00100
9	5	01010	19	9	01001
10	6	10001			

Conclusion

The results obtained and presented in the previous section indicate that changing the type of intersections in a node in the network and changing its safety status causes a change in the answer to the network design problem. Therefore, it can be said that lighting the nodes of a network has a direct impact on determining the best options for network development. The answer to the problem in the case of lighting the intersection number 8 is equal to 11001. In this case, to ensure safety-based system optimization, the implementation of the first, second, and fifth projects is selected, not the 10110 scenario of the LeBlanc problem. The answer to the problem in the mode of lighting node 11 is equal to 00000, or in other words, the option of not executing any project. First, it seems that to improve the network, projects must be implemented by applying the economic costs of building improvement projects. This is the default for classic time-travel mode. It can be seen that by developing the concept of network design and including safety components, it can find a more comprehensive answer to the problem or even prevent additional costs that seem to improve.

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۴۰۳، دوره ۲۱، شماره ۱، ۶۲۶-۶۰۷

آدرس نشریه: https://karafan.tvu.ac.ir/

doi:10.48301/KSSA.2024.432877.2798

بررسی تاثیر تقاطعات چراغ‌دار در طراحی ایمن شبکه راه‌های درون شهری

مهرداد عسگری[۱]، امین میرزا بروجردیان[۲*]

۱- دانشجو دکتری، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶

کلید واژگان:

مهندسی راه

شبکه حمل و نقل

ایمنی ترافیک

طراحی زیرساخت شهری

توابع عملکرد ایمنی

***نویسنده مسئول:** امین میرزا بروجردیان

پست الکترونیکی:

boroujerdian@modares.ac.ir

چکیده

اصلی‌ترین زیرساخت تسهیل تردد کاربران راه در یک شهر، شبکه راه‌های آن است. طراحی و ارایه یک شبکه مطلوب حمل و نقل شهری، نه تنها دارای تاثیر مستقیم بر کیفیت خدمات لازم برای کاربران بلکه یکی از ارکان اصلی پیشرفت سایر زیرساخت‌ها نیز است. در چنین شرایطی ضرورت دارد تا طراحی شبکه راه‌های شهری جامع و با در نظر گرفتن مولفه‌های موثر در آن باشد. نکته قابل توجه این است که مبنای طراحی شبکه راه‌ها در یک شهر صرفا مبتنی بر بهبود زمان سفر کاربران شبکه حمل و نقل است و مولفه‌های دیگری از جمله ایمنی کاربران مغفول مانده است. مسئله اصلی در طراحی شبکه راه، یافتن بهترین گزینه بهبود شبکه با در نظر گرفتن محدودیت‌های مسئله است. این مسئله عموما به صورت یک مدل دوسطحی دنبال می‌شود که در سطح پایین آن مسئله تخصیص جریان ترافیک و در سطح بالا مسئله گزینه بهبود شبکه (با تابع هدف زمان سفر) حل می‌شود. در این مطالعه برای تکمیل نقص مورد نظر از توابع عملکرد ایمنی متناسب با مسئله استفاده شده است. برای بررسی تاثیر ایمنی، مسئله در شبکه سوفالز حل شده است. پاسخ مسئله سوفالز در مطالعه کلاسیک لبلانک برابر ۱۰۱۱۰ است. در حالی که با ورود شاخص تصادفات تقاطعات و گره‌ها پاسخ مسئله کاملا متفاوت خواهد بود.

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

©2024 the authors. Published by National University of Skills, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

راه‌های درون‌شهری به عنوان اجزا یک شبکه هوشمند، وظیفه ارایه تسهیلات به کاربران مختلف را دارند. طراحی شبکه راه‌های درون شهری همواره به عنوان یک مسئله قابل توجه در مطالعات پژوهشگران حوزه مهندسی راه و حمل و نقل دنبال شده است. طراحی این شبکه باید به گونه‌ای باشد تا کاربران راه بالاترین سطح رضایت را از خدمات موجود داشته باشند. تکیه اصلی این مسئله بر کاهش زمان سفر طی شده برای کاربران است. این در حالی است که کمتر به مسئله ایمنی کابران توجه شده است. تلف شدن تعداد ۱.۳ میلیون نفر در سال در جهان [۱] بیانگر اهمیت توجه به این مسئله است. مسئله طراحی شبکه به دنبال تخصیص منابع محدود برای توسعه شبکه است [۲]. این مسئله به عنوان یک مدل دوسطحی در نظر گرفته می‌شود. مسئله سطح بالا (سطح رهبر) طرح بهینه شبکه را ارایه می‌کند و در سطح پایین (سطح دنبال کننده) تخصیص مسئله حل می‌شود. نکته قابل توجه این است که سطح بالای مسئله، عموما تک عاملی است و مسائلی همپون ایمنی بررسی نشده است. البته مطالعات مشابهی دنبال شده است که در آن‌ها مسئله برابری به مدل اضافه شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به مسئله طراحی شبکه عدالت محور افقی و عمودی [۳] و [۴]. طراحی شبکه با راهبرد قیمت‌گذاری مبتنی بر برابری [۵]، نقش ملاحظات محیطی در طراحی شبکه [۶] و غیره اشاره کرد. در این مطالعه با ورود شاخص تصادفات، تاثیر تقاطعات چراغدار در طراحی ایمن شبکه راه‌های درون شهری مطالعه شده است.

با توجه به بررسی ایمنی و تصادفات در طراحی ابتدا مطالعات مختلف مربوط به حوزه ایمنی شبکه ارایه شده است که اکثرا متمرکز بر رتبه‌بندی شبکه راه‌ها و شاخص‌سازی ایمنی شبکه‌ای بوده است و از مدل‌های برآورد تصادفات برای این منظور استفاده شده است [۷]. در یک مطالعه ارزیابی ایمنی شبکه مدلسازی شده است [۸]. گومز[1] و همکاران (۲۰۱۸) به ارایه یک شاخص عملکرد ایمنی در شبکه پرداخته است [۹]. برای بررسی تاثیر محیط شهری بر ایمنی شبکه راه نیز از تحلیل رگرسیونی بهره برده شده است[۱۰]. معین‌الدینی و اسدی (۱۳۹۳) با ارزیابی الگوی شبکه راه‌ها نشان دادند که با افزایش طول سرانه راه‌های شهری، کاهش طول سرانه بزرگراه‌ها و کاهش تعداد گره‌ها در منطقه، در نتایج ایمنی بهبود حاص می‌گردد [۱۱]. مطالعه مارشال و گاریک[2] (۲۰۱۱) نشان دادند که کاهش فراوانی تصادفات دارای یک ارتباط معنادار و مثبت با افزایش تراکم شبکه جاده‌ای و با افزودن تقاطع‌ها در طول یک مسیر است [۱۲]. از طرفی الگوهای با دسترسی محدود، در مقایسه با الگوهای معمولی و سایر تغییرات احتمال تصادفات کمتری را نشان می‌دهند. این موضوع با بررسی تأثیر الگوهای شبکه بر شدت تصادفات مربوط به کاربران آسیب‌پذیر جاده مشخص شده است [۱۳]. با بررسی دقیق جنبه‌های عملکرد ایمنی، موکوکو[3] و همکاران (۲۰۲۰) یک مطالعه جامع را برای ارزیابی اثرات ویژگی‌های شبکه و برنامه‌ریزی کاربری زمین بر فراوانی وقوع تصادفات آغاز کردند [۱۴]. سیدینوس و ولاستو[4] نیز با استفاده از یک روش مبتنی بر یک فرآیند تحلیل چند معیاره نشان دادند که اولویت‌بندی ایمنی در توسعه استراتژیک شبکه جاده‌ای یک منطقه شهری بسیار مهم است [۱۵].

بررسی این مطالعات نشان می‌دهد که اغلب آن‌ها، ارتباط بین شاخص تصادفات و مسئله طراحی را دنبال نکرده‌اند و لذا در ادامه مطالعات حوزه طراحی نیز بررسی می‌شود.

طراحی شبکه و مسئله‌بندی آن به دنبال یافتن وضعیت بهینه برای پیکربندی شبکه است. این مسئله با هدف قرار دادن کاهش زمان سفر در شبکه عموما در حوزه روشی و الگوریتمی توسعه داده شده است. بنابراین اکثر مطالعات موجود در این زمینه متمرکز بر الگوریتم‌های حل است. مسائل طراحی به سه سطح گسسته، پیوسته و ترکیبی تقسیم می‌شود.

[1] Gomes
[2] Marshall & Garrick
[3] Mukoko
[4] Tsigdinos & Vlastos

مطالعات مربوط به طراحی گسسته عبارتند از راهبرد تقریب و خطی سازی [۱۶]، روش کلونی مورچگان [۱۷]، مدل اعداد صحیح مختلط خطی [۱۸]، الگوریتم ژنتیک [۱۹]، تابع پشتیبانی [۲۰]، شبه‌بهینه با هدف تجزیه [۲۱]، روش‌ها فراابتکاری ترکیبی [۲۲] و سایر روش‌های مرتبط. در حالت پیوسته مسئله طراحی نیز الگوریتم هوک جیوز [۲۳]، مدل خطی اعداد صحیح مختلط مبتنی بر مسیر [۲۴]، الگوریتم بازپخت شبیه سازی شده [۲۵]، روش بهینه تخصیص تکراری [۲۶] و غیره دنبال شده است. الگوریتم ژنتیک [۲۷] و مدل خطی عدد صحیح مختلط [۲۸] نیز از جمله الگوریتم‌های مطالعه شده در حوزه طراحی شبکه مختلط هستند.

با توجه به مطالعات ارایه شده در این بخش، واضح است که نه تنها شاخص‌های ایمنی در مسوله طراحی شبکه جایگاهی نداشته‌اند بلکه تاثیر ایمنی تقاطعات نیز دیده نمی‌شود. لذا در ادامه با حل مسئله لبلانک در شبکه سوفالز، تاثیر چراغ‌دار بودن در طراحی شبکه بررسی می‌گردد.

روش تحقیق

برای بررسی تاثیر توابع عملکرد ایمنی در طراحی شبکه، ابتدا فرمولنبدی مسئله طراحی شبکه کلاسیک ارایه می‌شود. پس از آن، توابع عملکرد ایمنی متناسب با مسئله انتخاب می‌گردد. در ادامه فرمول‌بندی مسئله طراحی شبکه ایمن ارایه می‌شود و در نهایت الگوریتم حل مسئله توضیح داده می‌شود.

در این بخش ابتدا طراحی فرمول‌بندی مسئله دنبال می‌شود و در ادامه با ارایه توابع مناسب عملکرد ایمنی، مسئله فرمول‌بندی می‌گردد.

فرمول‌بندی مدل طراحی ایمن شبکه

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

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

$$\text{subject to: } F_i(m,n) \le 0 \text{ for i} \in \{1,2,...,I\} \qquad (۱)$$

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

رابطه ۲، فرمول‌بندی مسئله سطح بالا (سطح رهبر) را نشان می‌دهد.

$$\min_{y} \sum_{i,j \in (AU A_y)} x_{ij}^{*} t_{ij}(x_{ij}^{*})$$

$$s.t: y_{i,j} = 0 \text{ or } 1 \ \forall \text{ i,j} \in A_y \qquad (۲)$$

$$\sum_{\text{i,j} \in A_y} c_{ij} y_{ij} \le B$$

x_{ij}^{*}: جریان تعادل کاربر در شبکه با حل مسئله زیر (رابطه شماره ۳) در $N(V, AUA_y)$ به دست می‌آید. با در نظر گرفتن بردار پروژه‌های y:

$$\min_{x} \sum_{i,j \in (AUA_y)} \int_{0}^{x_{ij}} t_{ij}(v)dv$$

$$st: \sum_{P \in P_{ks}} x_p^{ks} = d^{ks}, \forall (k,s) \in P \qquad (۳)$$

$$x_p^{ks} \geq 0, \forall p \in p_{ks}, \forall (k,s) \in P$$

$$x_{i,j} = \sum\sum x_p^{ks} \delta_{ij \in p}^{ks} \forall (i,j) \in A_y$$

جدول ۱. متغیرها و پارامترهای مسئله.

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

توابع عملکرد ایمنی[1]

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.

[1] Safety Performance Function

$$t_{ij} = t(x_{ij}) \quad (۴)$$

$$s_{ij} = s(x_{ij}) \quad (۵)$$

رابطه ۶، مدل پیش بینی فراوانی تصادفات را نشان می‌دهد [۲۹]. پارامترهای مدل در جدول ۲ ارایه شده است.

$$Totalcrashes = years * exp^{a} * AADTMAJ^{b} * AADTMIN^{c} \quad (۶)$$

در این رابطه:

$Totalcrashes$: مجموع تصادفات در طول سال‌های مختلف برای یک تقاطع

$years$: تعداد سال‌های مورد نظر

$AADTMAJ$: متوسط ترافیک روزانه در یک سال برای مسیر اصلی

$AADTMIN$: متوسط ترافیک روزانه در یک سال برای مسیر فرعی

جدول ۲. پارامترهای مدل.

نوع تقاطع	پارامترهای مدل		
	a	***b***	***c***
تقاطع سه‌راهی چراغ‌دار	-۹/۵۸	۰/۹۷	۰/۱۸
تقاطع سه‌راهی بدون چراغ	-۱۲/۳۷	۱/۲۲	۰/۲۷
تقاطع چهارراهی چراغ‌دار	-۳/۴۷	۰/۴۲	۰/۱۴
تقاطع چهارراهی بدون چراغ	-۱۲/۳۷	۱/۲۲	۰/۲۷
تقاطع سه‌راهی چراغ‌دار	-۹/۵۸	۰/۹۷	۰/۱۸

فرمول‌بندی 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.

$$\min_{y} \sum_{i,j \in (AUA_y)} [crashindex] \quad (۷)$$

$$\min_{y} \sum_{i,j \in (AUA_y)} [Totalcrashes = years * exp^{a} * AADTMAJ^{b} * AADTMIN^{c}]$$

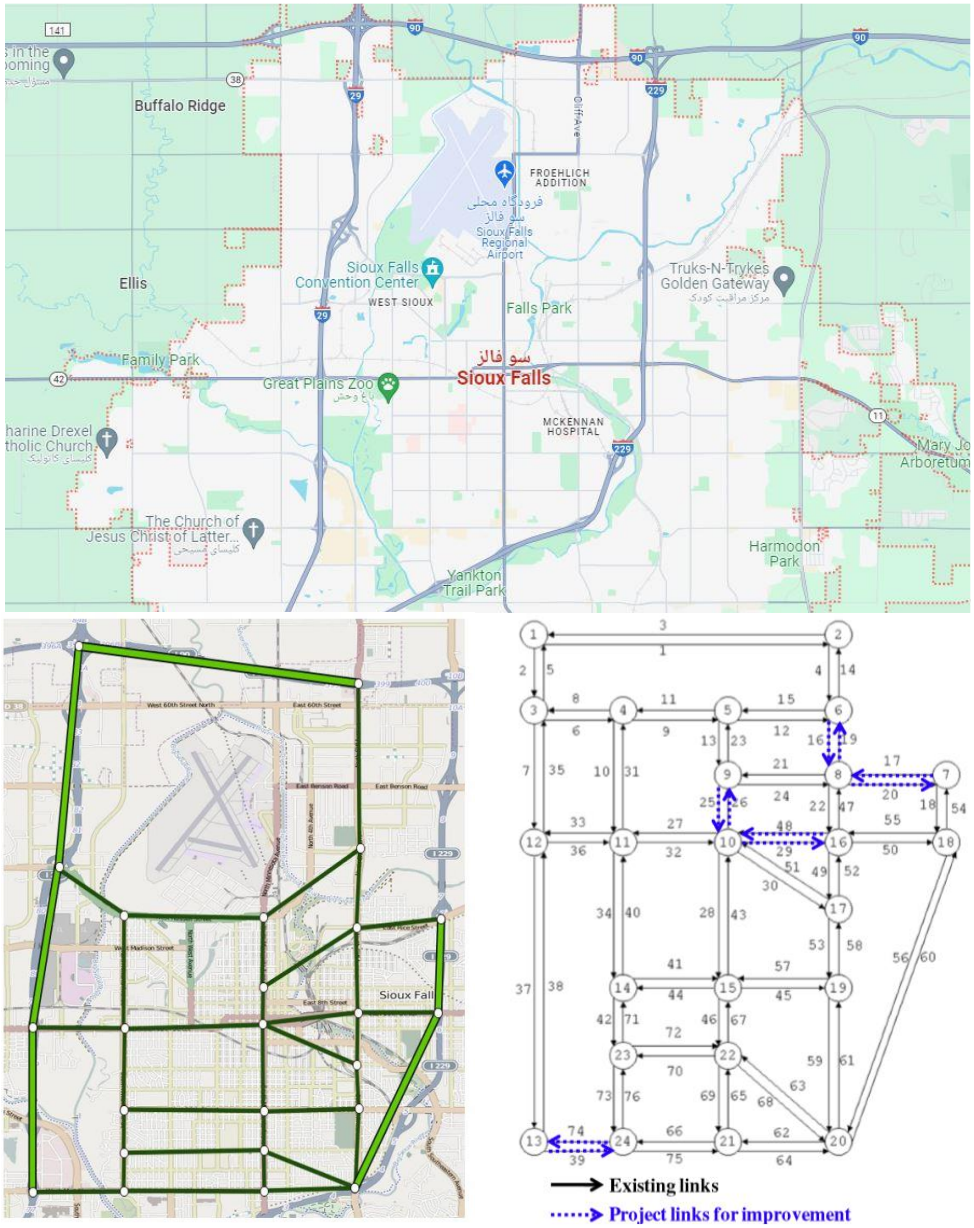
الگوریتم حل

الگوریتم مورد استفاده در این مطالعه، الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده است. برای مسئله سطح پایین نیز از الگوریتم فرانک ولف بهره گرفته شده است. الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی، فرآیند بهینه‌سازی خود را از یک فرآیند صنعتی

به نام آنیلینگ در رشته مواد و متالوژی تقلید می‌کند. در این فرآیندپساخ‌های مسئله به صورت 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 [۳۰]. در این فرآیند، پاسخ‌های همسایگی به طور مداوم تولید می‌شوند و مسیرهای جست و جو به صورت انتخابی دنبال می‌شود تا وضعیت بهینه محقق شود. نکته قابل توجه این است که برای رهایی از پاسخ‌های محلی، مدل پاسخ‌های کمتر از حالیت 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' به طور 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.

نتایج

برای حل مسئله جدید از شبکه سوفالز در مطالعه لبلانک در سال ۱۹۷۵ استفاده شده است. در مسئله لبلانک از یک مدل دوسطحی استفاده شده است که در سطح بالا طراحی شبکه و در سطح پایین تخصیص بدر حالت بهینگی سیستم دنبال شده است. شبک سوفالز در شکل ۱ نشان داده شده است. جدول ۳ نیز مشخصات شبکه را ارایه کرده است. مشخصات پروژه‌های بهبود شبکه و نیز ماتریس تقاضای مبدا-مقصد به ترتیب در جداول ۴ و ۵ آورده شده است.



شکل ۱. شبکه سوفالز.

جدول ۳. مشخصات شبکه سوفالز.

از گره	به گره	ظرفیت	زمان سفر آزاد	از گره	به گره	ظرفیت	زمان سفر آزاد
۱	۲	۲۵۹۰۰	۰.۰۶	۱۰	۱۵	۱۳۵۱۲	۰.۰۶
۱	۳	۲۳۴۰۳	۰.۰۴	۱۰	۱۱	۱۰۰۰۰	۰.۰۵
۲	۱	۲۵۹۰۰	۰.۰۶	۱۱	۱۰	۱۰۰۰۰	۰.۰۵
۲	۶	۴۹۵۸	۰.۰۵	۱۱	۱۴	۴۸۷۶.۵۱	۰.۰۴
۳	۱	۲۳۴۰۳	۰.۰۴	۱۱	۱۲	۴۹۰۸.۸۳	۰.۰۶
۳	۴	۱۷۱۱۱	۰.۰۴	۱۱	۴	۴۹۰۸.۸۳	۰.۰۶
۳	۱۲	۲۳۴۰۳	۰.۰۴	۱۲	۱۳	۲۵۹۰۰.۲	۰.۰۳
۴	۳	۱۷۱۱۱	۰.۰۴	۱۲	۳	۲۳۴۰۳.۴۷	۰.۰۴
۴	۵	۱۷۷۸۳	۰.۰۲	۱۲	۱۱	۴۹۰۸.۸۳	۰.۰۶
۴	۱۱	۴۹۰۹	۰.۰۶	۱۳	۲۴	۵۰۹۱.۲۶	۰.۰۴
۵	۴	۱۷۷۸۳	۰.۰۲	۱۳	۱۲	۲۵۹۰۰.۲	۰.۰۳
۵	۶	۴۹۴۸	۰.۰۴	۱۴	۱۵	۵۱۲۷.۵۳	۰.۰۵
۵	۹۹	۱۰۰۰۰	۰.۰۵	۱۴	۲۳	۴۹۲۴.۷۹	۰.۰۴
۶	۵	۴۹۴۸	۰.۰۴	۱۴	۱۱	۴۸۷۶.۵۱	۰.۰۴
۶	۸	۴۸۹۹	۰.۰۲	۱۵	۱۹	۱۵۶۵۰.۸	۰.۰۴
۶	۲	۴۹۵۸	۰.۰۵	۱۵	۱۴	۵۱۲۷.۵۳	۰.۰۵
۷	۸	۷۸۴۲	۰.۰۳	۱۵	۲۲	۱۰۳۱۵	۰.۰۴
۷	۱۸	۲۳۴۰۳	۰.۰۲	۱۵	۱۰	۱۳۵۱۲	۰.۰۶
۸	۶	۴۸۹۹	۰.۰۲	۱۶	۸	۵۰۴۵.۸۲	۰.۰۵
۸	۱۶	۵۰۴۶	۰.۰۵	۱۶	۱۷	۵۲۲۹.۹۱	۰.۰۲
۸	۹	۵۰۵۰	۰.۱	۱۶	۱۸	۱۹۶۷۹.۹	۰.۰۳
۸	۷	۷۸۴۲	۰.۰۳	۱۶	۱۰	۵۱۳۳.۵	۰.۰۵
۹	۵	۱۰۰۰۰	۰.۰۵	۱۷	۱۶	۵۲۲۹.۹۱	۰.۰۲
۹	۸	۵۰۵۰	۰.۱	۱۷	۱۹	۴۸۲۳.۹۵	۰.۰۲
۹	۱۰	۱۳۹۱۶	۰.۰۳	۱۷	۱۰	۴۹۹۳.۵۱	۰.۰۸
۱۰	۱۷	۴۹۹۴	۰.۰۸	۱۸	۷	۲۳۴۰۳.۴۷	۰.۰۲
۱۰	۱۶	۵۱۳۳	۰.۰۵	۱۸	۱۶	۱۹۶۷۹.۹	۰.۰۳
۱۰	۹	۱۳۹۱۶	۰.۰۳	۱۸	۲۰	۲۳۴۰۳.۴۷	۰.۰۴

جدول ۴. مشخصات پروژه‌های بهبود.

شماره پروژه	هزینه (۱۰۰۰ دلار)	لینک	ظرفیت	زمان سفر آزاد
پروژه اول	۶۵۰	(۶,۸),(۸,۶)	۵۹۴۴	۰/۰۱۳
پروژه دوم	۶۲۵	(۹,۱۰),(۱۰,۹)	۱۵۹۵۹	۰/۰۱۶
پروژه سوم	۸۵۰	(۱۳,۲۴),(۲۴,۱۳)	۵۹۲۵	۰/۰۲۲
پروژه چهارم	۱,۲۰۰	(۱۰,۱۶),(۱۶,۱۰)	۵۹۴۶	۰/۰۲۷
پروژه پنجم	۱,۰۰۰	(۷,۸),(۸,۷)	۸۹۲۳	۰/۰۱۵

جدول ۵. ماتریس تقاضا (مبدا-مقصد).

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱	۰	۱	۱	۵	۲	۳	۵	۸	۵	۱۳	۵	۲
۲	۱	۰	۱	۲	۱	۴	۲	۴	۲	۶	۲	۱
۳	۱	۱	۰	۲	۱	۳	۱	۲	۱	۳	۳	۲
۴	۵	۲	۲	۰	۵	۴	۴	۷	۷	۱۲	۱۴	۶
۵	۲	۱	۱	۵	۰	۲	۲	۵	۸	۱۰	۵	۲
۶	۳	۴	۳	۴	۲	۰	۴	۸	۴	۸	۴	۲
۷	۵	۲	۱	۴	۲	۴	۰	۱۰	۶	۱۹	۵	۷
۸	۸	۴	۲	۷	۵	۸	۱۰	۰	۸	۱۶	۸	۶
۹	۵	۲	۱	۷	۸	۴	۶	۸	۰	۲۸	۱۴	۶
۱۰	۱۳	۶	۳	۱۲	۱۰	۸	۱۹	۱۶	۲۸	۰	۴۰	۲۰
۱۱	۵	۲	۳	۱۵	۵	۴	۵	۸	۱۴	۳۹	۰	۱۴
۱۲	۲	۱	۲	۶	۲	۲	۷	۶	۶	۲۰	۱۴	۰
۱۳	۵	۳	۱	۶	۲	۲	۴	۶	۶	۱۹	۱۰	۱۳
۱۴	۳	۱	۱	۵	۱	۱	۲	۴	۶	۲۱	۱۶	۷
۱۵	۵	۱	۱	۵	۲	۲	۵	۶	۱۰	۴۰	۱۴	۷
۱۶	۵	۴	۲	۸	۵	۹	۱۴	۲۲	۱۴	۴۴	۱۴	۷
۱۷	۴	۲	۱	۵	۲	۵	۱۰	۱۴	۹	۳۹	۱۰	۶
۱۸	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۲	۳	۲	۷	۲	۲
۱۹	۳	۱	۰	۲	۱	۲	۴	۷	۴	۱۸	۴	۳
۲۰	۳	۱	۰	۳	۱	۳	۵	۹	۶	۲۵	۶	۵
۲۱	۱	۰	۰	۲	۱	۱	۲	۴	۳	۱۲	۴	۳
۲۲	۴	۱	۱	۴	۲	۲	۵	۵	۷	۲۶	۱۱	۷
۲۳	۳	۰	۱	۵	۱	۱	۲	۳	۵	۱۸	۱۳	۷
۲۴	۱	۰	۰	۲	۰	۱	۱	۲	۲	۸	۶	۵
	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
۱	۵	۳	۵	۵	۴	۱	۳	۳	۱	۴	۳	۱
۲	۳	۱	۱	۴	۲	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۰
۳	۱	۱	۱	۲	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰
۴	۶	۵	۵	۸	۵	۱	۲	۳	۲	۴	۵	۲
۵	۲	۱	۲	۵	۲	۰	۱	۱	۱	۲	۱	۰
۶	۲	۱	۲	۹	۵	۱	۲	۳	۱	۲	۱	۱
۷	۴	۲	۵	۱۴	۱۰	۲	۴	۵	۲	۵	۲	۱
۸	۶	۴	۶	۲۲	۱۴	۳	۷	۹	۴	۵	۳	۲
۹	۶	۶	۹	۱۴	۹	۲	۴	۶	۳	۷	۵	۲
۱۰	۱۹	۲۱	۴۰	۴۴	۳۹	۷	۱۸	۲۵	۱۲	۲۶	۱۸	۸
۱۱	۱۰	۱۶	۱۴	۱۴	۱۰	۱	۴	۶	۴	۱۱	۱۳	۶
۱۲	۱۳	۷	۷	۷	۶	۲	۳	۴	۳	۷	۷	۵

۲۴	۲۳	۲۲	۲۱	۲۰	۱۹	۱۸	۱۷	۱۶	۱۵	۱۴	۱۳	
۸	۸	۱۳	۶	۶	۳	۱	۵	۶	۷	۶	۰	۱۳
۴	۱۱	۱۲	۴	۵	۳	۱	۷	۷	۱۳	۰	۶	۱۴
۴	۱۰	۲۶	۸	۱۱	۸	۲	۱۵	۱۲	۰	۱۳	۷	۱۵
۳	۵	۱۲	۶	۱۶	۱۳	۵	۲۸	۰	۱۲	۷	۶	۱۶
۳	۶	۱۷	۶	۱۷	۱۷	۶	۰	۲۸	۱۵	۷	۵	۱۷
۰	۱	۳	۱	۴	۳	۰	۶	۵	۲	۱	۱	۱۸
۱	۳	۱۲	۴	۱۲	۰	۳	۱۷	۱۳	۸	۳	۳	۱۹
۴	۷	۲۴	۱۲	۰	۱۲	۴	۱۷	۱۶	۱۱	۵	۶	۲۰
۵	۷	۱۸	۰	۱۲	۴	۱	۶	۶	۸	۴	۶	۲۱
۱۱	۲۱	۰	۱۸	۲۴	۱۲	۳	۱۷	۱۲	۲۶	۱۲	۱۳	۲۲
۷	۰	۲۱	۷	۷	۳	۱	۶	۵	۱۰	۱۱	۸	۲۳
۰	۷	۱۱	۵	۴	۱	۰	۳	۳	۴	۴	۷	۲۴

برآورد تعداد تصادفات در تقاطعات بر اساس نرخ جریات تخصیص یافته در مسئله شبکه سوفالز در جدول ۶ و جدول ۷ ارایه شده است. جدول ۶ برآورد تعداد تصادفات در یک سال در حالت چراغدار است و جدول ۷ نیز برای حالت بدون چراغ است. واضح است که در حالت کلی تعداد تصادفات برآورد شده در حالت بدون چراغ بیشتر است. داده جداول برای ۱۹ گره و برای ۳۲ حالت متصور در مسئله شبکه سوفالز در مطالعه لبلانک است. نکته مهم این است که پاسخ مسئله لبلانم در شبکه سوفالز برابر با یک پاسخ یکتا و برابر با سناریو ۱۰۱۱۰ است. به عبارتی در مسئله لبلانک که انتخاب از بین ۵ پروژه نامزد استف پاسخ مسئله برابر با اجرای پروژه اول، سوم و چهارم است. تمرکز مسئله لبلانک و به طور عمومی مساول کلاسیک حل شبکه بر یافتن وضعیت بهینه مسئله با تمرکز بر کاهش زملان سفر کاربران راه در سیستم است. پاسخ ۱۰۱۱۰ در مسئله لبلانک نیز به این معنا است که با اجرای این سناریو، شبکه در بهترین وضعیت خود برای ارایه خدمات مبتنی بر زمان سفر به کاربران راه است. برای بررسی تاثیر ایمنی در این مطالعه، سناریو چراغدار کردن تقاطعات در شبکه دنبال شده است. تعداد تصادفات برآورد شده در گره شماره ۲۴ در شبکه سوفالز در حالت چراغدار در سناریو ۰۰۰۰۰ برابر با ۱۲۹ تصادف است. تعداد تصادفات برآورده شده در همین گره در حالت سناریو ۰۰۱۰۰ برابر ۱۴۹ تصادفات است. این مسئله به این معنا است که اگر اجرای پروژه‌های سوم موجب بهبود شبکه از نظر زمان سفر کاربران راه می‌شود اما تعداد تصادفات برآوردی در شبکه را نیز افزایش خواهد داد. از طرفی به عنوان مثال در گره شماره ۹ چنانچه هیچ پروژه‌ای اجرا نشود تعداد تصادفات برآوردی برابر با ۲۳۰ عدد است و این در حالی است که در حالت سناریو ۱۰۱۱۰ تعداد آن به ۱۹۸ مورد کاهش می‌یابد. اما مسئله اصلی در این مطالعه بررسی تاثیر چراغدار کردن تقاطعات در پاسخ مسئله است. لذا برای نیل به این هدف با استفاده از نتایج به دست آمده مقدار بهبود تصادفات در حالت تبدیل شدن هر یک از گره‌های بدون چراغ به گره‌های دارای چراغ محاسبه گردید. پس از آن با مبنا قرار دادن درصد بهبود تصادفات در مدل دوسطحی مسئله، بهترین سناریو مشخص گردید.

جدول ۶. برآورد فراوانی تصادفات در حالت چراغدار.

۶	۵	۴	۳	۲۲	۲۰	۱۶	۱۵	۱۱	۸	
۱۱۶	۱۸۷	۱۹۲	۱۳۷	۴۶	۴۷	۴۸	۶۰	۴۶	۴۳	۰۰۰۰۰
۱۱۸	۱۹۱	۱۹۶	۱۴۱	۴۶	۴۷	۵۰	۶۰	۴۵	۴۵	۰۰۰۰۱
۱۱۴	۱۸۴	۱۹۰	۱۳۶	۴۶	۴۷	۵۲	۵۸	۴۶	۴۱	۰۰۰۱۰

	۸	۱۱	۱۵	۱۶	۲۰	۲۲	۳	۴	۵	۶
۰۰۱۰۰	۴۲	۴۵	۵۹	۴۸	۴۷	۴۶	۱۳۲	۱۸۵	۱۸۶	۱۱۶
۰۱۰۰۰	۴۳	۴۵	۶۰	۴۷	۴۷	۴۶	۱۳۹	۱۹۴	۱۹۳	۱۱۶
۱۰۰۰۰	۴۳	۴۵	۵۹	۴۹	۴۷	۴۶	۱۵۱	۱۹۷	۱۹۱	۱۳۴
۰۰۰۱۱	۴۳	۴۶	۵۸	۵۱	۴۷	۴۶	۱۳۳	۱۹۳	۱۸۷	۱۱۵
۰۰۱۰۱	۴۴	۴۵	۵۹	۴۸	۴۸	۴۷	۱۳۲	۱۸۸	۱۸۵	۱۱۷
۰۰۱۱۰	۴۱	۴۵	۵۸	۵۱	۴۸	۴۶	۱۳۲	۱۸۹	۱۸۶	۱۱۴
۰۱۰۰۱	۴۴	۴۵	۶۰	۴۷	۴۷	۴۶	۱۴۲	۱۹۳	۱۹۲	۱۱۹
۰۱۰۱۰	۴۱	۴۵	۵۹	۵۰	۴۷	۴۶	۱۳۵	۱۹۸	۱۹۶	۱۱۳
۰۱۱۰۰	۴۲	۴۵	۵۹	۴۷	۴۷	۴۶	۱۳۶	۱۹۳	۱۹۴	۱۱۲
۱۰۰۰۱	۴۶	۴۵	۵۹	۴۸	۴۷	۴۶	۱۵۳	۱۹۶	۱۹۱	۱۴۰
۱۰۰۱۰	۴۱	۴۵	۵۸	۵۱	۴۷	۴۶	۱۴۷	۱۹۸	۱۸۹	۱۳۲
۱۰۱۰۰	۴۳	۴۵	۵۹	۴۸	۴۷	۴۶	۱۵۶	۲۰۰	۱۹۲	۱۳۱
۱۱۰۰۰	۴۴	۴۵	۵۹	۴۸	۴۷	۴۶	۱۵۰	۱۹۳	۱۹۱	۱۳۴
۰۰۱۱۱	۴۱	۴۵	۵۸	۵۱	۴۸	۴۶	۱۳۳	۱۸۸	۱۸۵	۱۱۴
۰۱۰۱۱	۴۲	۴۵	۵۹	۵۱	۴۷	۴۶	۱۳۴	۱۹۵	۱۹۲	۱۱۳
۰۱۱۰۱	۴۳	۴۴	۵۹	۴۷	۴۷	۴۶	۱۴۱	۱۸۹	۱۸۹	۱۱۷
۰۱۱۱۰	۴۱	۴۵	۵۸	۵۰	۴۸	۴۶	۱۳۵	۱۹۰	۱۹۱	۱۱۳
۱۰۰۱۱	۴۴	۴۵	۵۸	۵۱	۴۷	۴۶	۱۴۲	۱۹۶	۱۹۱	۱۳۵
۱۰۱۰۱	۴۵	۴۵	۵۸	۴۸	۴۷	۴۶	۱۴۸	۱۹۷	۱۹۱	۱۳۸
۱۰۱۱۰	۴۰	۴۵	۵۸	۵۱	۴۸	۴۶	۱۴۹	۱۹۶	۱۸۹	۱۲۹
۱۱۰۰۱	۴۶	۴۴	۵۹	۴۸	۴۷	۴۶	۱۵۷	۱۹۲	۱۹۱	۱۳۹
۱۱۰۱۰	۴۲	۴۴	۵۸	۵۱	۴۷	۴۶	۱۴۲	۱۹۵	۱۹۲	۱۳۱
۱۱۱۰۰	۴۳	۴۴	۵۸	۴۸	۴۷	۴۶	۱۵۴	۱۹۶	۱۹۶	۱۳۳
۰۱۱۱۱	۴۲	۴۵	۵۸	۵۰	۴۸	۴۶	۱۳۷	۱۸۹	۱۸۶	۱۱۳
۱۰۱۱۱	۴۲	۴۵	۵۸	۵۱	۴۸	۴۶	۱۴۴	۱۹۳	۱۸۷	۱۳۰
۱۱۰۱۱	۴۳	۴۴	۵۸	۵۰	۴۸	۴۶	۱۴۲	۱۹۷	۱۹۴	۱۳۱
۱۱۱۰۱	۴۵	۴۴	۵۸	۴۸	۴۸	۴۶	۱۵۶	۱۹۸	۱۹۴	۱۳۸
۱۱۱۱۰	۴۱	۴۴	۵۸	۵۱	۴۸	۴۶	۱۴۴	۱۹۷	۱۹۳	۱۳۰
۱۱۱۱۱	۴۲	۴۴	۵۸	۵۰	۴۷	۴۶	۱۴۸	۱۹۹	۱۹۴	۱۲۸

ادامه جدول ۶. برآورد فراوانی تصادفات در حالت چراغ‌دار.

	۱۲	۱۴	۱۷	۱۸	۱۹	۲۱	۲۳	۲۴	۹
۰۰۰۰۰	۱۵۰	۱۱۴	۱۲۴	۲۵۰	۱۳۳	۱۰۵	۱۰۲	۱۲۹	۲۳۰
۰۰۰۰۱	۱۵۰	۱۱۳	۱۲۷	۲۷۴	۱۳۱	۱۰۵	۱۰۱	۱۲۶	۲۲۸
۰۰۰۱۰	۱۵۱	۱۱۴	۱۲۸	۲۶۷	۱۲۶	۱۰۵	۱۰۰	۱۲۶	۲۲۳
۰۰۱۰۰	۱۵۴	۱۱۲	۱۳۰	۲۵۱	۱۳۳	۱۱۲	۱۰۹	۱۴۹	۲۲۰
۰۱۰۰۰	۱۵۱	۱۱۵	۱۲۸	۲۳۸	۱۳۲	۱۰۵	۱۰۱	۱۲۶	۲۵۰
۱۰۰۰۰	۱۵۷	۱۱۲	۱۲۸	۲۵۳	۱۲۹	۱۰۳	۱۰۲	۱۲۷	۲۱۶

۹	۲۴	۲۳	۲۱	۱۹	۱۸	۱۷	۱۴	۱۲	
۲۲۹	۱۲۹	۱۰۲	۱۰۵	۱۲۶	۲۶۶	۱۲۷	۱۱۱	۱۵۲	۰۰۰۱۱
۲۲۵	۱۴۷	۱۱۰	۱۱۰	۱۳۳	۲۶۱	۱۲۴	۱۱۱	۱۵۴	۰۰۱۰۱
۲۲۰	۱۴۳	۱۰۶	۱۰۹	۱۲۹	۲۶۱	۱۲۶	۱۰۸	۱۵۴	۰۰۱۱۰
۲۵۳	۱۲۵	۱۰۱	۱۰۴	۱۲۹	۲۴۴	۱۲۹	۱۱۴	۱۵۱	۰۱۰۰۱
۲۵۵	۱۲۴	۹۸	۱۰۵	۱۲۶	۲۵۲	۱۲۶	۱۱۲	۱۵۵	۰۱۰۱۰
۲۴۰	۱۴۷	۱۰۷	۱۰۹	۱۳۱	۲۴۱	۱۲۷	۱۱۲	۱۵۷	۰۱۱۰۰
۲۱۸	۱۲۵	۱۰۱	۱۰۲	۱۲۸	۲۶۴	۱۲۷	۱۱۱	۱۵۶	۱۰۰۰۱
۲۰۸	۱۲۳	۹۹	۱۰۱	۱۲۷	۲۶۰	۱۲۷	۱۱۰	۱۵۹	۱۰۰۱۰
۲۱۳	۱۴۵	۱۰۸	۱۰۶	۱۳۴	۲۴۸	۱۳۱	۱۰۹	۱۶۰	۱۰۱۰۰
۲۳۹	۱۲۷	۱۰۱	۱۰۳	۱۳۰	۲۵۰	۱۲۲	۱۱۲	۱۵۸	۱۱۰۰۰
۲۲۴	۱۴۳	۱۰۷	۱۰۹	۱۲۶	۲۶۸	۱۲۷	۱۰۸	۱۵۴	۰۰۱۱۱
۲۵۰	۱۲۴	۱۰۲	۱۰۳	۱۲۸	۲۶۶	۱۲۵	۱۱۲	۱۵۳	۰۱۰۱۱
۲۴۸	۱۴۵	۱۰۷	۱۰۶	۱۳۰	۲۴۸	۱۲۴	۱۱۲	۱۵۷	۰۱۱۰۱
۲۴۱	۱۴۰	۱۰۴	۱۰۷	۱۲۹	۲۶۰	۱۲۵	۱۰۹	۱۵۲	۰۱۱۱۰
۲۱۵	۱۲۳	۱۰۱	۱۰۰	۱۳۲	۲۶۴	۱۲۹	۱۰۹	۱۵۵	۱۰۰۱۱
۲۰۹	۱۴۲	۱۰۷	۱۰۶	۱۳۲	۲۶۳	۱۲۹	۱۰۸	۱۵۵	۱۰۱۰۱
۱۹۸	۱۴۳	۱۰۷	۱۰۷	۱۲۴	۲۷۲	۱۲۴	۱۰۷	۱۵۸	۱۰۱۱۰
۲۳۹	۱۲۵	۱۰۰	۱۰۲	۱۲۶	۲۵۷	۱۲۵	۱۱۰	۱۶۱	۱۱۰۰۱
۲۳۰	۱۲۳	۱۰۱	۱۰۳	۱۲۸	۲۵۶	۱۲۹	۱۱۱	۱۵۵	۱۱۰۱۰
۲۳۹	۱۴۰	۱۰۲	۱۰۶	۱۲۸	۲۴۳	۱۲۹	۱۰۸	۱۵۹	۱۱۱۰۰
۲۴۰	۱۴۳	۱۰۵	۱۰۶	۱۲۶	۲۶۴	۱۲۷	۱۰۸	۱۵۷	۰۱۱۱۱
۲۰۴	۱۴۱	۱۰۵	۱۰۷	۱۳۰	۲۸۰	۱۲۳	۱۰۷	۱۵۵	۱۰۱۱۱
۲۳۵	۱۲۲	۱۰۰	۱۰۱	۱۲۶	۲۵۸	۱۲۷	۱۱۰	۱۵۴	۱۱۰۱۱
۲۳۲	۱۴۰	۱۰۲	۱۰۴	۱۲۷	۲۵۷	۱۲۶	۱۰۸	۱۵۸	۱۱۱۰۱
۲۳۰	۱۴۰	۱۰۲	۱۰۵	۱۲۵	۲۵۷	۱۲۵	۱۰۷	۱۵۸	۱۱۱۱۰
۲۲۸	۱۳۸	۱۰۲	۱۰۴	۱۲۸	۲۶۳	۱۲۸	۱۰۶	۱۵۸	۱۱۱۱۱

جدول ۷. برآورد فراوانی تصادفات در حالت بدون چراغ.

۶	۵	۴	۳	۲۲	۲۰	۱۶	۱۵	۱۱	۸	
۶۸۲	۱۲۷۹	۱۲۶۰	۸۵۶	۸۰۰	۱۲۹۰	۱۳۵۹	۱۶۷۹	۱۲۰۶	۹۵۴	۰۰۰۰۰
۶۹۸	۱۳۱۳	۱۲۸۸	۸۹۱	۸۰۵	۱۲۹۸	۱۴۸۵	۱۶۲۰	۱۱۸۰	۱۰۶۷	۰۰۰۰۱
۶۶۶	۱۲۵۲	۱۲۴۲	۸۴۸	۸۱۴	۱۲۹۶	۱۶۸۵	۱۵۳۴	۱۱۹۳	۸۲۵	۰۰۰۱۰
۶۷۷	۱۲۶۹	۱۲۰۱	۸۱۶	۸۰۱	۱۳۱۵	۱۳۵۹	۱۶۸۷	۱۱۷۶	۸۸۸	۰۰۱۰۰
۶۸۱	۱۳۳۰	۱۲۷۵	۸۷۶	۷۹۲	۱۲۸۹	۱۲۷۳	۱۶۵۱	۱۱۴۷	۹۷۴	۰۱۰۰۰
۸۱۵	۱۳۰۹	۱۳۰۲	۹۷۲	۷۹۹	۱۲۸۴	۱۳۷۶	۱۶۲۱	۱۱۶۵	۹۶۵	۱۰۰۰۰
۶۷۲	۱۲۷۶	۱۲۷۲	۸۲۸	۸۰۰	۱۳۱۹	۱۵۸۳	۱۵۳۱	۱۲۰۰	۹۸۳	۰۰۰۱۱
۶۹۰	۱۲۵۵	۱۲۲۳	۸۱۶	۸۰۸	۱۳۴۹	۱۳۷۷	۱۶۴۸	۱۱۷۸	۱۰۱۹	۰۰۱۰۱
۶۶۵	۱۲۶۴	۱۲۳۰	۸۱۸	۸۰۴	۱۳۴۷	۱۵۸۱	۱۵۲۶	۱۱۷۸	۸۱۸	۰۰۱۱۰

	۸	۱۱	۱۵	۱۶	۲۰	۲۲	۳	۴	۵	۶
۰۱۰۰۱	۱۰۶۵	۱۱۴۹	۱۶۲۲	۱۲۸۶	۱۲۸۴	۷۹۴	۸۹۷	۱۲۵۸	۱۳۲۱	۷۰۴
۰۱۰۱۰	۸۴۶	۱۱۴۰	۱۵۴۸	۱۵۲۷	۱۳۴۰	۷۸۹	۸۴۶	۱۳۰۷	۱۳۶۰	۶۶۱
۰۱۱۰۰	۸۹۶	۱۱۳۱	۱۶۸۷	۱۲۷۱	۱۳۲۸	۸۰۶	۸۵۷	۱۲۵۷	۱۳۳۴	۶۵۲
۱۰۰۰۱	۱۱۲۳	۱۱۴۷	۱۵۷۹	۱۳۸۰	۱۳۱۹	۷۸۵	۹۸۹	۱۲۹۴	۱۳۰۶	۸۶۶
۱۰۰۱۰	۸۱۸	۱۱۶۹	۱۵۴۱	۱۵۹۹	۱۳۰۹	۷۹۷	۹۴۴	۱۳۱۲	۱۲۸۴	۷۹۹
۱۰۱۰۰	۹۱۶	۱۱۲۲	۱۶۴۲	۱۳۴۴	۱۲۷۲	۷۸۸	۱۰۱۲	۱۳۲۳	۱۳۱۲	۷۹۱
۱۱۰۰۰	۱۰۱۷	۱۱۱۳	۱۶۰۸	۱۳۴۲	۱۳۲۷	۷۹۹	۹۶۸	۱۲۶۳	۱۳۰۵	۸۱۸
۰۰۱۱۱	۸۷۳	۱۱۸۱	۱۵۴۵	۱۵۸۷	۱۳۴۸	۸۰۳	۸۲۹	۱۲۲۵	۱۲۵۴	۶۶۹
۰۱۰۱۱	۹۱۹	۱۱۴۸	۱۵۶۴	۱۶۱۵	۱۳۲۱	۸۱۱	۸۳۸	۱۲۷۹	۱۳۲۴	۶۶۰
۰۱۱۰۱	۹۹۵	۱۱۱۶	۱۶۷۵	۱۲۷۲	۱۳۲۸	۸۰۹	۸۹۴	۱۲۲۲	۱۲۹۵	۶۹۰
۰۱۱۱۰	۸۵۳	۱۱۲۹	۱۵۴۱	۱۵۶۲	۱۳۴۵	۸۰۵	۸۴۶	۱۲۳۶	۱۳۱۰	۶۵۷
۱۰۰۱۱	۱۰۰۵	۱۱۶۷	۱۵۴۹	۱۵۶۷	۱۳۰۵	۷۹۲	۸۹۹	۱۲۹۴	۱۳۱۱	۸۲۵
۱۰۱۰۱	۱۰۷۴	۱۱۳۸	۱۵۹۴	۱۳۷۸	۱۳۱۹	۷۹۰	۹۴۷	۱۳۰۷	۱۳۰۳	۸۵۰
۱۰۱۱۰	۷۸۵	۱۱۳۹	۱۵۱۴	۱۶۱۶	۱۳۷۰	۷۹۴	۹۵۹	۱۲۸۸	۱۲۸۴	۷۷۸
۱۱۰۰۱	۱۱۲۸	۱۱۰۷	۱۵۸۳	۱۳۲۵	۱۳۳۷	۷۷۶	۱۰۱۸	۱۲۵۶	۱۳۰۸	۸۵۸
۱۱۰۱۰	۸۸۰	۱۱۱۱	۱۵۰۵	۱۵۸۲	۱۳۲۹	۷۹۴	۸۹۹	۱۲۸۱	۱۳۱۷	۷۹۱
۱۱۱۰۰	۹۷۹	۱۰۹۶	۱۵۸۲	۱۳۱۶	۱۳۰۱	۷۸۱	۹۹۶	۱۲۸۶	۱۳۵۰	۸۰۹
۰۱۱۱۱	۹۲۷	۱۱۵۳	۱۵۴۹	۱۵۴۴	۱۳۴۱	۷۸۴	۸۶۱	۱۲۲۶	۱۲۶۴	۶۵۹
۱۰۱۱۱	۹۱۱	۱۱۳۵	۱۵۴۳	۱۶۰۴	۱۳۸۸	۷۹۹	۹۱۷	۱۲۶۴	۱۲۶۷	۷۸۸
۱۱۰۱۱	۹۶۶	۱۱۰۳	۱۵۳۷	۱۵۰۸	۱۳۶۰	۸۰۶	۹۰۱	۱۲۹۱	۱۳۳۵	۷۹۶
۱۱۱۰۱	۱۱۰۴	۱۰۹۶	۱۵۵۴	۱۳۱۲	۱۳۴۰	۷۸۰	۱۰۱۰	۱۳۰۶	۱۳۳۳	۸۴۶
۱۱۱۱۰	۸۲۶	۱۰۹۹	۱۵۱۰	۱۵۶۰	۱۳۴۳	۷۸۵	۹۲۱	۱۲۹۴	۱۳۲۲	۷۸۶
۱۱۱۱۱	۹۰۹	۱۱۰۱	۱۵۱۸	۱۵۳۹	۱۳۴۰	۷۸۲	۹۴۷	۱۳۰۸	۱۳۳۴	۷۶۶

ادامه جدول ۷. برآورد فراوانی تصادفات در حالت بدون چراغ.

	۱۲	۱۴	۱۷	۱۸	۱۹	۲۱	۲۳	۲۴	۹
۰۰۰۰۰	۹۳۷	۶۶۷	۷۴۰	۱۸۳۲	۸۳۳	۶۰۱	۵۸۱	۷۷۲	۱۵۹۷
۰۰۰۰۱	۹۴۱	۶۶۲	۷۶۰	۲۰۷۱	۸۱۷	۵۹۸	۵۷۲	۷۵۰	۱۵۸۰
۰۰۰۱۰	۹۴۶	۶۶۴	۷۶۶	۱۹۸۹	۷۷۵	۶۰۲	۵۷۰	۷۴۸	۱۵۲۵
۰۰۱۰۰	۹۷۱	۶۴۹	۷۸۳	۱۸۴۵	۸۳۴	۶۵۲	۶۳۳	۹۳۳	۱۵۰۸
۰۱۰۰۰	۹۴۴	۶۷۲	۷۷۰	۱۷۱۴	۸۲۹	۶۰۳	۵۷۲	۷۵۱	۱۷۷۶
۱۰۰۰۰	۹۹۳	۶۵۳	۷۷۲	۱۸۶۲	۸۰۲	۵۸۳	۵۸۰	۷۶۱	۱۴۶۸
۰۰۰۱۱	۹۵۹	۶۴۴	۷۵۷	۱۹۸۶	۷۷۴	۵۹۸	۵۸۰	۷۷۰	۱۵۸۷
۰۰۱۰۱	۹۶۷	۶۴۵	۷۳۹	۱۹۳۶	۸۳۳	۶۳۶	۶۳۹	۹۲۱	۱۵۵۴
۰۰۱۱۰	۹۷۱	۶۲۵	۷۵۱	۱۹۳۷	۷۹۹	۶۳۰	۶۱۳	۸۸۴	۱۵۰۵
۰۱۰۰۱	۹۴۹	۶۶۵	۷۷۶	۱۷۷۷	۸۰۵	۵۹۱	۵۷۱	۷۴۲	۱۸۰۸
۰۱۰۱۰	۹۷۸	۶۴۹	۷۵۴	۱۸۳۸	۷۷۶	۶۰۳	۵۵۶	۷۳۶	۱۸۰۵
۰۱۱۰۰	۹۹۰	۶۵۲	۷۶۲	۱۷۴۴	۸۲۳	۶۳۲	۶۱۹	۹۱۷	۱۶۷۷

	۱۲	۱۴	۱۷	۱۸	۱۹	۲۱	۲۳	۲۴	۹
۱۰۰۰۱	۹۸۷	۶۴۲	۷۶۰	۱۹۶۴	۷۹۳	۵۸۲	۵۷۱	۷۴۴	۱۴۸۵
۱۰۰۱۰	۱۰۱۰	۶۳۹	۷۶۲	۱۹۲۳	۷۸۵	۵۷۴	۵۵۸	۷۲۷	۱۳۸۶
۱۰۱۰۰	۱۰۱۰	۶۲۶	۷۸۸	۱۸۱۷	۸۴۲	۶۰۸	۶۲۳	۸۹۸	۱۴۳۷
۱۱۰۰۰	۹۹۷	۶۵۰	۷۲۵	۱۸۲۶	۸۰۸	۵۸۸	۵۷۲	۷۵۷	۱۶۶۹
۰۰۱۱۱	۹۶۷	۶۲۲	۷۶۰	۱۹۹۹	۷۸۱	۶۲۷	۶۱۸	۸۸۸	۱۵۳۴
۰۱۰۱۱	۹۶۴	۶۵۴	۷۴۶	۱۹۷۷	۷۹۲	۵۸۷	۵۸۱	۷۳۵	۱۷۶۵
۰۱۱۰۱	۹۸۶	۶۵۰	۷۴۰	۱۸۱۲	۸۱۱	۶۰۸	۶۱۵	۹۰۰	۱۷۵۴
۰۱۱۱۰	۹۵۴	۶۳۲	۷۴۳	۱۹۲۵	۸۰۲	۶۱۵	۵۹۷	۸۶۰	۱۶۸۳
۱۰۰۱۱	۹۸۱	۶۲۹	۷۷۲	۱۹۶۸	۸۲۲	۵۶۶	۵۷۱	۷۳۱	۱۴۵۸
۱۰۱۰۱	۹۷۶	۶۲۱	۷۷۶	۱۹۵۲	۸۲۶	۶۱۱	۶۱۴	۸۸۱	۱۴۱۳
۱۰۱۱۰	۱۰۰۱	۶۱۴	۷۴۰	۲۰۴۱	۷۶۵	۶۱۷	۶۱۶	۸۸۴	۱۲۹۷
۱۱۰۰۱	۱۰۱۹	۶۳۸	۷۴۸	۱۸۹۶	۷۸۲	۵۷۷	۵۶۷	۷۴۵	۱۶۷۴
۱۱۰۱۰	۹۷۷	۶۴۶	۷۷۵	۱۸۸۷	۷۹۳	۵۸۵	۵۷۴	۷۲۶	۱۵۸۵
۱۱۱۰۰	۱۰۰۸	۶۲۱	۷۷۲	۱۷۶۰	۷۹۶	۶۰۹	۵۷۷	۸۵۸	۱۶۷۷
۰۱۱۱۱	۹۸۸	۶۲۲	۷۶۳	۱۹۶۱	۷۸۱	۶۰۷	۶۰۱	۸۸۲	۱۶۸۱
۱۰۱۱۱	۹۷۳	۶۱۷	۷۲۷	۲۱۲۴	۸۰۸	۶۱۹	۶۰۳	۸۷۰	۱۳۵۵
۱۱۰۱۱	۹۷۰	۶۳۸	۷۶۰	۱۹۰۰	۷۸۲	۵۷۱	۵۶۶	۷۱۹	۱۶۲۳
۱۱۱۰۱	۹۹۹	۶۲۱	۷۴۹	۱۸۹۹	۷۸۵	۵۸۹	۵۸۴	۸۵۶	۱۶۰۹
۱۱۱۱۰	۹۹۸	۶۱۴	۷۴۴	۱۸۹۱	۷۶۹	۵۹۹	۵۸۳	۸۵۷	۱۵۸۰
۱۱۱۱۱	۹۹۸	۶۰۹	۷۶۷	۱۹۵۴	۷۹۲	۵۹۲	۵۸۰	۸۴۷	۱۵۶۲

نتایج حل مسئله در جدول ۸ ارایه شده است. سناریو منتخب برای هر ۱۹ گره مشخص شده است. نتیجه مهم قابل مشاهده این است که با ورود شاخص ایمنی (تصادفات) به شکل قابل ملاحظه‌ای پاسخ مسائل طراحی شبکه را تغییر می‌دهد. اگر مسئلخ کلاسیک لبلانک دارای یک پاسخ منحصر به فرد برابر ۱۰۱۱۰ را دارد اما در حالات مختلف مواجه با پدیده ایمنی، پاسخ مسئله می‌تواند متفاوت باشد.

جدول ۸. سناریوهای منتخب.

ردیف	شماره گره	سناریو منتخب	ردیف	شماره گره	سناریو منتخب
۱	۸	۱۱۰۰۱	۱۱	۱۲	۱۰۰۱۰
۲	۱۱	.....	۱۲	۱۴	۰۱۰۰۰
۳	۱۵	۰۱۱۰۰	۱۳	۱۷	۱۰۱۰۰
۴	۱۶	۰۰۰۱۰	۱۴	۱۸	۱۰۱۱۱
۵	۲۰	۱۰۱۱۱	۱۵	۱۹	۱۰۱۰۰
۶	۲۲	۰۰۰۱۰	۱۶	۲۱	۰۰۱۰۰
۷	۳	۱۰۱۰۰	۱۷	۲۳	۰۰۱۰۱
۸	۴	۱۰۱۰۱	۱۸	۲۴	۰۰۱۰۰
۹	۵	۰۱۰۱۰	۱۹	۹	۰۱۰۰۱
۱۰	۶	۱۰۰۰۱			

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده و ارایه شده در بخش قبل بیانگر این نکته است که تغییر نوع تقاطعات موجود در یک گره در شبکه و تغییر وضعیت ایمنی آن موجب تغییر در پاسخ مسئله طراحی شبکه می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که چراغدار شدن گره‌های یک شبکه تاثیر مستقیم بر تعیین گزینه‌های بهینه و برتر توسعه شبکه دارد. پاسخ مسئله در صورت چراغدار شدن تقاطع شماره ۸ برابر با ۱۱۰۰۱ است. در این حالت برای تامین بهینگی سیستم بر مبنای ایمنی، اجرای پروژه‌های اول، دوم و پنجم است که منتخب است نه سناریو ۱۰۱۱۰ مسئله لبلانک. پاسخ مسئله در حالت چراغدار کردن گره ۱۱ برابر با ۰۰۰۰۰ است یا به عبارتی گزینه عدم اجرای هیچ پروژه. در وهله نخست به نظر می‌رسد برای بهبود شبکه باید با اعمال هزینه‌های اقتصادی ساخت پروژه‌های بهبود، حتما پروژه‌هایی اجرا شود. این پیش فرض برای حالت زمان سفر محوری کلاسیک است. مشاهده می‌شود که با توسعه مفهوم طراحی شبکه و ورود آن به درگیر کردن مولفه‌های ایمنی می‌تواند پاسخ جامعتری برای مسئله پیدا کند و یا حتی از هزینه‌های اضافی به ظاهر بهبود دهنده جلوگیری نماید.

لذا می‌توان یافته‌های این مطالعه را به صورت زیر خلاصه کرد:

- ورود مفهوم ایمنی در طراحی شبکه باعث تغییر در پاسخ مسئله می‌شود.
- چراغدار کردن تقاطعات دارای تاثیر مستقیم در تغییر پاسخ مسئله طراحی شبکه است.
- حل مسئله طراحی شبکه صرفا مبتنی بر زمان به معنای فراهم آوردن بهترین شرایط برای کاربران راه نیست.
- پاسخ مسئله مبتنی بر زمان سفر کاربران یک پاسخ منحصر به فرد است درحالی‌که با شرایط مختلف ایمنی پاسخ متغیر خواهد بود.

نکته قابل توجه پایانی این است که پایه ورود شاخص‌های ایمنی در طراحی شبکه، استفاده از توابع عملکرد ایمنی است. پیش فرض این مطالعه بالا بودن سطح معناداری و اعتبار مدل‌های پیش‌بینی تصادفات است. به نظر می‌رسد با تغییر نوع و دقت مدل‌ها نیز پاسخ مسئله متفاوت خواهد بود که می‌تواند در مطالعات پیش رو مورد ارزیابی قرار گیرد.

References

[1] World Health Organization. (2023, December 13). *Road traffic injuries*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries

[2] 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. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001

[3] 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. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.02.006

[4] Caggiani, L., Camporeale, R., & Ottomanelli, M. (2017). Facing equity in transportation Network Design Problem: A flexible constraints based model. *Transport Policy*, *55*, 9-17. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.01.003

[5] 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. https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103800

[6] 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. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.04.003

[7] Jasiūnienė, V., Ratkevičiūtė, K., & Peltola, H. (2020). Road Network Safety Ranking Using Accident Prediction Models. In A. Varhelyi, V. Žuraulis, & O. Prentkovskis (Eds.), *Vision Zero for Sustainable Road Safety in Baltic Sea Region* (pp. 166–176). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22375-5_19

[8] 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. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.07.007

[9] 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. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.10.006

[10] Ewing, R., & Dumbaugh, E. (2009). The built environment and traffic safety: a review of empirical evidence. *Journal of Planning Literature*, *23*(4), 347-367. https://doi.org/10.1177/0885412209335553

[11] 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. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.08.015

[12] Marshall, W. E., & Garrick, N. W. (2011). Does street network design affect traffic safety? *Accident Analysis & Prevention*, *43*(3), 769-781. https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.10.024

[13] 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. https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.08.024

[14] Mukoko, K. K., & Pulugurtha, S. S. (2020). Examining the influence of network, land use, and demographic characteristics to estimate the number of bicycle-vehicle crashes on urban roads. *International Association of Traffic and Safety Sciences*, *44*(1), 8-16. https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2019.04.001

[15] Tsigdinos, S., & Vlastos, T. (2021). Exploring ways to determine an alternative strategic road network in a metropolitan city: A multi-criteria analysis approach. *International Association of Traffic and Safety Sciences research*, *45*(1), 102-115. https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2020.06.002

[16] 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. https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.04.005

[17] Poorzahedy, H., & Abulghasemi, F. (2005). Application of ant system to network design problem. *Transportation*, *32*(3), 251-273. https://doi.org/10.1007/s11116-004-8246-7

[18] 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. https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.02.001

[19] 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. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(02)00014-9

[20] Gao, Z., Wu, J., & Sun, H. (2005). Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, *39*(6), 479-495. https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.06.004

[21] 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. https://doi.org/10.1016/S0191-2615(97)00020-9

[22] Poorzahedy, H., & Rouhani, O. M. (2007). Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. *European journal of operational research*, *182*(2), 578-596. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.038

[23] Abdulaal, M., & LeBlanc, L. J. (1979). Continuous equilibrium network design models. *Transportation Research Part B: Methodological*, *13*(1), 19-32. https://doi.org/10.1016/0191-2615(79)90004-3

[24] 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. https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.10.003

[25] 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. https://doi.org/10.1287/trsc.26.1.18

[26] Allsop, R. E. (1974, August 26-28). *Some possibilities for using traffic control to influence trip distribution and route choice.* Proceedings of the 6th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, University of New South Wales, Sydney, Australia. https://trid.trb.org/View/40326

[27] Cantarella, G. E., & Vitetta, A. (2006). The multi-criteria road network design problem in an urban area. *Transportation*, *33*(6), 567-588. https://doi.org/10.1007/s11116-006-7908-z

[28] 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. https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.02.002

[29] Lyon, C., Persaud, B. N., & Gross, F. B. (2016). *The Calibrator-An SPF Calibration and Assessment Tool User Guide*. Federal Highway Administration. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50484

[30] Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, *220*(4598), 671-680. https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671