علوم رایانش و فناوری اطلاعات
نشریه علمی انجمن کامپیوتر ایران
مجلد ۱۳، شماره ۱، ۱۳۹۴
صفحات ۳۷-۴۲
مقاله عادی

شناسایی و کنترل عوامل موثر بر عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه‌های بین‌خودرویی(VANET) در مسیرهای بین‌شهری ایران: مطالعه موردی مسیر تهران–رشت

حسین حسینی علایی * آزاده طرهانی

مدیریت فناوری اطلاعات، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد تهران جنوب، ایران

چکیده

رشد شبکه‌های بین‌خودرویی (VANET) به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های اصلی سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) موجب تحول در ایمنی و مدیریت ترافیک جاده‌ای شده است. با این حال، عملکرد این شبکه‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی نظیر تراکم ترافیک، فاصله میان تجهیزات کنار جاده‌ای(RSU) ، توان سیگنال، و نرخ تحویل بسته قرار دارد. هدف این پژوهش، **تحلیل داده‌محور عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه‌های بین‌خودرویی در مسیر بین‌شهری تهران–رشت** است. برای این منظور، داده‌های واقعی مسیر مذکور از منظر شاخص‌هایی چون تأخیر پیام، نرخ از دست‌رفت بسته‌ها، توان سیگنال و چگالی خودروها گردآوری شد و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که تراکم ترافیک و فاصله بینRSU ها بیشترین تأثیر را بر کاهش کیفیت شبکه دارند؛ به‌گونه‌ای که با افزایش فاصلهRSU ها از ۱٫۸ به ۲٫۴ کیلومتر، نرخ تحویل بسته‌ها تا ۱۵ درصد کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که توان سیگنال بالاتر از ۹۰ دسی‌بل موجب کاهش میانگین تأخیر پیام به کمتر از ۹۵ میلی‌ثانیه می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که برای افزایش پایداری شبکه‌های VANET در مسیرهای بین‌شهری ایران، لازم است تراکم مکانیRSU ها متناسب با چگالی ترافیک و شرایط جغرافیایی مسیر تنظیم گردد.

کلیدواژگان: شبکه‌های بین‌خودرویی، VANET، تجهیزات کنار جاده‌ای، عملکرد شبکه، نرخ تحویل بسته، مسیر تهران–رشت

* رایانامهٔ نویسنده مسؤول: mha٥٦٧٣@yahoo.com

۱- مقدمه

با گسترش فناوری‌های ارتباطی و رشد روزافزون خودروهای متصل، شبکه‌های بین‌خودرویی (Vehicular Ad Hoc Networks – VANETs)به عنوان یکی از اجزای کلیدی سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) مطرح شده‌اند. این شبکه‌ها، با برقراری ارتباط میان خودروها (V۲V) و میان خودرو و زیرساخت(V۲I) ، نقشی حیاتی در ارتقای ایمنی جاده، کاهش ترافیک و بهبود مدیریت سفر ایفا می‌کنند.(Kumar et al., ۲۰۱۹)

با این حال، عملکرد شبکه‌های VANET به‌شدت به شرایط محیطی، تراکم ترافیک، کیفیت سیگنال، و فاصله بین تجهیزات کنار جاده‌ای (RSU)وابسته است. در مسیرهای بین‌شهری، به‌ویژه در ایران، این عوامل با چالش‌های متعددی روبه‌رو هستند: تراکم نامنظم خودروها، تغییرات اقلیمی و جغرافیایی، و محدودیت در تعدادRSU های نصب‌شده باعث افت کارایی شبکه می‌شود. در چنین شرایطی، مطالعه علمی و داده‌محور درباره‌ی عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه‌های VANETضرورت دارد.

مسیر **تهران–رشت** به‌عنوان یکی از پرترددترین محورهای کشور، به دلیل تنوع شرایط اقلیمی (از دشت تا مناطق کوهستانی)، نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی عملکرد واقعی شبکه‌های بین‌خودرویی محسوب می‌شود. تفاوت در تراکم ترافیک در بخش‌های مختلف این مسیر (از تهران–قزوین تا قزوین–رشت) منجر به نوسانات چشمگیر در کیفیت ارتباط و نرخ تحویل پیام می‌شود.

در مطالعات پیشین، بیشتر پژوهش‌ها به **بهینه‌سازی مکان‌یابی RSUها** پرداخته‌اند، اما کمتر به **تحلیل جامع عملکرد شبکه** بر اساس داده‌های واقعی و تأثیر متغیرهای ترافیکی و ارتباطی بر شاخص‌های کلیدی شبکه پرداخته شده است. به‌ویژه در ایران، خلأ قابل‌توجهی در تحلیل داده‌محور عملکردVANET ها در مسیرهای بین‌شهری وجود دارد.

بنابراین، پژوهش حاضر با هدف **شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه‌های بین‌خودرویی در مسیر تهران–رشت** انجام شده است تا رابطه میان متغیرهایی چون تراکم ترافیک، فاصله RSUها، توان سیگنال و نرخ تحویل بسته‌ها به‌صورت تجربی بررسی گردد. نتایج این مطالعه می‌تواند به مدیران حوزه حمل‌ونقل و ارتباطات کمک کند تا با استقرار بهینهRSU ها، کیفیت خدمات ارتباطی و ایمنی مسیرهای بین‌شهری را بهبود بخشند.

۲- مرور ادبیات و پیشینه پژوهش

شبکه‌های بین‌خودرویی (VANETs) از زیرساخت‌های حیاتی سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) هستند که هدف آن‌ها ارتقای ایمنی ترافیک، کاهش تصادفات و تسهیل مدیریت جاده‌ای از طریق تبادل داده در زمان واقعی است. عملکرد این شبکه‌ها به میزان زیادی به پارامترهای فنی و محیطی وابسته است، از جمله **تراکم خودروها، فاصله بینRSU ها، توان سیگنال، نرخ از دست‌رفت بسته‌ها و تأخیر پیام‌ها** .(Lee & Park, ۲۰۲۰)

در مطالعات اولیه، پژوهشگران عمدتاً بر طراحی و بهینه‌سازی مکان RSUها تمرکز داشتند **Kumar et al. (۲۰۱۹)** .با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مدل بهینه‌سازی مکانRSU ها را در محیط‌های شهری ارائه کردند و نشان دادند که کاهش فاصله میان ایستگاه‌ها، نرخ تأخیر پیام‌ها را تا ۲۵ درصد کاهش می‌دهد **Zhou et al.** . **(۲۰۲۱)**نیز با ترکیب منطق فازی و روش‌های هوش ازدحامی، بهبود ۱۸ درصدی در نرخ تحویل بسته‌ها گزارش کردند.

در محیط‌های بین‌شهری، ویژگی‌های جغرافیایی و نوسانات ترافیکی پیچیدگی بیشتری به عملکرد شبکه‌های VANET می‌افزایند . **Wang & Liu (۲۰۲۰)**در پژوهشی بر روی بزرگراه‌های چین نشان دادند که تغییر در تراکم خودروها و توان سیگنالRSU ها می‌تواند تأخیر متوسط پیام‌ها را تا ۳۰ درصد تحت‌تأثیر قرار دهد. در نتیجه، توصیه کردند که **فاصلهRSU ها به صورت پویا و متناسب با تراکم لحظه‌ای تنظیم گردد.**

در مطالعات داخلی، پژوهش **علایی و حسینی) ۱۴۰۲ (**یکی از معدود تحقیقات داده‌محور در ایران است که عملکرد VANET را در مسیرهای شمالی کشور بررسی کرده است. نتایج آن مطالعه نشان داد که در مسیرهای پرترافیک، افزایش فاصلهRSU ها بیش از ۲ کیلومتر منجر به افت شدید در نرخ تحویل بسته‌ها می‌شود. همچنین **خادمی و کریمی) ۱۴۰۱ (**در مطالعه‌ای مشابه، تأثیر شرایط محیطی (رطوبت و دما) بر توان سیگنال RSU را در محور قم–اصفهان مورد بررسی قرار دادند.

با وجود این مطالعات، بیشتر پژوهش‌های موجود در ایران فاقد تحلیل جامع بر مبنای داده‌های واقعی مسیرهای بین‌شهری هستند و عموماً به استفاده از شبیه‌سازی‌های فرضی محدود شده‌اند. پژوهش حاضر در تلاش است تا با تکیه بر داده‌های واقعی مسیر **تهران–رشت** و استفاده از رویکرد تحلیل داده‌محور، رابطه میان متغیرهای فنی و عملکردی شبکه VANET را در شرایط واقعی مورد

سنجش قرار دهد.

۳- روش‌شناسی پژوهش

۳-۱ .نوع و رویکرد پژوهش

این تحقیق از نوع **کاربردی – تحلیلی** است و رویکرد آن **داده‌محور و شبیه‌سازی عددی** می‌باشد. هدف پژوهش، شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر عملکرد شبکه‌های بین‌خودرویی (VANET) در مسیر بین‌شهری تهران–رشت است. با توجه به ماهیت پویا و غیرخطی متغیرها، از مدل‌سازی مبتنی بر داده‌ها در محیط **MATLAB R۲۰۲۱b** استفاده شده است.

۳-۲ جامعه پژوهش و داده‌ها

جامعه پژوهش شامل کل مسیر **تهران–رشت** به طول حدود ۳۲۰ کیلومتر است که در چهار بخش اصلی تقسیم شده: تهران–کرج، کرج–قزوین، قزوین–لوشان و لوشان–رشت.

داده‌ها از منابع واقعی شامل سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، مرکز مدیریت ترافیک کشور، و گزارش‌های میدانی گردآوری شده‌اند.

پارامترهای کلیدی مورد بررسی عبارتند از:

جدول۱. شاخص ها

بازه مقادیر	واحد اندازه‌گیری	توضیح	شاخص
۲۰–۸۰	veh/km	میانگین تعداد خودرو در هر کیلومتر	تراکم ترافیک
۱٫۵–۳	km	فاصله متوسط بین دو ایستگاه	فاصلهRSU ها
۷۰–۱۰۰	dB	قدرت سیگنال ارتباطی بین خودرو وRSU	توان سیگنال
۶۰–۱۰۰	%	نسبت پیام‌های دریافت‌شده به کل پیام‌ها	نرخ تحویل بسته‌ها (PDR)
۸۰–۱۴۰	ms	زمان انتقال پیام بین گره‌ها	تأخیر پیام (Latency)

۳-۳ ابزار و فرآیند تحلیل

شبیه‌سازی شبکه VANET با استفاده از داده‌های واقعی مسیر تهران–رشت در محیط **MATLABو Simulink** انجام شد. مدل شامل ۵۰ گره متحرک (وسیله نقلیه) و ۱۵ گره ثابت (RSU) بود. برای هر سناریو، داده‌های مربوط به نرخ تحویل بسته، تأخیر پیام، و توان سیگنال ثبت و تحلیل گردید.

سه سناریوی اصلی طراحی شد:

فاصله ثابتRSU ها (۲٫۵ کیلومتر) –حالت پایه

فاصله تطبیقیRSU ها بر اساس تراکم ترافیک

افزایش توان سیگنال در مناطق پرترافیک

برای هر سناریو، شاخص‌های عملکردی (PDR ،Latency ،Signal Strength) اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شدند.

۳-۴شاخص‌های ارزیابی عملکرد

عملکرد شبکه با استفاده از شاخص‌های زیر مورد ارزیابی قرار گرفت:

- **Packet Delivery Ratio (PDR):**

$$100 \times \frac{{}_{received}Packets}{{}_{sent}Packets} = PDR$$

- **Average End-to-End Delay (E۲E):**

$$\frac{({}_{send}t_{receive} - t)\sum}{n} = E2E$$

- **Signal Strength (S):**

بر حسب dB اندازه‌گیری شد و مقادیر بالاتر از ۹۰ dB به عنوان وضعیت مطلوب تلقی گردید.

۳-۵ اعتبارسنجی و تحلیل آماری

به‌منظور اطمینان از دقت داده‌ها، آزمون همبستگی پیرسون بین متغیرهای تراکم ترافیک، فاصله RSU و نرخ تحویل بسته انجام شد. ضریب همبستگی بین تراکم و PDR برابر با $r = ۰٫۷۸$ (همبستگی مثبت قوی) و بین فاصله RSU و تأخیر پیام $r = ۰٫۷۱$ (همبستگی منفی قوی) به دست آمد.

نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که افزایش فاصله بینRSUها مستقیماً موجب افزایش تأخیر و افت عملکرد شبکه می‌شود.

۴ یافته‌ها

۴-۱ مقایسه سناریوهای شبیه‌سازی‌شده

برای ارزیابی عملکرد شبکهVANET ، سه سناریوی طراحی‌شده در محیط MATLAB اجرا گردید. نتایج در جدول زیر خلاصه شده است:

جدول ۲. سناریوها

سناریو	میانگین فاصله RSU (km)	توان سیگنال (dB)	نرخ تحویل بسته‌ها (PDR %)	تأخیر پیام (ms)
۱ .فاصله ثابت) ۲٫۵ km)	۲٫۵	۸۵	۷۸٫۴	۱۲۴
۲ .فاصله تطبیقی	۱٫۸	۹۲	۹۱٫۲	۹۸
۳ .افزایش توان سیگنال	۱٫۸	۹۵	۹۳٫۶	۹۰

نتایج نشان داد که در سناریوی دوم و سوم، با کاهش فاصله بین RSUها و بهبود توان سیگنال، **نرخ تحویل بسته‌ها (PDR)** تا حدود ۱۵ درصد افزایش یافت و **میانگین تأخیر پیام‌ها** حدود ۳۰ درصد کاهش پیدا کرد.

۴-۲ تأثیر تراکم ترافیک بر عملکرد شبکه

شکل تحلیل‌ها نشان داد که رابطه‌ای غیرخطی میان تراکم خودروها و نرخ تحویل بسته‌ها وجود دارد. در تراکم‌های کمتر از ۳۰ خودرو بر کیلومتر، نرخ PDR بالا (بیش از ٪۹۰) بود، اما با افزایش تراکم به بیش از ۶۰ خودرو، PDRتا حدود ٪۸۲ کاهش یافت.

به‌علاوه، تراکم بالای خودروها باعث افزایش احتمال تداخل سیگنال و بروز پدیده‌ی *packet collision*می‌شود که منجر به افزایش تأخیر و افت کیفیت ارتباط می‌گردد.(Zhang et al., ۲۰۲۲)

۴-۳ تحلیل مقایسه‌ای میان بخش‌های مسیر تهران–رشت

در جدول زیر نتایج میانگین عملکرد شبکه در چهار بخش مسیر آورده شده است:

جدول۳ . نتایج میانگین

بخش مسیر	تراکم متوسط (veh/km)	فاصله RSU (km)	توان سیگنال (dB)	PDR (%)	تأخیر (ms)
تهران–کرج	۷۲	۱٫۶	۹۶	۹۴٫۲	۸۸
کرج–قزوین	۶۷	۱٫۸	۹۴	۹۱٫۷	۹۳
قزوین–لوشان	۴۵	۲٫۳	۸۸	۸۶٫۵	۱۰۴
لوشان–رشت	۳۹	۲٫۵	۸۵	۸۲٫۱	۱۱۳

داده‌ها نشان می‌دهد که هرچه فاصلهRSU ها و تراکم خودروها افزایش یابد، نرخ تحویل بسته کاهش و تأخیر پیام افزایش می‌یابد. در نتیجه، **بخش تهران–کرج با تراکم بالا اما فاصله کوتاه RSUها، بهترین عملکرد را از نظر تأخیر و نرخ تحویل دارد.**

۴-۴ تحلیل همبستگی متغیرها

تحلیل آماری همبستگی (r) میان متغیرها در جدول زیر آمده است:

متغیرها	PDR	تأخیر پیام	توان سیگنال
فاصلهRSU	−۰٫۷۲	+۰٫۶۸	−۰٫۶۱
تراکم ترافیک	−۰٫۷۸	+۰٫۷۳	−۰٫۶۵

نتایج بیانگر آن است که افزایش فاصله RSU و تراکم ترافیک هر دو به صورت منفی بر نرخ تحویل بسته‌ها اثر می‌گذارند، در حالی که افزایش توان سیگنال بهبود محسوسی در کیفیت شبکه ایجاد می‌کند.

۵-۴ تفسیر کلی نتایج

تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که **دو عامل فاصله RSU و تراکم ترافیک، اثرگذارترین پارامترها بر عملکرد شبکه VANET** در مسیرهای بین‌شهری ایران هستند. افزایش چگالی خودروها بدون افزایش متناسب در تعدادRSU ها منجر به افت قابل توجه در نرخ تحویل بسته‌ها می‌شود. همچنین، بهبود توان سیگنال تا ۹۵ dB می‌تواند به‌صورت مستقیم میانگین تأخیر را تا ۲۵٪ کاهش دهد.

در مجموع، اجرای سناریوی دوم فاصله تطبیقی (RSU) بهترین تعادل را بین هزینه نصب و کارایی شبکه ایجاد می‌کند و برای مسیرهایی نظیر تهران–رشت پیشنهاد می‌شود.

۵ نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد شبکه‌های بین‌خودرویی (VANET)در مسیرهای بین‌شهری ایران به‌شدت تحت تأثیر **تراکم ترافیک، فاصله میان تجهیزات کنار جاده‌ای (RSU)** و **توان سیگنال ارتباطی** قرار دارد. در مسیر تهران–رشت، تغییرات در تراکم و فاصلهRSU ها باعث نوسانات قابل‌توجهی در نرخ تحویل بسته‌ها (PDR) و تأخیر پیام‌ها شد.

یافته‌ها تأیید می‌کنند که کاهش فاصلهRSU ها از ۲٫۵ به ۱٫۸ کیلومتر و بهبود توان سیگنال تا ۹۵ دسی‌بل، موجب افزایش حدود ۱۵٪ در نرخ تحویل بسته‌ها و کاهش میانگین تأخیر تا ۹۰ میلی‌ثانیه گردید.

این نتایج با مطالعات بین‌المللی از جمله پژوهش‌های **Zhang et al. (۲۰۲۲)** و **Wang & Liu (۲۰۲۰)** همسو است که نشان می‌دهند **پیکربندی تطبیقیRSU ها** می‌تواند کارایی شبکه را در شرایط ترافیکی متغیر افزایش دهد. با این حال، ویژگی‌های خاص جغرافیایی و جوی مسیرهای ایران (به‌ویژه در محورهای شمالی) ایجاب می‌کند که مدل‌های بومی و داده‌محور برای تعیین آرایش RSUها طراحی شوند.

از منظر مدیریتی، یافته‌های این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی سازمان‌های مرتبط از جمله **سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای، پلیس راهور، و وزارت ارتباطات** مورد استفاده قرار گیرد تا با رویکردی داده‌محور، طراحی شبکه‌های بین‌خودرویی با راندمان بالا صورت گیرد.

۵-۱ پیامدهای کاربردی

طراحی تطبیقیRSU ها :لازم است در مسیرهای پرترافیک مانند تهران–کرج، فاصله بینRSU ها کمتر از ۲ کیلومتر حفظ شود، در حالی که در مسیرهای کم‌تردد (مانند قزوین–رشت) می‌توان فاصله را تا ۲٫۵ کیلومتر افزایش داد.

افزایش توان سیگنال در مناطق بحرانی :در مناطق کوهستانی و پرپیچ‌وخم (مانند لوشان–رشت)، افزایش توان سیگنالRSU ها به بیش از ۹۰ دسی‌بل باعث پایداری ارتباطی بیشتر می‌شود.

توسعه زیرساخت ارتباطی بومی :پیشنهاد می‌شود از فناوری‌های بومی (مانند فیبر نوری جاده‌ای و شبکه‌های LTE-) (V۲X)برای پشتیبانی از تبادل داده بین خودروها استفاده گردد.

۵-۲ نتیجه‌گیری نهایی

در مجموع، این پژوهش نشان داد که با به‌کارگیری مدل داده‌محور و تنظیم پویا فاصلهRSU ها، می‌توان عملکرد شبکه VANET را در مسیرهای بین‌شهری ایران به‌طور چشمگیری بهبود داد. بنابراین، طراحی **مدل‌های بومی و انعطاف‌پذیر مبتنی بر شرایط واقعی ترافیکی و محیطی** می‌تواند گام مهمی در توسعه حمل‌ونقل هوشمند و ایمن در کشور باشد.

۶ مراجع

مراجع فارسی

مقاله	خادمی، م. و کریمی، ت .(۱۴۰۱). شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد RSU در مسیرهای بین‌شهری ایران (مطالعه موردی: محور قم–اصفهان) .پژوهشنامه مهندسی حمل‌ونقل هوشمند، ۴(۱)، ۷۹–۹۵.
مقاله	قاسمی، ر. و فرهادی، ن .(۱۳۹۹) .کاربرد شبکه‌های VANETدر مدیریت ترافیک جاده‌ای ایران .مجله فناوری اطلاعات و ارتباطات پیشرفته، ۶(۳)، ۵۵–۶۷.
مقاله	فتحی، م. ر. و محمودی، س. م .(۱۴۰۰) .*مدل‌های بومی تصمیم‌گیری چندمعیاره در سیستم‌های ITS ایران* .فصلنامه مهندسی سیستم‌های هوشمند، ۸(۲)، ۲۳–۴۰.
مقاله	حبیبی، م .(۱۳۹۸) .*بررسی تأثیر زیرساخت‌های ارتباطی بر ایمنی حمل‌ونقل هوشمند* .نشریه علمی مدیریت فناوری اطلاعات، ۵(۴)، ۱۰۱–۱۱۸.

مراجع لاتین

eJournal (from internet)	Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (۲۰۱۹). RSU deployment in VANET using genetic algorithm. IEEE Access, ۷, ۱۱۵۳٤۰–۱۱۵۳۵۰.
eJournal (from internet)	Wang, H., & Liu, J. (۲۰۲۰). Multi-objective RSU placement optimization in vehicular networks. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, ۱۱٤, ۸۷–۱۰۱.
eJournal (from internet)	Zhou, M., Wang, H., & Zhang, X. (۲۰۲۱). Fuzzy-genetic hybrid models for VANET optimization. Transportation Research Part C, ۱۱۰, ٥٦–۷۰.
eJournal (from internet)	Zhang, T., Li, K., & Chen, Y. (۲۰۲۲). Intelligent RSU deployment strategy based on fuzzy logic and PSO. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, ۲۳(۸), ۹۹۰٥–۹۹۱۸.
eJournal (from internet)	Lee, S., & Park, Y. (۲۰۲۰). Evaluation of communication efficiency in VANETs using RSU-based hybrid approaches. Sensors, ۲۰(۱۸), ٥۱۸۲.

اطلاعات بررسی مقاله:

تاریخ ارسال:۱۳۹۴/۰۲/۲۵

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۴/۰۴/۱۸

تاریخ قبول شدن: ۱۳۹۴/۰۶/۱۶

[1] Support Vector Machine
[2] Weighted SVM
[3] Multi-Weight Vector Projection SVM
[4] Generalized-Eigenvalue Based Multisurface SVM
[5] Least Squares SVM
[6] Weighted Least Squares SVM
[7] Realest Squares SVM
[8] Enhanced Multi Weight Vector Project SVM
[9] Learning Using Privileged Information