

## مکان‌یابی شناسگرهای ثبت اطلاعات ترافیکی با هدف تخمین زمان سفر با در نظر گرفتن خرابی شناسگرها در سطح شبکه

رضا دهستانی بافقی، دانشجوی دکترای برنامه‌ریزی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
محمود احمدی‌نژاد (مسئول مکاتبات)، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

**E-mail: ahmady@iust.ac.ir**

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰

### چکیده

به‌تازگی مسئله مکان‌یابی شناسگرها در زیرساخت شبکه ترافیک بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مدل‌های زیادی برای مکان‌یابی بهینه شناسگرها برای تخمین زمان سفر پیشنهاد شده است، که در هیچ یک از این مدل‌ها، احتمال خرابی شناسگرها در نظر گرفته نشده است. این مقاله مدلی برای مسئله مکان‌یابی شناسگرهای تخمین زمان سفر در شبکه پیشنهاد می‌کند، که در آن، احتمال خرابی شناسگرها در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که برای حل دقیق مسئله، ترکیب‌های مختلف خرابی شناسگرها باید ارزیابی شوند و ترکیب‌های محتمل در شبکه بسیار زیاد هستند، در این مقاله از یک الگوریتم بهینه‌سازی به نام روش جستجوی شناور برای یافتن نتیجه بهینه استفاده می‌شود. مدل و روش پیشنهادی بر روی شبکه رایج سופالز و بخشی از شبکه شهر تهران پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل می‌تواند موقعیت شناسگرها را با در نظر گرفتن خرابی آن‌ها در شبکه با دقت قابل قبولی تعیین کند. همچنین در بخشی از فرآیند حل مسئله در این شبکه‌ها، از الگوریتم ژنتیک نیز استفاده شد که نتیجه نهایی روش جستجوی شناور نسبت به آن بهتر بود.

واژه‌های کلیدی: تخمین زمان سفر، خرابی شناسگر، روش جستجوی شناور، مسئله مکان‌یابی شناسگر

## ۱. مقدمه

تخمین زمان سفر یا بررسی مبدأ-مقصد تقسیم‌بندی شود که همه این موارد در قالب شبکه یا یک مسیر (کریدور) مورد بررسی قرار می‌گیرند.

به‌عنوان نمونه، موقعیت بهینه شناسگرهای ثابت به‌وسیله یک مدل برنامه‌ریزی دینامیک توسط بن و همکاران ارائه شده است (Ban et al., 2009) و بر اساس روش دسته‌بندی<sup>۷</sup>، مطالعه‌ای توسط کیانفر و ادرا ارائه شده تا موقعیت شناسگر در بزرگراه را تعیین کنند (Kianfar & Edara, 2010). همچنین روش‌های دیگر مانند مطالعات شبیه‌سازی خردنگر با تمرکز بر مسائل مبدأ-مقصد انجام شده است (Kim et al., 2011). مطالعات دیگری در زمینه مسائل مربوط به مبدأ-مقصد سفرها (Hadavi & Shafahi, 2016; Hu & Liou, 2014; Zhou & List, 2010; کریمی، ابراهیمی، & شتاب بوشهری، ۲۰۱۷)، پیش‌بینی زمان سفر (Park & Haghani, 2015)، مشاهده حجم جریان مسیر<sup>۸</sup> (Fu et al., 2016) و تخمین زمان سفر (Gentili & Mirchandani, 2018) نیز انجام شده است. در زمینه تخمین زمان سفر، مکان‌یابی شناسگرهای شناسایی خودرو به طور نمونه هم در سطح شبکه در مطالعه‌های (Mirchandani, Gentili, & He, 2009; Sherali, Desai, & Rakha, 2006) و هم در طول یک کریدور در مطالعه (Bartin, Ozbay, & Iyigun, 2007) انجام شده است.

فرض ایده‌آل در مسئله مکان‌یابی شناسگر، این است که شناسگرها هرگز خراب نمی‌شوند. این در حالی است که شناسگرها نیز مانند سایر تجهیزات ترافیکی، در معرض خرابی هستند و این خرابی بر قابلیت اطمینان سیستم از نظر تخمین زمان سفر اثر می‌گذارد (Salari et al., 2019). با توجه به گزارش‌های PeMS بیش از ۳۰٪ شناسگرها در کالیفرنیا در یک روز عادی خراب شدند (Zhu, Ma, & Zheng, 2016). برای مثال، یک شناسگر ممکن است به خاطر شرایط بد آب و هوایی یا نوسانات برق از کار بیفتد (Rajagopal & Varaiya, 2007). خرابی شناسگر ممکن است باعث بی‌فایده شدن اطلاعات جمع‌آوری شده توسط یک یا چند شناسگر دیگر

با توجه به افزایش تقاضای استفاده از خودروی شخصی و همچنین هزینه بالای ساخت خیابان‌های جدید، نیاز به سیستم‌های هوشمند ترافیکی در مدیریت شهری مهم شده است. مهم‌ترین مؤلفه یک سیستم حمل‌ونقل هوشمند، جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز است که معمولاً به‌وسیله شناسگرها<sup>۱</sup> انجام می‌شود. شناسگرهای مورد استفاده در این زمینه برحسب ویژگی‌های فیزیکی، نوع اطلاعات جمع‌آوری شده و مکان آن در شبکه به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند (Álvarez- Bazo et al., 2020).

شناسگرها توسط جتلی و میرچندانی به چهار دسته تقسیم‌بندی شده است (Gentili & Mirchandani, 2012): ۱- شناسگرهای شمارشگر (مانند شناسگرهای حلقه‌ای<sup>۲</sup>)، ۲- شناسگرهایی بر پایه شناسایی مسیر (مانند تجهیزات برچسب الکترونیکی<sup>۳</sup>)، ۳- شناسگرهای تصویری (مانند دوربین‌ها) و ۴- شناسگرهای شناسایی خودرو<sup>۴</sup> (که یک خودروی منحصر به فرد را در شبکه تشخیص می‌دهد). شناسگرهای مورد توجه در مقاله حاضر، در دسته چهارم قرار می‌گیرد.

حالت ایده‌آل در بحث جمع‌آوری اطلاعات این است که شناسگرها بر روی تمامی کمان‌های شبکه وجود داشته باشد؛ با این حال، این اتفاق به دلیل بار مالی آن ممکن نیست. بنابراین، مدیران حمل‌ونقل باید در جستجوی یک رویکرد بهینه و کارا درباره مکان‌یابی شناسگرها با تعداد مشخصی باشند.

مسئله مکان‌یابی شناسگر به معنای قرارگیری تعداد مشخصی از شناسگرها در شبکه است تا یک تابع هزینه مفروض را کمینه کند. مطالعات بی‌شماری در مورد مکان‌یابی شناسگر انجام شده است که می‌توان بر اساس نوع حسگرها به دو دسته اصلی زیر تقسیم‌بندی کرد: ۱- مکان‌یابی شناسگرها برای مشاهده کامل حجم جریان در شبکه<sup>۵</sup> و ۲- مکان‌یابی حسگرها برای تخمین حجم جریان در شبکه<sup>۶</sup> (Rubin & Gentili, 2021). همچنین این مطالعات می‌تواند بر اساس موضوعاتی همچون

## مکان‌یابی شناسگرهای ثبت اطلاعات ترافیکی با هدف تخمین زمان سفر با در نظر گرفتن خرابی شناسگرها در سطح شبکه

خرابی شناسگر در تخمین زمان سفر را به عنوان موضوعی بااهمیت برای مطالعات آینده برشمرده‌اند (Salari et al., 2021).

مطالعه حاضر به چالش‌های زیر در ادبیات مطالعه پرداخته است. ابتدا، موضوع تخمین زمان سفر برای مکان‌یابی انتخاب شده است تا با در نظر گرفتن خرابی مستقل هر شناسگر، مکان‌های بهینه آن‌ها شناسایی شود. دوم، هزینه دسته‌های مختلف خرابی در هر چیدمان<sup>۹</sup> بررسی می‌شود. منظور از چیدمان، ترکیب متفاوت قرارگیری شناسگرها در نقاط مختلف شبکه است. در یک شبکه با  $N$  موقعیت قرارگیری شناسگر و با تعداد  $S$  شناسگر، تعداد  $\binom{N}{S} = \frac{N!}{S! \times (N-S)!}$  چیدمان مختلف وجود دارد. همچنین در یک چیدمان با  $S$  شناسگر، تعداد  $S$  دسته خرابی وجود دارد؛ منظور از دسته خرابی این است که در هر چیدمان، چند شناسگر ممکن است باهم خراب شوند که در واقع به صورت تکی، دوتایی تا  $S$  تایی است. به عبارت دیگر از آنجایی که تعداد حالت‌های مختلف برای هر دسته خرابی زیاد است، بدترین حالت در هر دسته خرابی در نظر گرفته می‌شود (بیشترین هزینه). این موضوع یعنی گستردگی حالت‌های بررسی در سطح یک شبکه، معمولاً یک چالش در این قبیل مسائل است (Hadavi & Shafahi, 2019). سوم، حجم و مسیر بین شناسگرها برای تعیین اهمیت هر شناسگر ارزیابی می‌شود؛ به عبارت دیگر، اثر خرابی یک شناسگر در یک موقعیت مشخص می‌تواند متفاوت از شناسگر موقعیت دیگر باشد. چهارم، یک الگوریتم جستجو به نام روش جستجوی شناور<sup>۱۰</sup> برای یافتن بهترین چیدمان در میان تعداد زیاد چیدمان‌های ممکن، استفاده می‌شود.

ادامه مقاله بدین شرح تدوین شده است. علایم به کار رفته در مطالعه، در بند ۲ و یک مثال برای روشن شدن موضوع و انگیزه این مطالعه در بند ۳ آورده شده است. بندهای ۴ و ۵ به ترتیب مدل و الگوریتم حل را توضیح می‌دهند. در بند ۶، دو مثال گویا برای آزمایش مدل و الگوریتم حل مسئله و نتایج آن‌ها ارائه شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری در بند ۷ بیان می‌شود.

به دلیل وابستگی یک شناسگر پایین دست به شناسگرهای بالادست و در نتیجه باعث کاهش عملکرد سیستم حمل و نقل هوشمند شود.

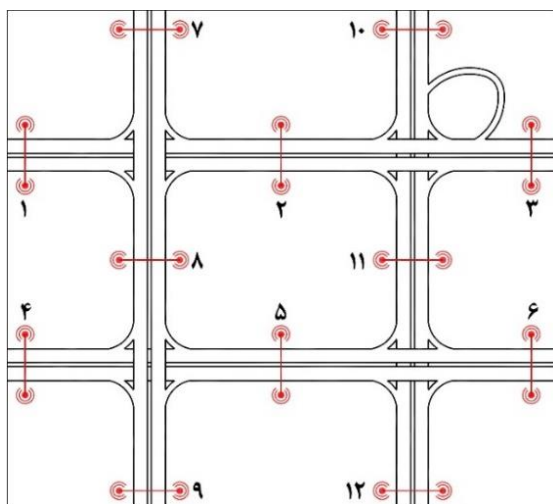
مسئله مکان‌یابی شناسگر با لحاظ خرابی آن‌ها اولین بار توسط لی و اوپانگ مطرح شد (Li & Ouyang, 2011). آن‌ها مدلی برای شناسایی موقعیت بهینه شناسگرهای تشخیص خودرو با هدف پیش‌بینی زمان سفر پیشنهاد دادند که خرابی شناسگر را در نظر می‌گرفت. این نویسندگان در مقاله دیگری با بهبود مدل‌های ریاضی برای شناسگرهای AVI در کمان‌های شبکه پرداختند (Li & Ouyang, 2012). دانچیک و همکاران با در نظر گرفتن خرابی شناسگرهای شمارشگر، سعی کردند خطای کلی نظارت عملکرد آزادراه را به حداقل برسانند (Danczyk, Di, & Liu, 2016). همچنین، ژو و همکاران، یک مدل تصادفی دوجزئی را با گنجاندن خرابی شناسگر در مدل مکان‌یابی بهینه شناسگرها برای تخمین زمان سفر در یک کریدور آزادراهی پیشنهاد کردند (Zhu et al., 2016). در تحقیقات بیشتر، سالاری و همکاران، تلاش کردند تا حداقل مجموعه کمان‌های مجهز به شناسگر شمارشگر را شناسایی کنند تا علاوه بر مشاهده کلی جریان، تأثیر خرابی شناسگر بر روی به دست آوردن جریان سایر کمان‌هایی که شناسگر ندارند نیز به حداقل برسد (Salari et al., 2019). برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در مطالعه دیگری، سالاری و همکاران، اثر خرابی شناسگرهای شمارشگر در تخمین مبدأ-مقصد سفرها را بررسی کردند (Salari et al., 2021). در آن مطالعه دو تابع هدف جداگانه برای به حداقل رساندن حداکثر اطلاعات از دست رفته مرتبط با تقاضای مبدأ-مقصد در کمان‌های دارای شناسگر معرفی شده است.

خرابی شناسگرها در مطالعات تخمین زمان سفر، کمتر مورد توجه قرار گرفته است و یا بیشتر بر روی مبحث مبدأ-مقصد سفرها تمرکز شده است (Álvarez-Bazo et al., 2022; Álvarez-Bazo et al., 2020; Salari et al., 2021; Sun et al., 2022). همچنین، سالاری و همکاران، بررسی اثر

$OD_{net}$	تعداد زوج مبدأ-مقصد در شبکه
$F$	مجموعه دسته‌های خرابی در یک چیدمان
$f$	تعداد دسته‌های خرابی
$E_f$	خطای تخمین زمان سفر در دسته خرابی $f$ شناسگر به صورت هم‌زمان
$E_P$	کل خطای تخمین زمان سفر در چیدمان $P$
$e_{S_i}$	خطای تخمین زمان سفر در حالت خرابی شناسگر قرار گرفته در نقطه $i$

### ۳. بیان مسئله در قالب یک مثال

یک شبکه نمونه مانند شکل ۱ با ۱۲ موقعیت بالقوه برای نصب شناسگر در نظر بگیرید. تمامی مسیرهای عبوری از شناسگر شماره ۱۱ در ستون اول جدول ۱ آورده شده است. فرض می‌شود که این مسیرها با استفاده از اطلاعات نرم‌افزار کلان‌نگر یا تاریخچه اطلاعات به دست آمده است و سایر مسیرهای ممکن از این نقطه عبور نمی‌کنند.



شکل ۱. شبکه نمونه با ۱۲ شناسگر

۲. علایم	
$U_s$	مجموعه شناسگرهای فعال بالادستی شناسگر $s$
$D_s$	مجموعه شناسگرهای فعال پایین‌دستی شناسگر $s$
$T_{i,j}$	زمان سفر بین شناسگر $i$ و $j$
$L_{11,j}$	فاصله بین دو شناسگر $i$ و $j$
$SP_{i,j}$	میانگین سرعت بین شناسگرهای $i$ و $j$
$N$	تعداد نقاط بالقوه برای نصب شناسگر
$M$	مکان‌های ثابت و حتمی برای نصب شناسگرهای بدون خرابی
$S_{act}$	شناسگرهای فعال با احتمال خرابی صفر که تعداد آن‌ها برابر $M$ است
$S_{fal}$	سایر شناسگرهای موجود
$S$	تعداد شناسگر موجود که $S = S_{act} + S_{fal}$
$m$	تعداد کل مسیرهای زوج مبدأ-مقصد
$r$	اندیس مسیرهای زوج مبدأ-مقصد از ۱ تا $m$
$R_r$	مجموعه نقاط بالقوه نصب شناسگر در مسیر زوج مبدأ-مقصد $r$
$j_i$	موقعیت نصب بالقوه $i$ در شبکه
$j_{rc}$	موقعیت بالقوه برای نصب شناسگر در مسیر $r$ و با شمارنده $c$
$j_{rs+}$	اولین شناسگر فعال پایین‌دست شناسگر خراب $s$ در مسیر $r$
$j_{rs-}$	اولین شناسگر فعال بالادست شناسگر خراب $s$ در مسیر $r$
$T_{ij}^g$	زمان سفر واقعی بین گره $i$ و $j$
$V_{ij}$	حجم جریان از گره $i$ به $j$
$V$	کل حجم شبکه
$TTEE_{ij}$	مجموعه‌ای از خطای تخمین زمان سفر بین گره $i$ و $j$
$TTEE_P$	خطای تخمین زمان سفر برای چیدمان مورد نظر $P$
$OD_P$	تعداد زوج مبدأ-مقصد که توسط چیدمان مورد نظر ( $P$ ) پوشش داده شده است

## مکان‌یابی شناسگرهای ثبت اطلاعات ترافیکی با هدف تخمین زمان سفر با در نظر گرفتن خرابی شناسگرها در سطح شبکه

جدول ۱. اثر خرابی شناسگر نصب شده در موقعیت شماره ۱۱

تمام مسیرهای عبوری زمان سفر یا سرعت جایگزین از شناسگر شماره ۱۱\* سرعت از دست رفته

تمام مسیرهای عبوری	زمان سفر یا	سرعت جایگزین	سرعت از دست رفته
6-11-2-7	6-11	6-3 و 6-2 و 6	-10
6-11-3	12-11	12-3 و 12-10	
6-11-10	11-2	6-2	
12-11-3	11-3	12-3 و 6-3	
12-11-10	11-7	6-7	
	11-10	12-10 و 6-10	

\* فرض شده است که شامل تمامی مسیرهای ممکن عبوری است.

اگر تعداد  $S$  شناسگر در دسترس باشد، آنگاه

$$\binom{12}{S} = \frac{12!}{S! \times (12-S)!}$$

وجود خواهد داشت. حال اگر  $S=12$  باشد و شناسگر شماره

۱۱ از کار بیفتد، شش زمان سفر از بین خواهد رفت (ستون دوم

از جدول ۱). در این حالت می‌توان از سرعت بین شناسگرهای

فعال (سالم) بالادست و پایین‌دست شناسگر ۱۱ برای تخمین

زمان سفرهای از دست رفته استفاده کرد. بالادست و پایین‌دست

شناسگر مورد نظر بر اساس جریان مبدأ-مقصد عبوری از آن

تعیین می‌شود. اگر  $U_{11}$  مجموعه شناسگرهای فعال بالادستی

شناسگر شماره ۱۱ ( $U_{11} = \{6, 12\}$ ) و  $D_{11}$  مجموعه

شناسگرهای فعال پایین‌دستی آن ( $D_{11} = \{2, 3, 10\}$ ) باشد،

آنگاه زمان سفر بین شناسگر شماره ۱۱ و شناسگر  $j$  از معادله ۱

به دست می‌آید.

$$\begin{cases} T_{j,11} = \frac{L_{j,11}}{SP_{j,d_{11}}}, & \forall j \in U_{11}, \quad d_{11} \in D_{11} \\ T_{11j} = \frac{L_{11,j}}{SP_{u_{11},j}}, & \forall j \in D_{11}, \quad u_{11} \in U_{11} \end{cases} \quad (1)$$

که در آن:

$T_{11,j}$  و  $T_{j,11}$ : زمان سفر بین شناسگر  $j$  و ۱۱ است.

$L_{11,j}$  و  $L_{j,11}$ : فاصله بین دو شناسگر  $j$  و ۱۱ در جهت رفت

و برگشت است.

$SP_{u_{11},j}$ : میانگین سرعت بین شناسگرهای بالادست ۱۱ و

شناسگر  $j$  است

پایین‌دست شناسگر شماره ۱۱ است.

در این مطالعه فرض شده است که احتمال خرابی شناسگرها

مشابه و مستقل باشد. در این مثال ( $S=12$ )، تنها یک چیدمان

امکان‌پذیر است و همان‌طور که در بند قبلی بیان شد، تعداد ۱۲

دسته خرابی وجود دارد (درواقع خرابی هم‌زمان یک یا دو تا ۱۲

شناسگر به صورت هم‌زمان). ولی تعداد ۱-۲ حالت خرابی

شناسگر وجود دارد.

این مثال اهمیت معرفی یک روش به‌منظور یافتن شناسگرهای

فعال بالادست و پایین‌دست شناسگرهای خراب، برای تخمین

زمان سفر را نشان می‌دهد (همان‌طور که در معادله ۱ بیان داده

شده است). همچنین از تنوع حالت‌های خرابی و چیدمان و

پیچیدگی مسئله مشخص می‌شود که استفاده از یک الگوریتم

مناسب برای یافتن بهترین پاسخ مهم است.

### ۴. مدل ریاضی مسئله

در این بند، توابع هدف مورد نیاز برای مکان‌یابی شناسگرها در

یک شبکه ترافیکی با در نظرگیری خرابی آن‌ها ارائه شده است.

در مورد شبکه‌ای با  $N$  موقعیت بالقوه برای نصب شناسگر، هر

موقعیت  $i$  با  $j_i$  نشان داده می‌شود. بنابراین،  $J =$

$\{j_1, j_2, j_3, \dots, j_N\}$  که در آن  $J$  همه موقعیت‌های بالقوه در

شبکه است. اگر شناسگر در  $i$  نصب شده باشد،  $X_i = 1$  در

غیر این صورت، صفر است. اگر تعداد کل شناسگرهای موجود

$$S \text{ باشد آنگاه } \sum_{i=1}^N X_i = S$$

با توجه به داده‌های زوج مبدأ-مقصد، هر مسیر ممکن است از

روی چندین مکان بالقوه نصب شناسگر عبور کند. مکان‌های

بالقوه در مسیر  $r$  به صورت  $\{j_{r1}, j_{r2}, j_{r3}, \dots\}$  نمایش داده می

شود که از بالادست به پایین‌دست مرتب شده‌اند. اگر تعداد کل

مسیرها  $m$  باشد، آنگاه:

$$R_r = \{j_{r1}, j_{r2}, j_{r3}, \dots\}, \quad \forall r = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$R = \bigcup_{r=1}^m R_r = \{R_1, R_2, \dots, R_m\} \quad (3)$$

در مرحله بعد، خطای تخمین زمان سفر برای هر کمان به صورت معادله ۶ به دست می‌آید. در یک چیدمان، به دلیل خرابی شناسگرها، ممکن است لازم باشد زمان سفر چندین کمان برآورد شود. بنابراین، از حجم جریان برای ارزیابی اهمیت این کمان‌ها استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، با استفاده از معادله ۷، میزان خطای تخمین زمان سفر یک چیدمان با در نظر گرفتن خطای کمان‌ها به دست می‌آید.

$$TTEE_{ij} = \left( \frac{|T_{ij} - T_{ij}^g|}{T_{ij}^g} \right), \quad (6)$$

$$\forall T_{ij} \in (T_{up,s} \cup T_{s,dn})$$

$$TTEE_P = \frac{\sum TTEE_{ij} \times V_{ij}}{V} \quad (7)$$

که در آن:

$TTEE_{ij}$ : مجموعه‌ای از خطای تخمین زمان سفر بین گره  $i$  و

$j$

$T_{ij}^g$ : زمان سفر واقعی بین گره  $i$  و  $j$

$V_{ij}$ : حجم جریان از گره  $i$  به  $j$

$V$ : کل حجم شبکه

$TTEE_P$ : خطای تخمین زمان سفر برای چیدمان مورد نظر  $P$

قدر مطلق در معادله ۶ باعث نادیده گرفتن اثرات منفی و مثبت خطاها می‌شود. همچنین، زمان سفر واقعی را می‌توان از داده‌های گذشته یا اطلاعات مربوط به نرم‌افزارهای کلان‌نگر یا سایر سیستم‌های در دسترس به دست آورد. در نهایت تابع هدف به صورت معادله ۸ نوشته می‌شود. لازم به ذکر است که برای در نظر گرفتن پوشش مبدأ-مقصد در شبکه، عبارت آخر به خطای تخمین زمان سفر اضافه می‌شود.

$$Z = \min \left( TTEE_P - \frac{OD_P}{OD_{net}} \right)$$

$$= \min \left( \frac{\sum TTEE_{ij} \times V_{ij}}{V} \right) \quad (8)$$

$$- \frac{OD_P}{OD_{net}}$$

که در آن:

$OD_P$ : تعداد زوج مبدأ-مقصد که توسط چیدمان مورد نظر ( $P$ )

پوشش داده شده است. اگر حداقل دو نقطه در هر مسیر مبدأ -

که در آن  $J_{rc}$  موقعیت بالقوه برای نصب شناسگر است که در مسیر  $r$  و در یک مجموعه  $R_r$  وجود دارد و به ترتیب با  $C$  شماره‌گذاری می‌شود. طبق این نماد، هر  $J_{rc}$  در واقع متناظر با یک  $J_i$  در شبکه است؛ بنابراین اگر یک شناسگر خراب در مکان  $s=i$  قرار بگیرد، آنگاه با  $J_s = J_i$  است و در هر مسیر  $r$  ممکن است یک شناسگر خراب در  $J_{rc}$  وجود داشته باشد (می‌توان آن را  $J_{rs}$  نامید).

برای هر مسیر  $r$ ، اولین شناسگر فعال پایین دست شناسگر خراب، با  $J_{rs+}$  نشان داده می‌شود (یعنی شناسگر سالم بعد از شناسگر خراب  $J_{rs-}$ ). اولین شناسگر فعال بالادست به صورت  $J_{rs-}$  نمایش داده می‌شود.

اکنون با شناسگرهای فعال بالادست و پایین دست، سرعت بین آن‌ها محاسبه شده و از این طریق، زمان سفر کمان‌ها به دست می‌آید (معادله ۴ و ۵).

$$T_{up,s} = \left\{ T_{ij} \mid i \in J_{rs-}, j = j_s, T_{ij} = \frac{L_{ij}}{SP_{i dr}}, d_r \in J_{rs+} \right\}, \quad (4)$$

$$\forall r = 1, 2, \dots, m$$

$$T_{s,dn} = \left\{ T_{ij} \mid i = j_s, j \in J_{rs+}, T_{ij} = \frac{L_{ij}}{SP_{urj}}, u_r \in J_{rs-} \right\}, \quad (5)$$

$$\forall r = 1, 2, \dots, m$$

که در آن:

$T_{up,s}$ : زمان سفر بین شناسگر فعال بالادست و شناسگر خراب

$s$

$T_{s,dn}$ : زمان سفر بین شناسگر خراب  $s$  و شناسگر فعال

پایین دست

در واقع، معادله (۴) بیان می‌کند که زمان سفر بین شناسگرهای بالادست و شناسگر خراب برابر است با فاصله بین دو شناسگر تقسیم بر سرعت بین همان شناسگرهای بالادست و شناسگرهای فعال پایین دست شناسگر  $s$ . در صورت وجود چند سرعت، میانگین آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. برای معادله (۵) نیز به همین صورت می‌توان بیان کرد.

## مکان‌یابی شناسگرهای ثبت اطلاعات ترافیکی با هدف تخمین زمان سفر با در نظر گرفتن خرابی شناسگرها در سطح شبکه

بخش ۱: چندین روش برای تعیین مکان بالقوه نصب شناسگرها وجود دارد. در این مطالعه، مکان بالقوه با توجه به محل تغییر حجم جریان (معمولاً قبل و بعد از تقاطع‌ها) تعیین می‌شود. در طول یک کمان مشخص، که در آن تغییر حجم وجود ندارد، مکان شناسگر در ابتدا، وسط یا هر نقطه‌ای از کمان تفاوت چندانی ایجاد نمی‌کند (به جز نقطه پایانی که محل تغییر حجم است). بنابراین نصب یک شناسگر در طول کمانی که تغییرات حجم در آن صفر است، کافی است. همچنین چندین مطالعه به مسئله مکان شناسگر در ابتدا، میانه یا انتهای مسیر پرداخته‌اند (به‌عنوان مثال (Moghaddam & Hellings, 2013)).

پس از شناسایی مکان‌های بالقوه و قرارگیری آن‌ها به‌عنوان یک گره<sup>۱۱</sup> در شبکه مورد نظر در نرم‌افزار PTV-VISUM، فرآیند تخصیص ترافیک انجام می‌شود. در نتیجه تمام مسیرهای زوج مبدأ-مقصد شبکه به دست آمده و در هر یک از آن‌ها، ترتیب مکان‌های بالقوه نصب استخراج می‌شود. سپس، سایر اطلاعات ضروری از جمله زمان سفر و فاصله بین گره‌ها به دست می‌آید. بخش ۲: شبکه‌ای با  $N$  موقعیت نصب و  $M$  موقعیت ثابت نصب شناسگر (مکان‌های مهم یا مکان‌هایی که قبلاً یک شناسگر وجود دارد) را در نظر بگیرید. شناسگرهای اختصاص داده شده به  $M$  موقعیت، با  $S_{act}$  (شناسگرهای فعال با احتمال خرابی صفر که تعداد آن‌ها برابر  $M$  است) و سایر شناسگرهای موجود با  $S_{fal}$  نشان داده می‌شوند (ممکن است از کار بیفتند). از این‌رو در این شبکه  $S = S_{act} + S_{fal}$  شناسگر وجود دارد. در این بخش، چیدمان شناسگرها با تعداد  $S = S_{act} + 1$  و  $S = S_{act} + 2$  شناسگر به طور کامل بررسی می‌شود تا بهترین چیدمان به دست آید. در واقع در ابتدا انواع چیدمان با تعداد  $S_{act} + 1$  شناسگر مورد بررسی قرار می‌گیرد و از آنجایی که فقط یک شناسگر می‌تواند از کار بیفتد، تعداد  $N - M$  چیدمان وجود دارد که باید بررسی شود. سپس، همه چیدمان‌ها با تعداد  $S_{act} + 2$  شناسگر، یا در واقع تعداد  $\binom{N-M}{2}$  چیدمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. چیدمانی با کمترین هزینه، انتخاب نهایی

مقصد حاوی یک شناسگر فعال باشد، مسیر، پوشش داده شده در نظر گرفته می‌شود. مجموع تمام مسیرهای تحت پوشش در چیدمان  $P$  برابر  $OD_P$  است.

$OD_{net}$ : تعداد زوج مبدأ-مقصد در شبکه که همواره  $OD_{net} \geq OD_P$  است. سایر پارامترها پیش‌تر بیان شده است.

### ۵. الگوریتم حل مسئله

فرآیند مکان‌یابی شناسگرها با در نظر گرفتن حالت‌های خرابی را می‌توان در پنج بخش زیر بیان کرد. نحوه ارتباط این بخش‌ها به صورت خلاصه در شکل ۲ نشان داده شده است. گفتنی است که جزئیات این بخش‌ها در ادامه و همچنین در شکل ۴ ارائه شده است.

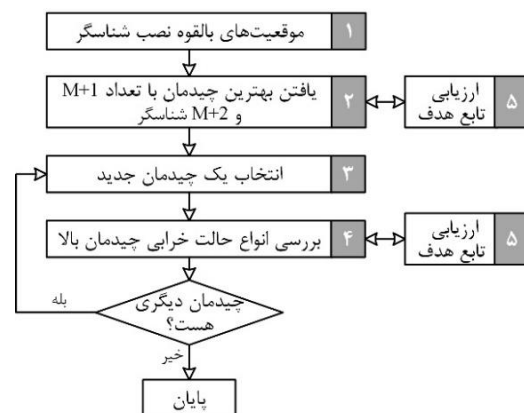
۱. تعیین موقعیت‌های بالقوه برای نصب شناسگرها و تهیه داده‌های مورد نیاز.

۲. یافتن بهترین چیدمان زمانی که تعداد  $M+1$  یا  $M+2$  شناسگر وجود دارد، که  $M$  مکان‌های ثابت و حتمی برای نصب شناسگر است. گفتنی است که فرض می‌شود این شناسگرها خراب نمی‌شوند و همیشه سالم هستند.

۳. بررسی چیدمان‌های مختلف شناسگرها

۴. پیدا کردن انواع حالت‌های خرابی شناسگر برای چیدمان به دست آمده در مرحله قبل

۵. ارزیابی تابع هدف (معادله ۸)



شکل ۲. روند پنج بخش مورد نظر

دوگانه ( $k=2$ ) مکان انتخاب شده قبلی با مکان دیگری ترکیب شده و مجدداً تمامی حالت‌های دوتایی جدید بررسی می‌شود؛ از این رو، تعداد ترکیب‌ها کاهش می‌یابد. مراحل روش جستجوی شناور در شکل ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این روش مرحله تست نیز وجود دارد. در واقع بایک فرآیند خاص، نتایج قبلی بررسی شده تا در صورت وجود یک چیدمان بهتر، به مرحله قبل بازگشته و از نتایج جدید استفاده شود (مرحله تست در شکل ۳).

در یک چیدمان خاص با تعداد  $S_{fal}$  شناسگر، به همین اندازه ( $S_{fal}$ ) دسته‌های خرابی وجود دارد که در واقع در هر دسته، تعداد ۱ تا  $S_{fal}$  شناسگر به صورت هم‌زمان از کار می‌افتند (دسته آتایی). در بخش ۴، تمام دسته‌ها تجزیه و تحلیل شده و حداکثر هزینه هر کدام به دست می‌آید و در نهایت مجموع تمام هزینه‌ها به عنوان هزینه آن چیدمان لحاظ می‌شود.

به عنوان مثال، اگر در یک چیدمان،  $S_{fal} = 4$  باشد، آنگاه خطای تخمین زمان سفر در هر دسته از خرابی‌ها یا دسته  $f$  تایی ( $F = \{1,2,3,4\}$ ) محاسبه شده (معادله ۹) و مجموع همه دسته‌ها به عنوان خطای کل آن چیدمان در نظر گرفته می‌شود (معادله ۱۰).

برای این بخش است (به این صورت انواع سناریوهای چیدمان و خرابی، محاسبه می‌شوند؛ اگرچه این تعداد شناسگر در حالت عملیاتی کم و بی‌فایده است، اما برای داشتن پاسخ اولیه و اصلاح روش جستجوی مورد استفاده در این مطالعه مفید خواهد بود).

بخش ۳: در این بخش یک شناسگر به یک موقعیت خالی در چیدمان قبلی، اختصاص داده می‌شود و مقدار تابع هدف برای چیدمان جدید به دست می‌آید. این روند برای سایر مکان‌های خالی نیز تکرار می‌شود. چیدمانی با کمترین هزینه، انتخاب نهایی این بخش خواهد بود. لازم به ذکر است که با افزایش تعداد شناسگر، تعداد حالت‌های خرابی نیز افزایش می‌یابد. این روش در واقع بیان ساده‌ای از روش جستجوی شناور است که در بخش ۴ توضیح داده شده است. بیان این نکته لازم است که بخش‌های ۳ و ۴ به طور هم‌زمان باهم کار می‌کنند؛ در واقع نتیجه بخش ۳ برای بررسی حالت‌های خرابی به بخش ۴ ارسال می‌شود.

بخش ۴: در این بخش تقریباً تمام ترکیبات خرابی شناسگرها در نظر گرفته می‌شود. این بخش در درجه اول شامل خرابی احتمالی شناسگرهای نصب شده در قسمت ۳ می‌شود. با افزایش تعداد شناسگرها یا تعداد نقاط نصب، تعداد کل انواع خرابی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. برای نمونه، در یک شبکه با ۲۰ شناسگر، بیش از یک میلیون حالت خرابی برای یک چیدمان وجود دارد. با افزایش تعداد شناسگرها به ۲۱ عدد، تعداد کل انواع خرابی به بیش از دو میلیون می‌رسد ( $2^S = 2^{21} = 2,097,152$ ). بنابراین با توجه به تعداد زیاد ترکیبات خرابی که باعث پیچیدگی در مدل‌ها می‌شود، روش جستجوی شناور برای حل چنین مسئله‌ای پیشنهاد می‌شود.

در واقع در روش جستجوی شناور، به جای جستجوی کامل در پاسخ‌های ممکن، به صورت هدفمند، تعداد جستجو را کاهش می‌دهد. به طور کلی در این روش ابتدا برای انتخاب  $m$  مکان از  $n$  مکان ( $m \leq n$ ) فقط یک مکان بررسی می‌شود که  $k=1$  که  $k$  تعداد مکان است) و مقدار تابع هدف برای همه حالت‌های  $k=1$  بررسی می‌شود و بهترین مکان انتخاب می‌شود. سپس در ترکیب

مکان‌یابی شناسگرهای ثبت اطلاعات ترافیکی با هدف تخمین زمان سفر با در نظر گرفتن خرابی شناسگرها در سطح شبکه

$$E_p = \sum_{f=1}^F E_f \quad (10)$$

که در آن:

$e_{s_i}$ : خطای تخمین زمان سفر در حالت خرابی شناسگر قرار

گرفته در نقطه  $i$

$f$ : تعداد دسته‌های خرابی که برابر با تعداد شناسگرهای خراب

شونده است (1 تا  $S_{fal}$ )

$E_f$ : خطای تخمین زمان سفر در دسته خرابی  $f$  شناسگر

به صورت هم‌زمان

$E_p$ : کل خطای تخمین زمان سفر در چیدمان  $P$

برای یافتن بحرانی‌ترین حالت خرابی، از روش جستجوی شناور

استفاده می‌شود. برای این منظور تابع هزینه در (-1) ضرب می

شود تا کمترین هزینه به بیشترین هزینه یا حداکثر خطا تبدیل

شود. مجموع هزینه‌های هر دسته خرابی ( $f$  دسته)، به‌عنوان

خطای نهایی در نظر گرفته می‌شود. موقعیت روش جستجوی

شناور برای این منظور در شکل 4 که در واقع نشان‌دهنده فرآیند

کلی مطالعه است، مشخص شده است (کادر جستجوی شناور-

خرابی). گفتنی است که در این شکل کادر دیگری با عنوان

الگوریتم ژنتیک وجود دارد که در بند 5 مطالعه به آن اشاره

خواهد شد.

بخش 5: شامل یافتن شناسگرهای فعال پایین‌دست و بالادست،

محاسبه سرعت جایگزین و در نهایت به دست آوردن مقدار تابع

هدف است. در بخش‌های 2 و 4 مقدار تابع هدف باید به دست

آید (شکل 2).

## 6. نمونه‌های مطالعاتی

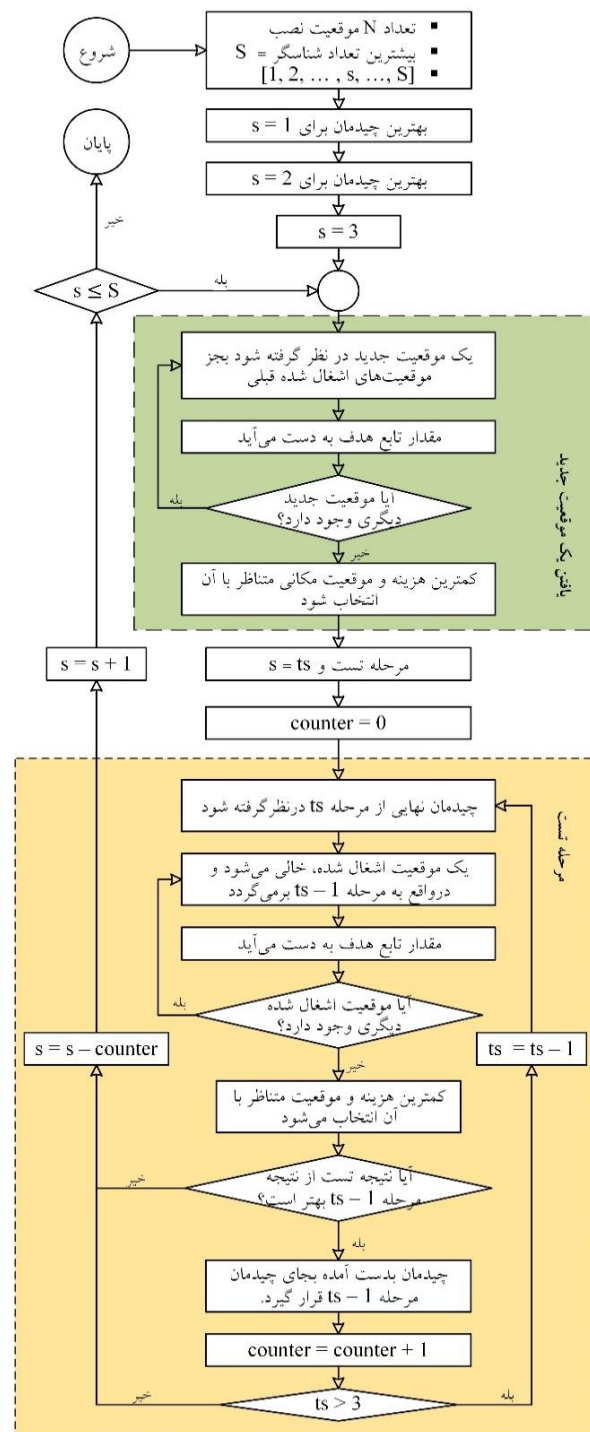
در این بند، دو نمونه به‌منظور بررسی کاربرد مدل ارائه شده در

شبکه‌های مختلف با اندازه و پیچیدگی مختلف آورده شده است.

اولین مورد شبکه Sioux Falls است (متداول در مطالعات

حمل‌ونقل و اطلاعات آن از ("Transportation

Networks for Research," 2019 دریافت شده است)



شکل 3. الگوریتم روش جستجوی شناور

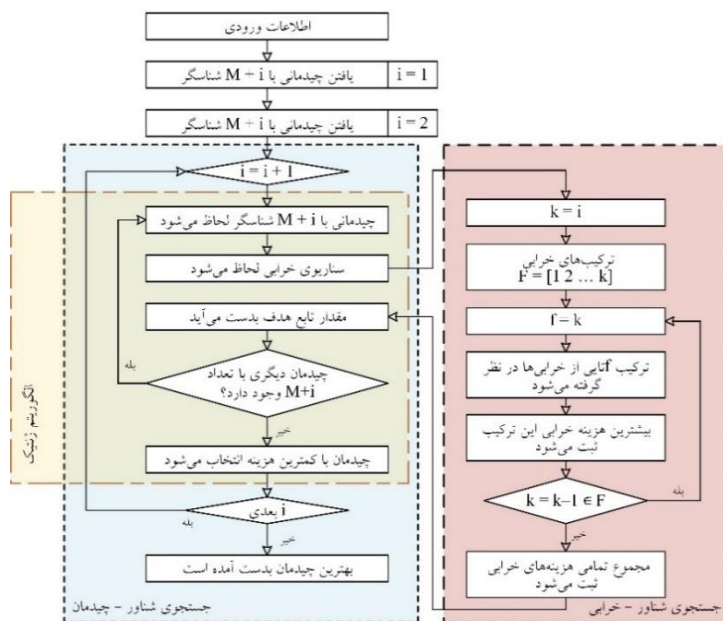
$$E_{f=1} = \max(e_{s_1}, e_{s_2}, e_{s_3}, e_{s_4})$$

$$E_{f=2} = \max(e_{s_{1,2}}, e_{s_{1,3}}, e_{s_{1,4}}, e_{s_{2,3}}, e_{s_{2,4}}, e_{s_{3,4}})$$

$$E_{f=3} = \max(e_{s_{1,2,3}}, e_{s_{1,2,4}}, e_{s_{1,3,4}}, e_{s_{2,3,4}})$$

$$E_{f=4} = \max(e_{s_{1,2,3,4}})$$

(از ۱ تا  $S$ ) بررسی می‌شود ولی در الگوریتم ژنتیک، تنها برای یک مقدار پیش فرض از شناسگرها، جواب نهایی به دست می‌آید. به همین دلیل کادر مشخص شده با عنوان «الگوریتم ژنتیک» با کادر «روش جستجوی شناور» متفاوت است. گفتنی است که بخش بررسی خرابی‌ها فقط با استفاده از الگوریتم جستجوی شناور انجام می‌شود (بخش ۴ در بند ۴).



شکل ۴. روند کلی حل مسئله

ستون‌ها، شماره موقعیت نصب و در ردیف‌ها، تعداد شناسگرهای شبکه مشخص شده است. همچنین خانه توپر نشان‌دهنده شناسگری است که در آن مکان قرار دارد و خانه سفید به معنای عدم وجود شناسگر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چیدمان شناسگرها در ردیف‌های مختلف لزوماً یکسان نیست. به‌عنوان مثال، در ردیف‌های ۲۱ و ۲۲، چیدمان‌های مختلفی به دست آمده است. شکل ۶ دو چیدمان مختلف شناسگر را روی شبکه نشان می‌دهد.

همان‌طور که در ابتدای این بند بیان شد، می‌توان از الگوریتم ژنتیک برای یافتن چیدمان استفاده کرد و باید توجه داشت که بررسی سناریوهای خرابی فقط با روش جستجوی شناور امکان‌پذیر است (شکل ۴). در نتیجه، شکل ۷-الف نتایج الگوریتم ژنتیک را برای حل مسئله در شبکه سو فالز با ۱۶ شناسگر نشان

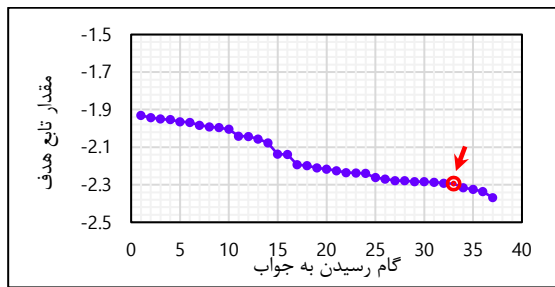
که توسط چندین پژوهشگر بررسی شده است (به‌عنوان مثال (Ng, 2012; Xu et al., 2016)). دومین مورد بخشی از شبکه بزرگراه‌های شهر تهران است. به‌منظور مقایسه نتایج، بخش دوم مسئله با الگوریتم ژنتیک به جای روش جستجوی شناور حل شده که موقعیت الگوریتم ژنتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. در روش جستجوی شناور، تمامی تعداد شناسگر ممکن

## ۱-۶ شبکه سو فالز

شبکه Sioux Falls دارای ۲۴ گره و ۳۸ کمان است که مابین این گره‌ها که در واقع تقاطع‌های شبکه است، به‌عنوان مکان بالقوه نصب شناسگر در نظر گرفته می‌شوند (۳۸ نقطه بالقوه مطابق شکل ۵)؛ با این فرض که شناسگر قرار گرفته در نقطه ۵ بدون خرابی است (همیشه سالم و به‌عنوان مکان ثابت نصب شناسگر). این نقطه از آنجایی انتخاب شد که بیشترین تعداد زوج مبدأ-مقصد (۱۶۱ از ۷۵۰) را پوشش می‌دهد.

در این شبکه با استفاده از روش جستجوی شناور می‌توان تمامی پاسخ‌های مسئله برای مکان ۲ تا ۳۸ شناسگر را به دست آورد (بر اساس تعداد شناسگرهای موجود، یک پاسخ را می‌توان انتخاب کرد). در پیوست (شکل ۱۲)، چیدمان نهایی برای تعداد متفاوتی از شناسگرها نشان داده شده است. در این شکل، در

## مکان‌یابی شناسگرهای ثبت اطلاعات ترافیکی با هدف تخمین زمان سفر با در نظر گرفتن خرابی شناسگرها در سطح شبکه

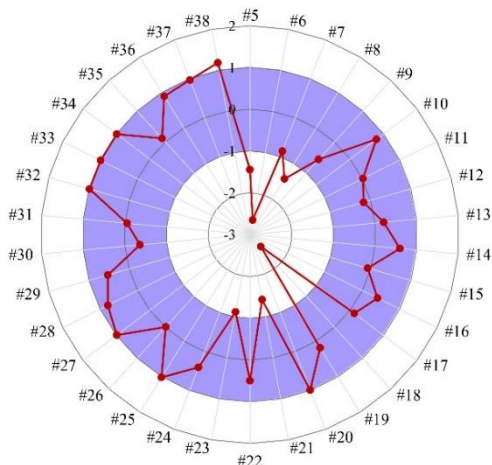


ب- روند الگوریتم جستجوی شناور

شکل ۷. روند دستیابی به آخرین نتیجه در شبکه سوفالز با

تعداد ۱۶ شناسگر (۱۵ + یک عدد ثابت)

نتایج مربوط به خرابی یک عدد شناسگر در چیدمان‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است که تغییرات مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد (مقادیر نرمال شده‌اند). یک تغییر قابل توجه در نقطه ۱۸ بیان‌کننده این است که تعداد بهینه نصب شناسگر می‌تواند ۱۸ عدد باشد. این بدان معنی است که وابستگی چیدمان شناسگر به یکدیگر در این تعداد خاص افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با از کار افتادن حتی یک شناسگر، مقدار تابع هدف شدیداً تغییر می‌کند. زمانی که محدودیت بودجه وجود دارد و انتخاب تعداد مناسب شناسگر مورد سؤال است، این تحلیل می‌تواند مفید باشد.



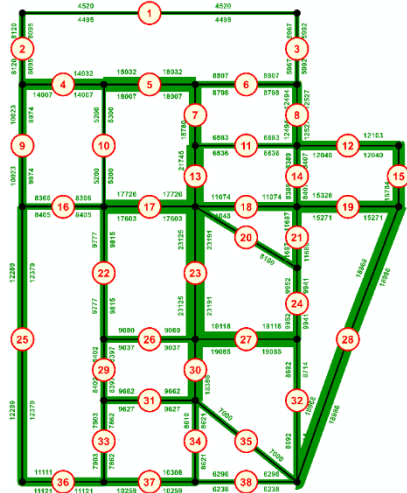
شکل ۸. نتیجه خرابی یک عدد شناسگر در چیدمانی با تعداد

مشخصی از شناسگرها در شبکه سوفالز

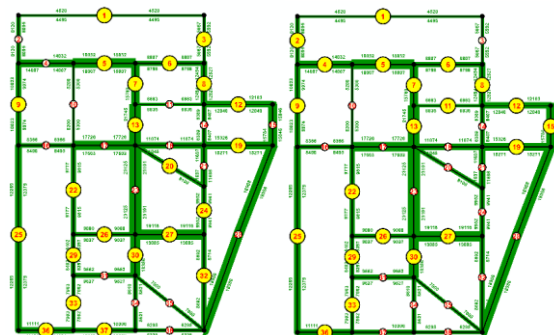
### ۲-۶ شبکه تهران

در این قسمت بخشی از شبکه تهران با بیش از ۱۰۰۰ گره و ۲۰۰۰ کمان انتخاب شده است (شکل ۹). برای این شبکه ۴۱ مکان به‌عنوان موقعیت بالقوه نصب در نظر گرفته شده است.

می‌دهد. همچنین در شکل ۷-ب، الگوی نتایج الگوریتم جستجوی شناور نمایش داده شده است. دایره قرمز در شکل ۷-ب نتیجه نهایی مسئله توسط الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در نتیجه پاسخ بهتر توسط جستجوی شناور به دست آمده است.



شکل ۵. شبکه سوفالز و حجم روی هر کمان

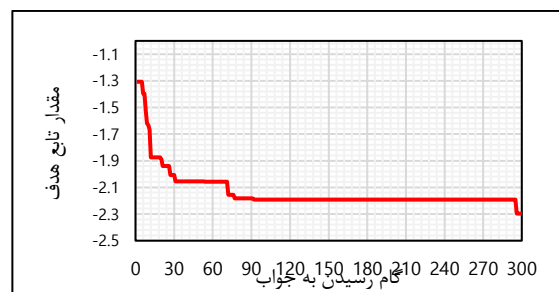


تعداد ۲۲ شناسگر

تعداد ۲۱ شناسگر

شکل ۶. دو چیدمان مختلف با تعداد شناسگر متفاوت در شبکه

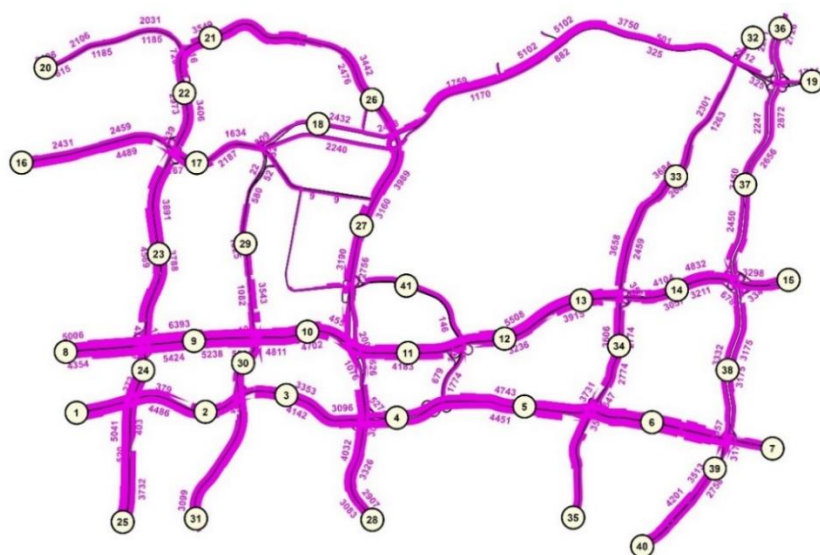
سوفالز



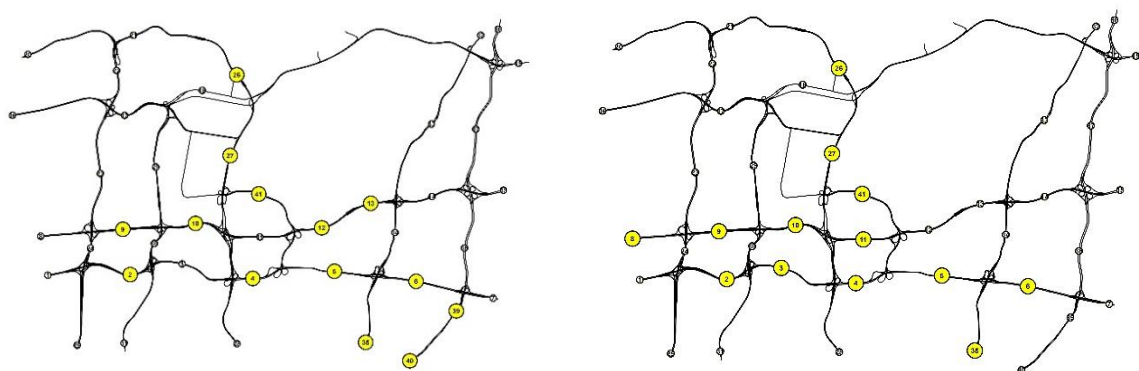
الف- روند الگوریتم ژنتیک

مشابه مثال قبلی، شکل ۱۱-الف نتایج الگوریتم ژنتیک را برای شبکه تهران با ۱۷ شناسگر نشان می‌دهد. در شکل ۱۱-ب نیز الگوی نتایج جستجوی شناور برای همین تعداد شناسگر یعنی ۱۷ عدد نمایش داده شده است. دایره قرمز در شکل ۱۱-ب نتیجه نهایی مسئله را توسط الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، پاسخ بهتری با استفاده از روش جستجوی شناور به دست آمده است.

همان‌طور که در بند ۵ بیان شد، دلیل انتخاب آن‌ها تغییر حجم در این گره‌ها است. سه شناسگر قرار گرفته در نقاط ۵، ۱۰ و ۲۷ ثابت و قابل‌اعتماد هستند (یعنی احتمال خرابی آن‌ها صفر و موقعیت نصب آن‌ها ثابت است). این نقاط از آنجایی انتخاب شوند که حداکثر تعداد زوج مبدأ-مقصد را پوشش می‌دهند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، با استفاده از روش جستجوی شناور می‌توان تمام پاسخ‌های ۴ تا ۴۱ موقعیت شناسگر را به دست آورد. در شکل ۱۰ دو چیدمان مختلف شناسگر نشان داده شده است.



شکل ۹. بخشی از شبکه شهر تهران و حجم روی کمان‌های آن

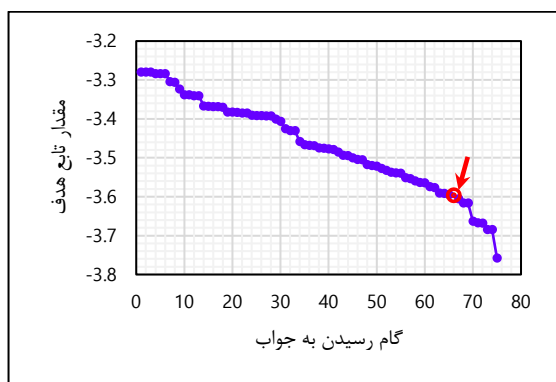


۱۴ شناسگر

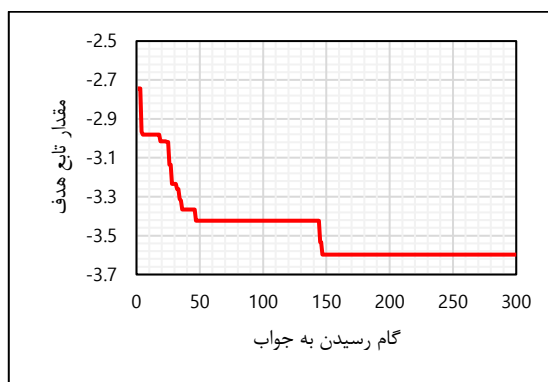
۱۳ شناسگر

شکل ۱۰. دو چیدمان متفاوت شناسگر در شبکه تهران

مکان‌یابی شناسگرهای ثبت اطلاعات ترافیکی با هدف تخمین زمان سفر با در نظر گرفتن خرابی شناسگرها در سطح شبکه



ب- روند الگوریتم جستجوی شناور



الف- روند الگوریتم ژنتیک

شکل ۱۱. روند دستیابی به آخرین نتیجه در شبکه تهران با تعداد ۱۷ شناسگر (۱۴ + ۳ عدد ثابت)

شناسگرها می‌توان از شناسگرهای حلقه‌ای به‌عنوان پشتیبان و تکمیل‌کننده اطلاعات استفاده کرد. با این حال، داشتن چند نوع شناسگر در شبکه و قرارگیری آن‌ها در مدل‌ها، پیچیدگی مسئله را بسیار افزایش می‌دهد.

#### ۸. پی‌نوشت‌ها

1. Sensors
2. Loop detectors
3. Tag readers
4. Automatic Vehicle Identification (AVI)
5. Flow-Observability Problems
6. Flow-Estimation Problems
7. Clustering-based methodology
8. Route flow observation
9. Allocation
10. Floating Search Method
11. Node

#### ۹. مراجع

- کریمی، هادی، ابراهیمی، علی و شتاب بوشهری، سید نادر. (۲۰۱۷). مکان‌یابی بهینه شمارشگرهای ترافیکی در شبکه برای به روز رسانی ماتریس تقاضای سفر با استفاده از استنباط بیزین (مطالعه موردی: شهر اصفهان). فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۸(۳)، ۴۷۱-۴۵۱.

- Álvarez-Bazo, Fernando, Cerulli, Raffaele, Sánchez-Cambronero, Santos, Gentili, Monica, & Rivas, Ana. (2022). An iterative

#### ۷. نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی اثر خرابی شناسگر بر فرآیند تخمین زمان سفر می‌پردازد. مکان بهینه شناسگرها با لحاظ مستقل بودن خرابی شناسگرها می‌تواند به افزایش قابلیت اطمینان سیستم کمک کند. تابع هدف، یک مدل ریاضی برای به حداقل رساندن خطای تخمین زمان سفر با در نظر گرفتن سناریوهای خرابی و با حداکثر پوشش زوج مبدأ-مقصد در خطای تخمین زمان سفر، حجم و مسیر بین شناسگرها برای تعیین اهمیت هر شناسگر به کار گرفته شده است.

روش جستجوی شناور برای رسیدن به یک نتیجه مناسب در کنار سناریوهای مختلف خرابی در هر چیدمان معرفی شد. این روش با پیچیدگی عددی بسیار کمتر از روش‌های دیگر، برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. مدل‌های پیشنهادی در شبکه های سوفالز و تهران پیاده‌سازی شده‌اند. به‌منظور یافتن چیدمان‌های مناسب، از هر دو روش جستجوی شناور و الگوریتم ژنتیک استفاده شد که نشان می‌دهد چیدمان نهایی توسط روش جستجوی شناور نتیجه بهتری دارد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، سناریوهای خرابی فقط توسط روش جستجوی شناور مورد بررسی قرار گرفت و امکان بررسی آن توسط الگوریتم ژنتیک وجود ندارد.

برای کارهای آینده می‌توان مدل مکان‌یابی شناسگرها را با حضور شناسگرهای حلقه‌ای نیز بررسی کرد. در واقع، در زمان خرابی

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره چهارم (۶۱) / تابستان ۱۴۰۳

Transportation research part C: emerging technologies, 24, 227-255.

– Gentili, M, & Mirchandani, Pitu B. (2018). Review of optimal sensor location models for travel time estimation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 90, 74-96.

– Hadavi, Majid, & Shafahi, Yousef. (2016). Vehicle identification sensor models for origin–destination estimation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 89, 82-106.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.03.011>

– Hadavi, Majid, & Shafahi, Yousef. (2019). Vehicle identification sensors location problem for large networks. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 389-402.  
doi: 10.1080/15472450.2018.1506339

– Hu, Shou-Ren, & Liou, Han-Tsung. (2014). A generalized sensor location model for the estimation of network origin–destination matrices. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, 93-110.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.004>

– Kianfar, Jalil, & Edara, Praveen. (2010). Optimizing freeway traffic sensor locations by clustering global-positioning-system-derived speed patterns. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(3), 738-747.

– Kim, Joonhyo, Park, Byungkyu Brian, Lee, Joyoung, & Won, Jongsun. (2011). Determining optimal sensor locations in freeway using genetic algorithm-based optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24(2), 318-324.

– Li, Xiaopeng, & Ouyang, Yanfeng. (2011). Reliable sensor deployment for network traffic surveillance. *Transportation research part B: methodological*, 45(1), 218-231.

multiparametric approach for determining the location of AVI sensors for robust route flow estimation. *Computers & Operations Research*, 138, 105596.

– Álvarez-Bazo, Fernando, Sánchez-Cambronero, Santos, Vallejo, David, Glez-Morcillo, Carlos, Rivas, Ana, & Gallego, Inmaculada. (2020). A low-cost automatic vehicle identification sensor for traffic networks analysis. *Sensors*, 20(19), 5589.

– Ban, Xuegang, Herring, Ryan, Margulici, J.D., & Bayen, Alexandre M. (2009). Optimal Sensor Placement for Freeway Travel Time Estimation. In K. W. H. Lam, C. S. Wong & K. H. Lo (Eds.), *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee: Papers selected for presentation at ISTTT18, a peer reviewed series since 1959* (pp. 697-721). Boston, MA: Springer US.

– Bartin, Bekir, Ozbay, Kaan, & Iyigun, Cem. (2007). Clustering-based methodology for determining optimal roadway configuration of detectors for travel time estimation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.

– Danczyk, Adam, Di, Xuan, & Liu, Henry X. (2016). A probabilistic optimization model for allocating freeway sensors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, 378-398.

– Fu, Chenyi, Zhu, Ning, Ling, Shuai, Ma, Shoufeng, & Huang, Yongxi. (2016). Heterogeneous sensor location model for path reconstruction. *Transportation Research Part B: Methodological*, 91, 77-97.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.04.013>

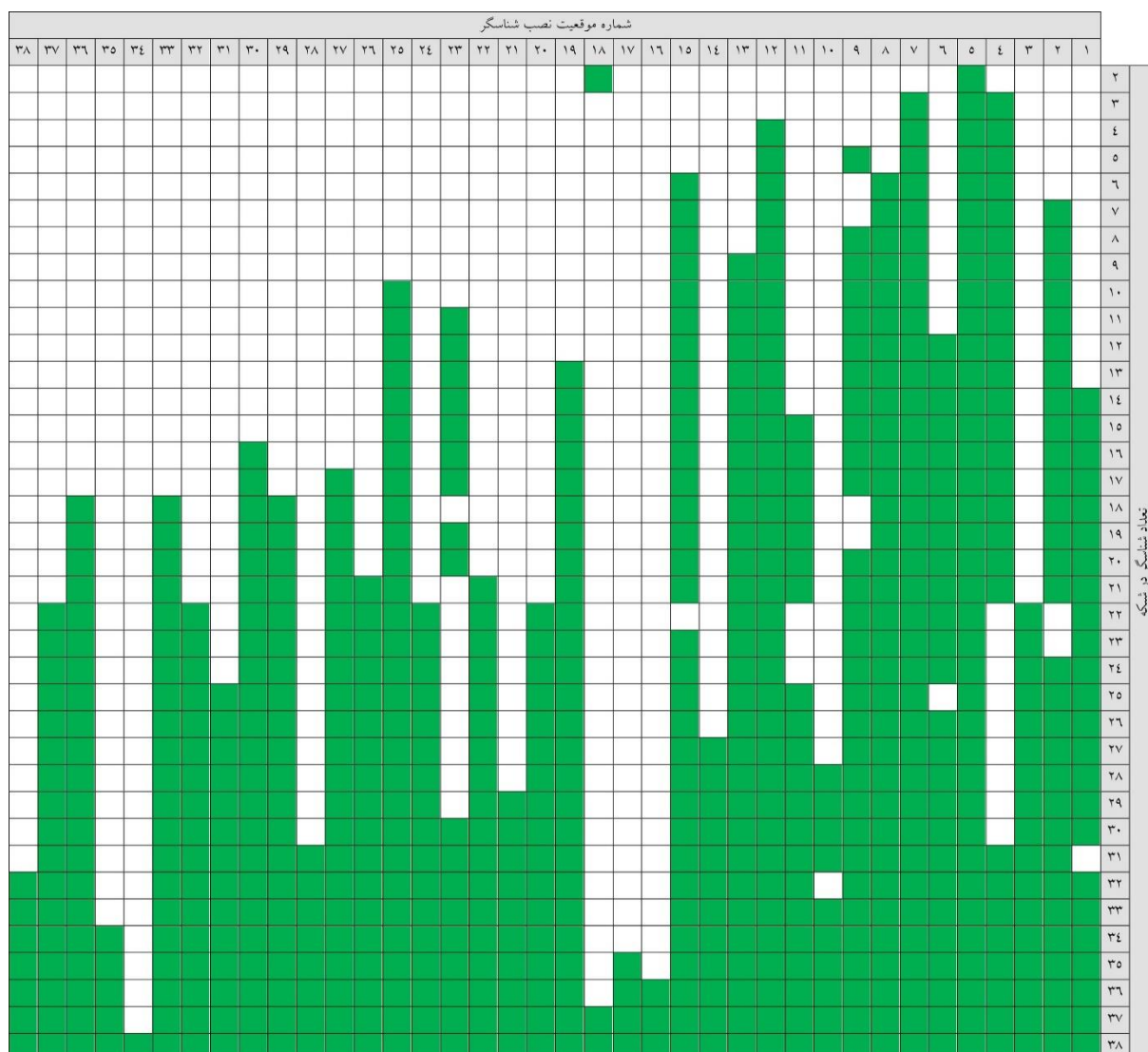
– Gentili, M, & Mirchandani, PB. (2012). Locating sensors on traffic networks: Models, challenges and research opportunities.

- Salari, Mostafa, Kattan, Lina, Lam, William H. K., Esfeh, Mohammad Ansari, & Fu, Hao. (2021). Modeling the effect of sensor failure on the location of counting sensors for origin-destination (OD) estimation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 132, 103367.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103367>
- Salari, Mostafa, Kattan, Lina, Lam, William HK, Lo, HP, & Esfeh, Mohammad Ansari. (2019). Optimization of traffic sensor location for complete link flow observability in traffic network considering sensor failure. *Transportation Research Part B: Methodological*, 121, 216-251.
- Sherali, Hanif D, Desai, Jitamitra, & Rakha, Hesham. (2006). A discrete optimization approach for locating automatic vehicle identification readers for the provision of roadway travel times. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(10), 857-871.
- Sun, Weiwei, Shao, Hu, Wu, Ting, Shao, Feng, & Fainman, Emily Zhu. (2022). Reliable location of automatic vehicle identification sensors to recognize origin-destination demands considering sensor failure. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 136, 103551.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103551>
- Transportation Networks for Research. (2019). from <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks>.
- Xu, Xiangdong, Lo, Hong K., Chen, Anthony, & Castillo, Enrique. (2016). Robust network sensor location for complete link flow observability under uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 88, 1-20.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.03.006>
- Li, Xiaopeng, & Ouyang, Yanfeng. (2012). Reliable traffic sensor deployment under probabilistic disruptions and generalized surveillance effectiveness measures. *Operations research*, 60(5), 1183-1198.
- Mirchandani, Pitu B, Gentili, M, & He, Yuhong. (2009). Location of vehicle identification sensors to monitor travel-time performance. *Intelligent Transport Systems, IET*, 3(3), 289-303.
- Moghaddam, Soroush, & Hellinga, Bruce. (2013). Quantifying Measurement Error in Arterial Travel Times Measured by Bluetooth Detectors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2395), 111-122.
- Ng, ManWo. (2012). Synergistic sensor location for link flow inference without path enumeration: A node-based approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(6), 781-788.
- Park, Hyoshin, & Haghani, Ali. (2015). Optimal number and location of Bluetooth sensors considering stochastic travel time prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 203-216.
- Rajagopal, Ram, & Varaiya, Pravin Pratap. (2007). Health of California's loop detector system: California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California at Berkeley.
- Rubin, Paul, & Gentili, Monica. (2021). An exact method for locating counting sensors in flow observability problems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 123, 102855.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102855>

– Zhou, Xuesong, & List, George F. (2010). An information-theoretic sensor location model for traffic origin-destination demand estimation applications. *Transportation science*, 44(2), 254-273.

– Zhu, Ning, Ma, Shoufeng, & Zheng, Liang. (2016). Travel time estimation oriented freeway sensor placement problem considering sensor failure. *Journal of Intelligent Transportation Systems*(just-accepted).

doi: 10.1080/15472450.2016.1194206



شکل ۱۲. موقعیت نصب نهایی هر شناسگر با توجه به تعداد آن‌ها در شبکه سופالز

رضا دهستانی بافقی، محمود احمدی نژاد

رضا دهستانی بافقی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-عمران را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه اصفهان دریافت نمود. ایشان در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- برنامه ریزی حمل و نقل از دانشگاه علم و صنعت ایران شد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، مهندسی ترافیک، شبیه‌سازی ترافیکی و حمل و نقل هوشمند است.



محمود احمدی نژاد، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۴ و ۱۳۶۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود. ایشان در سال ۱۳۷۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران - مهندسی و برنامه‌ریزی حمل و نقل از دانشگاه علم و صنعت ایران شد. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدیریت و ایمنی ترافیک، اقتصاد و برنامه‌ریزی حمل و نقل بوده و در حال حاضر عضو هیئت علمی با مرتبه دانشیاری در دانشگاه علم و صنعت ایران است.

