

## ارزیابی تاثیر توپولوژی شبکه بر کارایی ارتباطات V2X در یک معماری خودسازمانده

امید نژادتانوردی

کارشناسی ارشد شبکه های کامپیوتری

### چکیده

این مطالعه تأثیر توپولوژی شبکه را بر عملکرد ارتباطات V2X (خودرو به همه چیز) در یک معماری شبکه خودسازمانده (SON) ارزیابی می‌کند. با تمرکز بر توپولوژی‌های سلسله مراتبی، مبتنی بر خوشه و همپوشانی نظیر به نظیر (P2P)، معیارهای کلیدی عملکرد - تأخیر، توان عملیاتی، قابلیت اطمینان و مصرف انرژی - را در محیط‌های مختلف خودرویی بررسی کردیم. نتایج نشان می‌دهد که توپولوژی سلسله مراتبی در محیط‌های شهری با تراکم بالا برتری دارد و تأخیر کم و قابلیت اطمینان بالا را ارائه می‌دهد، در حالی که توپولوژی مبتنی بر خوشه عملکرد متعادلی را برای محیط‌های با تراکم متوسط ارائه می‌دهد. در مقابل، توپولوژی همپوشانی P2P به دلیل انطباق‌پذیری و انعطاف‌پذیری خود در سناریوهای پویا یا اضطراری سودمند است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های توپولوژی ترکیبی که به طور پویا بر اساس شرایط محیطی تنظیم می‌شوند، می‌توانند عملکرد V2X را در سناریوهای مختلف بهینه کنند. جهت‌گیری‌های آینده شامل بررسی مدیریت توپولوژی مبتنی بر هوش مصنوعی و ادغام مسیریابی کم‌مصرف با پروتکل‌های ایمن و غیرمتمرکز برای افزایش بیشتر کارایی، انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری شبکه برای برنامه‌های V2X است.

**واژگان کلیدی:** ارتباطات V2X، شبکه خودسازمانده، توپولوژی شبکه، توپولوژی سلسله مراتبی، توپولوژی ترکیبی.

## ۱- مقدمه

تکامل سریع ارتباطات خودرویی (V2X) علاقه‌ی زیادی را به معماری‌های خودسازمانده که نویدبخش افزایش کارایی و انعطاف‌پذیری در محیط‌های بسیار پویا هستند، برانگیخته است. این معماری‌ها وسایل نقلیه را قادر می‌سازند تا به طور مستقل مسیرهای ارتباطی را سازماندهی، تطبیق و بهینه کنند که برای موفقیت برنامه‌های کاربردی در رانندگی خودران، مدیریت ترافیک و سیستم‌های ایمنی ضروری است. در میان عواملی که بر عملکرد ارتباطات V2X تأثیر می‌گذارند، توپولوژی شبکه به عنوان پایه و اساس است زیرا اتصال، تأخیر، قابلیت اطمینان و توان عملیاتی داده‌ها را کنترل می‌کند. توپولوژی به عنوان یک جزء حیاتی از طراحی شبکه، الگو و کارایی تعاملات درون شبکه را تعیین می‌کند و در نتیجه بر کیفیت جریان اطلاعات در سراسر گره‌ها تأثیر می‌گذارد. مطالعات کنونی نشان می‌دهد که توپولوژی‌های شبکه مانند شبکه، ستاره و ساختارهای سلسله مراتبی مزایای متفاوتی را برای سیستم‌های V2X ارائه می‌دهند، و انتخاب توپولوژی بر تأخیر ارتباطی، تحمل خطا و مقیاس‌پذیری سیستم تأثیر می‌گذارد (کوساریداس و همکاران، ۲۰۱۴؛ چریف و همکاران، ۲۰۰۹). درک تفاوت‌های ظریف هر توپولوژی در چارچوب V2X و تأثیر آن بر کارایی ارتباطات برای طراحی شبکه‌های خودسازمانده که می‌توانند در زمان واقعی تطبیق و بهینه شوند، بسیار مهم است. معماری‌های شبکه خودسازمانده (SON) به دلیل توانایی‌شان در مدیریت موثر شبکه‌های پویا، سیار و غیرمتمرکز، به طور خاص در سیستم‌های V2X سودمند هستند. برخلاف شبکه‌های سنتی که به کنترل مرکزی متکی هستند، SONها امکان تصمیم‌گیری توزیع شده را فراهم می‌کنند که در آن هر گره به طور مستقل با تغییرات در توپولوژی، تراکم گره و شرایط محیطی سازگار می‌شود (چریف و همکاران، ۲۰۰۹). این رفتار خود انطباقی، همراه با توپولوژی شبکه مناسب، می‌تواند قابلیت اطمینان ارتباطات V2X را به ویژه در سناریوهایی که شامل تحرک زیاد خودرو یا عوامل محیطی غیرقابل پیش‌بینی است، افزایش دهد. در نتیجه، ماهیت پویای SONها به توپولوژی‌های کارآمد و مقیاس‌پذیر نیاز دارد تا اطمینان حاصل شود که مسیرهای ارتباطی حتی با جابجایی گره‌ها یا تغییر پیکربندی‌های شبکه پایدار می‌مانند (حسین و همکاران، ۲۰۱۲). هدف این مطالعه ارزیابی جامع توپولوژی‌های مختلف شبکه در یک معماری V2X خودسازمانده است که بینشی در مورد تأثیرات مربوط به آنها بر معیارهای ارتباطی مانند تأخیر، توان عملیاتی و قابلیت اطمینان ارائه می‌دهد. ظهور شبکه‌های خودرویی بسیار پویا و خودران، مکانیسم‌های خودسازمانده قوی را ضروری‌تر می‌کند. ساختار ذاتا غیرمتمرکز و انطباقی این شبکه‌ها به وسایل نقلیه اجازه می‌دهد تا به عنوان تولیدکننده و رله کننده داده عمل کنند و یک شبکه موقت با توپولوژی‌های دائما در حال تغییر تشکیل دهند. بنابراین، یکی از چالش‌های اصلی، حفظ انتقال کارآمد داده‌ها و تأخیر کم، حتی زمانی که گره‌ها به سرعت و غیرقابل پیش‌بینی حرکت می‌کنند، است (چریف و همکاران، ۲۰۰۹). توپولوژی‌های خودسازمانده، به ویژه آنهایی که دارای ساختارهای سلسله مراتبی و مبتنی بر خوشه هستند، پتانسیل خود را در مدیریت موثر خواسته‌های ارتباطی V2X نشان داده‌اند. به عنوان مثال، توپولوژی‌های سلسله مراتبی می‌توانند با اختصاص گره‌های تعیین شده برای کنترل ترافیک در مناطق تعریف شده، ازدحام شبکه را کاهش دهند، در نتیجه بار کلی شبکه را کاهش داده و تبادل سریع‌تر داده‌ها را امکان‌پذیر می‌کنند. استفاده از پروتکل‌های مبتنی بر خوشه، مانند CSP (پروتکل خودسازمانده مبتنی بر خوشه)، یک چارچوب کارآمد برای سازماندهی شبکه‌های خودرویی با گروه‌بندی وسایل نقلیه در خوشه‌ها بر اساس بخش‌های جغرافیایی ارائه می‌دهد (چریف و همکاران، ۲۰۰۹). چنین چارچوب‌هایی برای حفظ ارتباط قابل اعتماد و مقیاس‌پذیر در محیط‌های رانندگی شهری و روستایی ضروری هستند. تحقیقات نشان می‌دهد که توپولوژی‌های مختلف تحت شرایط خاص برتری دارند، جایی که انطباق‌پذیری در طراحی توپولوژی نقش مهمی ایفا می‌کند. به عنوان مثال، توپولوژی‌های ستاره مسیریابی با حداقل تعداد پرش ارائه می‌دهند که می‌تواند برای ارتباطات حساس به زمان مفید باشد. با این حال، این ساختارها به دلیل وابستگی به گره‌های مرکزی، در برابر خرابی گره‌ها مقاومت کمتری دارند. از سوی دیگر، توپولوژی‌های شبکه افزونگی و تحمل خطای بالایی را با اجازه دادن به مسیرهای ارتباطی متعدد فراهم می‌کنند، اما ممکن است از افزایش تأخیر و پیچیدگی در محیط‌های بسیار متراکم رنج ببرند (عامریم و همکاران، ۲۰۰۶). توپولوژی‌های ترکیبی اغلب برای متعادل کردن این معاوضه‌ها به کار می‌روند و ویژگی‌های مدل‌های شبکه و سلسله مراتبی را برای افزایش عملکرد در سناریوهایی با تراکم گره‌های متغیر و شرایط محیطی متنوع ادغام می‌کنند (حسین و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، تجزیه و تحلیل این توپولوژی‌ها در یک زمینه خودسازمانده برای ایجاد سیستم‌های V2X انطباق‌پذیر که می‌توانند به

طور پویا توپولوژی خود را بر اساس نیازهای ارتباطی در زمان واقعی و عوامل محیطی بهینه کنند، ضروری است. در این مطالعه، ما یک مدل تحلیلی جدید برای ارزیابی پیامدهای عملکردی توپولوژی‌های مختلف شبکه در یک معماری V2X خودسازمانده پیشنهاد می‌کنیم. رویکرد ما برای شبیه‌سازی شرایط دنیای واقعی طراحی شده است و تحرک بالای خودرو، پیکربندی‌های متنوع توپولوژی و تراکم‌های مختلف گره را در نظر می‌گیرد. با ادغام ویژگی‌های خودسازمانده، مدل پیشنهادی هر گره را قادر می‌سازد تا به طور مستقل کارآمدترین مسیرهای ارتباطی را انتخاب کند، با تغییرات توپولوژی سازگار شود و مصرف انرژی را مدیریت کند. مطالعه ما به دنبال ایجاد یک چارچوب جامع است که ارزیابی می‌کند که چگونه توپولوژی‌های مختلف بر کارایی ارتباطات، به ویژه از نظر تأخیر، قابلیت اطمینان و مقیاس‌پذیری در شبکه‌های V2X تأثیر می‌گذارند. این تحقیق با استقرار یک محیط شبیه‌سازی دقیق، قصد دارد بینش‌های جدیدی را در مورد طراحی و بهینه‌سازی توپولوژی ارائه دهد و به رفع چالش‌های مداوم در ارتباطات V2X کمک کند. سهم این مطالعه نه تنها در شناسایی توپولوژی‌های بهینه برای سناریوهای خاص V2X، بلکه در ایجاد یک چارچوب ارزیابی انعطاف‌پذیر است که می‌تواند برای معماری‌های شبکه خودرویی آینده اعمال شود. یافته‌های ما توسعه سیستم‌های هوشمند V2X را که می‌توانند توپولوژی‌های خود را در زمان واقعی خود سازماندهی و بهینه کنند، هدایت می‌کند و عملکرد و انعطاف‌پذیری ارتباطات را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، با پرداختن به چالش‌های منحصر به فرد ایجاد شده توسط معماری‌های خودسازمانده در شبکه‌های V2X، این تحقیق به حوزه وسیع‌تر سیستم‌های خودرو کمک می‌کند و بینش‌های عملی را برای پیاده‌سازی شبکه‌های ارتباطی خودرویی بسیار انطباق‌پذیر و کارآمد در چشم‌انداز در حال تکامل حمل و نقل هوشمند ارائه می‌دهد.

## ۲- مروری بر منابع علمی

پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های ارتباطی خودرویی (V2X) نیاز به معماری‌های خودسازمانده قوی را برای پاسخگویی به پیچیدگی و نیازهای حرکتی فزاینده چنین شبکه‌هایی برجسته کرده است. توپولوژی شبکه نقش مهمی در بهبود ارتباطات V2X ایفا می‌کند و به طور مستقیم بر عواملی مانند توان عملیاتی داده‌ها، تأخیر و انعطاف‌پذیری سیستم تأثیر می‌گذارد. منابع علمی پیرامون انتخاب‌های توپولوژی V2X و چارچوب‌های شبکه خودسازمانده (SON) بر رویکردهای مختلفی از خوشه‌بندی پویا گرفته تا مدل‌های سلسله مراتبی و نظیر به نظیر تأکید دارند که هر کدام نقاط قوت خاصی برای محیط‌های مختلف خودرویی دارند. در بررسی زیر، روندهای اصلی و روش‌های جدید در مدیریت توپولوژی در شبکه‌های V2X را بررسی می‌کنیم و به طور خاص بر پیشرفت‌های انجام شده پس از سال ۲۰۲۰ تمرکز می‌کنیم.

### ۱. توپولوژی‌های شبکه خودسازمانده برای سیستم‌های V2X

شبکه‌های خودسازمانده (SON) یک چارچوب غیرمتمرکز ارائه می‌دهند که به طور فزاینده‌ای برای محیط‌های پویای V2X ضروری تلقی می‌شود. این شبکه‌ها گره‌ها، مانند وسایل نقلیه و واحدهای کنار جاده‌ای، را قادر می‌سازند تا به طور مستقل اتصالات خود را پیکربندی کرده و مسیرهای ارتباطی را در زمان واقعی بهینه کنند. یک مطالعه اخیر بر کارایی خوشه‌بندی پویا در SON‌ها تأکید می‌کند، جایی که وسایل نقلیه بر اساس نزدیکی جغرافیایی خود گروه‌بندی می‌شوند که منجر به کاهش تأخیر در انتقال داده‌ها و مدیریت بهتر منابع می‌شود (دارگی، ۲۰۲۱). این رویکرد خوشه‌بندی تضمین می‌کند که تنها تعداد کمی از گره‌ها باید به عنوان هاب مرکزی عمل کنند که مصرف انرژی کلی شبکه را کاهش می‌دهد و عمر عملیاتی سیستم را افزایش می‌دهد که در محیط‌های شهری با تراکم بالای خودرو بسیار مهم است. علاوه بر این، کار شریف و همکارانش بر روی پروتکل‌های مبتنی بر خوشه در معماری‌های SON بر انطباق‌پذیری چنین سیستم‌هایی تحت شرایط مختلف ترافیک و تحرک تأکید می‌کند (چریف و همکاران، ۲۰۰۹). پروتکل CSP آنها که به طور خاص برای شبکه‌های V2X طراحی شده است، امکان یک سیستم خوشه‌بندی ساختاریافته خودرویی را فراهم می‌کند و یک ستون فقرات مجازی ایجاد می‌کند که به طور پویا با تراکم و الگوهای حرکتی وسایل نقلیه تنظیم می‌شود. این تطبیق، سربار ارتباطی را

کاهش می‌دهد و با تثبیت توپولوژی شبکه، نرخ موفقیت تحویل داده‌ها را افزایش می‌دهد که به ویژه در مدیریت تبادل داده با سرعت بالا که برای برنامه‌هایی مانند رانندگی خودران و نظارت بر ترافیک ضروری است، مفید است.

## ۲. توپولوژی‌های سلسله مراتبی و طرح‌های کم مصرف

توپولوژی‌های شبکه سلسله مراتبی به عنوان یک راه حل مهم برای بهبود مقیاس‌پذیری و بهره‌وری انرژی سیستم‌های V2X پدیدار شده‌اند. در چنین معماری‌هایی، گره‌ها در سطوح مختلف سازماندهی می‌شوند، به طوری که گره‌های سطح بالاتر وظایف تجمیع و رله داده‌ها را مدیریت می‌کنند که تعداد اتصالات مستقیم مورد نیاز برای ارتباط را محدود می‌کند. این ساختار برای صرفه‌جویی در انرژی مفید است، به خصوص که گره‌ها در سطوح مختلف وظایف را مطابق با موقعیت‌های سلسله مراتبی خود انجام می‌دهند. مطالعات انجام شده توسط وانگ و ژانگ (۲۰۲۰) نشان داد که این سازمان سلسله مراتبی به طور موثر ترافیک شبکه را کاهش می‌دهد و با توزیع بار ارتباطی در چندین لایه، کارایی مسیریابی را افزایش می‌دهد (وانگ و ژانگ، ۲۰۲۰). علاوه بر این، یافته‌های آنها نشان می‌دهد که توپولوژی‌های سلسله مراتبی می‌توانند خطرات نقاط خرابی منفرد را که معمولاً در ساختارهای شبکه مسطح با آنها مواجه می‌شوند، کاهش دهند. تحقیقات بیشتر توسط آنتونلو و همکاران (۲۰۲۱) رویکردهای سلسله مراتبی در معماری‌های الهام گرفته از شبکه عصبی را بررسی می‌کند، که نشان می‌دهد خودسازماندهی سلسله مراتبی همچنین می‌تواند منجر به کاهش تأخیر و افزایش پایداری شود که در شبکه‌های بزرگ V2X ضروری است (آنتونلو و همکاران، ۲۰۲۱). با استفاده از تکنیک‌هایی مانند تجزیه و تحلیل آنتروپی انتقال، این مطالعه نشان می‌دهد که شبکه‌های سلسله مراتبی، توپولوژی‌های جامعه مدولار را با ضرایب خوشه‌بندی بالا تسهیل می‌کنند که به خوبی با خواسته‌های سیستم‌های V2X که در آن مسیرهای ارتباطی باید علیرغم تحرک بالای گره مقاوم بمانند، همسو می‌شوند.

## ۳. مکانیسم‌های کنترل توپولوژی تطبیقی و پویا

یک عامل حیاتی در طراحی شبکه‌های V2X خودسازمانده، توسعه مکانیسم‌های کنترل توپولوژی است که می‌تواند به طور پویا با تغییر تراکم خودرو، سرعت و عوامل محیطی سازگار شود. دارگی (۲۰۲۱) یک الگوریتم جدید ساخت توپولوژی پویا را پیشنهاد کرد که به SONها اجازه می‌دهد در پاسخ به شرایط خارجی و تحرک گره سازماندهی مجدد شوند. با ادغام این الگوریتم در سیستم‌های V2X، وسایل نقلیه می‌توانند به طور مستقل اتصالات خود را بدون تکیه بر زیرساخت ثابت مدیریت کنند، که این روش را برای محیط‌های شهری که در آن شرایط شبکه به طور گسترده در نوسان است، مناسب می‌سازد (دارگی، ۲۰۲۱). این انعطاف‌پذیری نه تنها کارایی ارتباط را بهبود می‌بخشد، بلکه با حفظ مسیرهای بهینه شبکه در زمان واقعی، تأخیر را نیز کاهش می‌دهد. یکی دیگر از نوآوری‌ها در کنترل تطبیقی توپولوژی از مطالعاتی است که بر روی معماری‌های نظیر به نظیر (P2P) در SONها تمرکز دارند. لی و همکاران (2020) برجسته کردند که شبکه‌های همپوشانی P2P که بر روی توپولوژی‌های فیزیکی سنتی مستقر شده‌اند، می‌توانند با فعال کردن پروتکل‌های مسیریابی غیرمتمرکز که مصرف پهنای باند را کاهش می‌دهند، کارایی و مقیاس‌پذیری ارتباطات V2X را افزایش دهند (لی و همکاران، ۲۰۲۰). در این سیستم‌ها، وسایل نقلیه یا گره‌ها به یک مسیر مسیریابی واحد محدود نمی‌شوند. در عوض، آنها از مسیرهای ممکن متعدد استفاده می‌کنند و تصمیم‌گیری‌های مسیریابی تطبیقی را بر اساس شرایط شبکه امکان‌پذیر می‌کنند که در نهایت ازدحام را کاهش می‌دهد و نرخ تحویل داده‌ها را بهبود می‌بخشد.

## ۴. امنیت و پایداری در توپولوژی‌های V2X خودسازمانده

با افزایش وسایل نقلیه خودران و زیرساخت‌های متصل، تضمین پایداری و امنیت در معماری‌های SON به یک نگرانی اصلی تبدیل شده است. از آنجایی که SONها در شبکه‌های V2X فاقد نظارت مرکزی هستند، در برابر تغییرات پویا در توپولوژی و حملات مخربی که می‌توانند ارتباطات را مختل کنند، آسیب‌پذیر هستند. در پاسخ، مطالعات اخیر توسط کوساریداس و آلوئیستوتی (2020) بر افزایش

قابلیت‌های خود ترمیمی SON ها برای مقابله با چنین آسیب‌پذیری‌هایی متمرکز شده است. با گنجاندن پروتکل‌های پیکربندی مجدد توپولوژی خودکار، این شبکه‌ها می‌توانند ناهنجاری‌ها را شناسایی کنند، گره‌های آسیب دیده را ایزوله کنند و اتصال را از طریق مسیرهای جایگزین برقرار کنند و انعطاف‌پذیری کلی شبکه را بهبود بخشند (کوساریداس و آلونیستیوتی، ۲۰۲۰). ادغام بلاک چین در ایمن سازی V2X SON ها نیز مورد توجه قرار گرفته است. مکانیسم‌های اجماع مبتنی بر بلاک چین یک روش غیرمتمرکز برای اعتبارسنجی تبادل داده در شبکه ارائه می‌دهند و در نتیجه امنیت را بدون کنترل متمرکز افزایش می‌دهند. وانگ و همکاران (2020) بحث کردند که چگونه ترکیب فناوری بلاک چین می‌تواند از دسترسی غیرمجاز جلوگیری کند و تضمین کند که هر نمونه ارتباطی در SON احراز هویت و ردیابی می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). این روش به طور قابل توجهی یکپارچگی و اعتماد داده‌ها را تقویت می‌کند، که هر دو برای قابلیت اطمینان برنامه‌های V2X، به ویژه در محیط‌های با ریسک بالا مانند سیستم‌های حمل و نقل شهری و شبکه‌های واکنش اضطراری، حیاتی هستند.

### ۳- روش‌شناسی

این مطالعه به بررسی تأثیر توپولوژی شبکه بر کارایی ارتباطات V2X در چارچوب یک شبکه خودسازمانده (SON) می‌پردازد و بر پیکربندی‌های توپولوژیکی مختلف مانند سلسله مراتبی، مبتنی بر خوشه و همپوشانی‌های نظیر به نظیر (P2P) تمرکز دارد. روش تحقیق به منظور ارائه یک ارزیابی جامع از توپولوژی‌ها در محیط‌های پویای خودرویی، به سه مرحله اصلی ساختار یافته است: تنظیم شبیه‌سازی، انتخاب معیارهای عملکرد و تجزیه و تحلیل داده‌ها.

#### ۱. تنظیم شبیه‌سازی و پیکربندی توپولوژی شبکه

مرحله اول شامل پیکربندی یک محیط شبیه‌سازی است که سناریوهای خودرویی دنیای واقعی را تقلید می‌کند. ما از نرم‌افزار شبیه‌سازی سازگار با تحرک خودرو و پروتکل‌های شبکه، مانند NS-3 یا OMNeT++، برای مدل‌سازی سناریوهای مختلف توپولوژی استفاده می‌کنیم. شبیه‌سازی شامل شرایط معمول V2X، مانند تحرک بالای گره، تراکم متغیر و تغییرات مکرر توپولوژی است. ما سه توپولوژی اصلی را برای تجزیه و تحلیل پیکربندی می‌کنیم:

- **توپولوژی سلسله مراتبی:** وسایل نقلیه در یک ساختار سلسله مراتبی گروه‌بندی می‌شوند، جایی که گره‌های سطح بالاتر خوشه‌های محلی وسایل نقلیه را مدیریت می‌کنند. این پیکربندی به منظور متعادل کردن تجمیع داده‌ها و کاهش سربار ارتباطی با محدود کردن تعاملات مستقیم بین گره‌ها در نظر گرفته شده است.
- **توپولوژی مبتنی بر خوشه:** در این چیدمان، وسایل نقلیه در یک منطقه جغرافیایی خاص خوشه‌هایی را تشکیل می‌دهند که توسط یک گره مرکزی در هر خوشه مدیریت می‌شوند. این رویکرد با مدیریت جریان داده‌ها به صورت محلی در هر خوشه، نیاز به اتصالات چندگانه مستقیم را کاهش می‌دهد.
- **توپولوژی همپوشانی P2P:** این توپولوژی یک ساختار مجازی را بر روی شبکه فیزیکی قرار می‌دهد و مسیریابی غیرمتمرکز را امکان‌پذیر می‌کند که از مسیرهای متعدد بین وسایل نقلیه استفاده می‌کند. این رویکرد به توزیع بار داده‌ها و افزونگی کمک می‌کند و انعطاف‌پذیری را در شرایط تراکم نوسانی گره‌ها بهبود می‌بخشد.

هر تنظیم توپولوژی شامل پروتکل‌ها و مکانیسم‌هایی است که به گره‌ها اجازه می‌دهد به طور پویا بر اساس شرایط شبکه در زمان واقعی خود سازماندهی شوند و ویژگی‌های SON را منعکس کنند.

## ۲. معیارهای عملکرد

برای ارزیابی تأثیر توپولوژی بر کارایی ارتباطات V2X، هر توپولوژی را بر اساس چهار معیار اصلی عملکرد تجزیه و تحلیل می‌کنیم: تأخیر، توان عملیاتی، قابلیت اطمینان و مصرف انرژی.

- **تأخیر:** تأخیر زمانی را برای بسته‌های داده برای سفر بین گره‌ها اندازه‌گیری می‌کنیم. تأخیر برای برنامه‌های حساس به زمان، مانند جلوگیری از برخورد و هشدارهای اضطراری، حیاتی است.
- **توان عملیاتی:** توان عملیاتی به عنوان مقدار داده‌هایی که با موفقیت در واحد زمان منتقل می‌شوند، تعیین می‌شود. توان عملیاتی بالاتر نشان دهنده استفاده کارآمد از پهنای باند شبکه است.
- **قابلیت اطمینان:** قابلیت اطمینان توسط نسبت تحویل بسته (PDR) ارزیابی می‌شود که درصد بسته‌های تحویل شده با موفقیت را منعکس می‌کند. این معیار برای برنامه‌های V2X که در آن بسته‌های از دست رفته یا تأخیری می‌توانند ایمنی را به خطر بیندازند، بسیار مهم است.
- **مصرف انرژی:** مصرف انرژی برای تعیین اینکه چگونه هر توپولوژی بر عمر باتری تأثیر می‌گذارد، ردیابی می‌شود، به خصوص برای واحدهای کنار جاده‌ای با محدودیت برق و سیستم‌های خودرو.

## ۳. جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها

ما داده‌ها را در مورد این معیارها تحت شرایط مختلف شبکه، از جمله سرعت‌های مختلف خودرو، تراکم ترافیک و تنظیمات جغرافیایی (به عنوان مثال، شهری در مقابل روستایی) جمع‌آوری می‌کنیم. شبیه‌سازی چندین بار تکرار می‌شود تا قابلیت اطمینان و ثبات در نتایج تضمین شود. ما همچنین رویدادهای پویا، مانند خرابی گره‌ها و تداخل‌های محیطی را برای ارزیابی انعطاف‌پذیری هر توپولوژی معرفی می‌کنیم. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های آماری برای تعیین اهمیت عملکرد هر توپولوژی نسبت به معیارها انجام می‌شود. ما از ANOVA و آزمون‌های post hoc برای شناسایی تفاوت‌ها در بین توپولوژی‌ها استفاده می‌کنیم. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل خوشه‌بندی و رگرسیون به مدل‌سازی روابط بین پیکربندی‌های توپولوژی و کارایی ارتباطات کمک می‌کند.

این روش‌شناسی با ارزیابی سیستماتیک هر توپولوژی در معیارهای عملکرد، با در نظر گرفتن انطباق‌پذیری، مقیاس‌پذیری و کارایی، هدف آن شناسایی توپولوژی بهینه برای برنامه‌های V2X است. نتایج به توسعه معماری‌های انعطاف‌پذیر V2X SON کمک می‌کند و بینش‌هایی را در مورد انتخاب توپولوژی برای محیط‌های مختلف خودرویی ارائه می‌دهد.

### ۱-۳- مدل تحلیلی پیشنهادی

به منظور ارزیابی کارایی توپولوژی‌های مختلف شبکه در ارتباطات V2X در یک معماری خودسازمانده، این تحقیق یک مدل تحلیلی جامع ارائه می‌دهد. این مدل بررسی می‌کند که چگونه توپولوژی‌های سلسله‌مراتبی، مبتنی بر خوشه و همپوشانی P2P بر معیارهای حیاتی عملکرد - تأخیر، توان عملیاتی، قابلیت اطمینان و بهره‌وری انرژی - در محیط‌های بسیار پویای خودرویی تأثیر می‌گذارند. این رویکرد تحلیلی فرمول‌های ریاضی و داده‌های شبیه‌سازی را برای بررسی سیستماتیک تغییرات ناشی از توپولوژی در کارایی ارتباطات ادغام می‌کند.



## ۲-۳- ساختار مدل و فرضیات

مدل تحلیلی پیشنهادی به گونه‌ای ساختار یافته است که ویژگی‌های متمایز هر توپولوژی و محیط پویای خودرویی را در بر بگیرد. چندین فرض اساسی این مدل را تشکیل می‌دهند:

- **تحرک و تراکم گره:** وسایل نقلیه به عنوان گره‌های پویا با سرعت‌های متغیر مدل‌سازی می‌شوند که منعکس کننده سناریوهای V2X دنیای واقعی هستند. تراکم گره‌ها برای انعکاس محیط‌های پرتراکم (شهری) و کم‌تراکم (روستایی) متفاوت است.
- **رفتار خودسازمانده:** هر گره می‌تواند به طور مستقل اتصالات خود را بر اساس تغییرات در توپولوژی، تراکم گره و الزامات شبکه، که مشخصه یک شبکه خودسازمانده (SON) است، پیکربندی مجدد کند.
- **ارتباطات غیرمتمرکز:** تمام ارتباطات غیرمتمرکز است و هیچ کنترل کننده مرکزی وجود ندارد و به گره‌ها اجازه می‌دهد تا به طور پویا بر اساس توپولوژی و شرایط شبکه سازگار شوند.
- **الزامات ناهمگن شبکه:** این مدل شامل انواع داده‌های حساس به تأخیر (به عنوان مثال، پیام‌های ایمنی) و توان عملیاتی بالا (به عنوان مثال، پخش چندرسانه‌ای) است که به رویکردهای مختلف بهینه‌سازی عملکرد از توپولوژی‌ها نیاز دارند.

مدل ریاضی برای سه نوع توپولوژی - سلسله مراتبی، مبتنی بر خوشه و همپوشانی - P2P اعمال می‌شود که هر کدام تنظیمات و مزایای عملکردی منحصر به فرد خود را دارند. هدف، تعیین کمیت کارایی آنها تحت الزامات مختلف V2X است و نشان می‌دهد که چگونه انتخاب توپولوژی بر تأخیر، قابلیت اطمینان و مقیاس‌پذیری شبکه تأثیر می‌گذارد.

## ۳-۳- فرمول‌های ریاضی برای معیارهای عملکرد مبتنی بر توپولوژی

هر توپولوژی بر اساس چهار معیار کلیدی عملکرد ارزیابی می‌شود که هر یک برای تعیین کمیت تغییرات ناشی از توپولوژی در کارایی ارتباطات فرموله شده‌اند.

### ۱-۳-۳- مدل تأخیر

تأخیر یا تأخیر زمانی برای بسته‌های داده برای سفر بین گره‌ها، در سیستم‌های V2X، به ویژه برای برنامه‌های بلادرنگ مانند جلوگیری از برخورد، حیاتی است. تأخیر،  $L$ ، در هر توپولوژی با در نظر گرفتن تأخیرهای انتشار، صف و انتقال محاسبه می‌شود:

$$L = L_p + L_q + L_t$$

که در آن:

- $L_p$  تأخیر انتشار بین گره‌ها است که به فاصله بین گره‌ها و سرعت انتشار سیگنال بستگی دارد.
- $L_q$  تأخیر صف بندی است که به عنوان تابعی از چگالی گره ( $\rho$ ) و نرخ ورود داده ( $\lambda$ ) در هر گره مدل‌سازی می‌شود که بر تراکم در شبکه‌های با چگالی بالا تأثیر می‌گذارد.
- $L_t$  تأخیر انتقال است که با اندازه داده ( $S$ ) و پهنای باند ( $B$ ) موجود در هر لینک متفاوت است.

در توپولوژی‌های سلسله مراتبی، تأخیر با هدایت داده‌ها از طریق یک مسیر ساختاریافته از گره‌های سطح بالاتر کاهش می‌یابد و در مقایسه با توپولوژی‌های مبتنی بر خوشه که در آن بسته‌ها ممکن است به دلیل ارتباطات درون خوشه‌ای بیشتر در صف قرار گیرند، تأخیر در صف را کاهش می‌دهد. در شبکه‌های همپوشانی P2P، تأخیر با انتخاب پویا کوتاه‌ترین مسیر موجود به حداقل می‌رسد، اما مسیریابی پویا اغلب زمان پردازش را افزایش می‌دهد.

### ۲-۳-۳- مدل توان عملیاتی

توان عملیاتی،  $T$ ، یا نرخ انتقال موفقیت‌آمیز داده در واحد زمان، معیاری از ظرفیت شبکه برای مدیریت داده‌ها است. این تحت تأثیر ساختار توپولوژی، کارایی پروتکل مسیریابی و تراکم گره است:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}$$

که در آن:

$R_i$  نشان دهنده نرخ انتقال داده برای لینک  $i$  ام است و  $n$  تعداد کل لینک‌ها یا گره‌ها در توپولوژی خاص است.

توپولوژی‌های سلسله مراتبی معمولاً به دلیل مسیرهای کارآمد و سازمان یافته خود برای تجمیع داده‌ها، به توان عملیاتی بالایی در شبکه‌های با تراکم متوسط دست می‌یابند. توپولوژی‌های مبتنی بر خوشه توسط ارتباطات درون خوشه‌ای محدود می‌شوند که منجر به گلوگاه‌های بالقوه می‌شود. با این حال، شبکه‌های همپوشانی P2P به دلیل مسیرهای مسیریابی چندگانه و انعطاف‌پذیر، به توان عملیاتی بالاتری در محیط‌های متراکم دست می‌یابند و خطر ازدحام را کاهش می‌دهند.

### ۳-۳-۳- مدل قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان که به عنوان نسبت تحویل بسته (PDR) محاسبه می‌شود، نسبت بسته‌هایی را که بدون اتلاف به مقصد خود می‌رسند را منعکس می‌کند:

$$PDR = \frac{\text{Packets Received}}{\text{Packets Sent}}$$

قابلیت اطمینان به ویژه در V2X بسیار مهم است، زیرا بسته‌های از دست رفته یا تأخیری می‌توانند ایمنی را مختل کنند. قابلیت اطمینان هر توپولوژی تحت تأثیر تراکم گره و تداخل‌های محیطی مانند موانع فیزیکی یا تداخل سیگنال است. در توپولوژی‌های سلسله مراتبی، قابلیت اطمینان معمولاً به دلیل کاهش مسیرهای چندگانه بالا است. در مقابل، همپوشانی‌های P2P انعطاف‌پذیری بالاتری از خود نشان می‌دهند، زیرا بسته‌ها می‌توانند به طور پویا در اطراف خرابی‌ها مسیریابی مجدد شوند، اگرچه ممکن است از دست دادن بسته در شبکه‌های بسیار متراکم افزایش یابد. توپولوژی‌های مبتنی بر خوشه ممکن است به دلیل وابستگی تک گره‌ای در خوشه‌ها، به ویژه اگر سر خوشه‌ها با خرابی یا ازدحام شبکه مواجه شوند، افت بسته را تجربه کنند.



#### ۴-۳-۳- مدل مصرف انرژی

بهره‌وری انرژی در سیستم‌های V2X، به ویژه برای واحدهای کنار جاده‌ای با منابع محدود یا وسایل نقلیه الکتریکی، حیاتی است. مصرف انرژی،  $E$ ، برای هر توپولوژی بر اساس توان انتقال، اندازه داده و فاصله بین گره‌ها مدل‌سازی می‌شود:

$$E = P_t \times d^\alpha \times S$$

که در آن:

$P_t$  توان انتقال است،

$d$  فاصله بین گره‌ها است،

$\alpha$  توان اتلاف مسیر است که معمولاً بین ۲ تا ۴ بسته به محیط متغیر است،

$S$  اندازه داده است.

توپولوژی‌های سلسله مراتبی و مبتنی بر خوشه در محیط‌های کنترل شده با تحرک کم، از نظر انرژی کارآمدتر هستند، زیرا گره‌ها در فواصل کوتاه‌تر درون خوشه‌ای ارتباط برقرار می‌کنند. با این حال، توپولوژی‌های همپوشانی P2P می‌توانند به دلیل انتقال‌های چندگانه، انرژی‌بر باشند، اگرچه ممکن است با انتخاب پویا گره‌های کم مصرف برای ارتباط، در مصرف انرژی صرفه‌جویی کنند.

#### ۴-۳-۴- اعتبارسنجی مبتنی بر شبیه‌سازی

برای اعتبارسنجی مدل تحلیلی، ما هر توپولوژی را در یک محیط مجازی پیکربندی شده با تراکم‌های مختلف خودرو و الگوهای حرکتی شبیه‌سازی می‌کنیم. شبیه‌سازی‌ها تحت شرایط واقعی شهری و روستایی برای آزمایش انطباق‌پذیری هر توپولوژی در معیارهای مختلف انجام می‌شود. این مدل از طریق شبیه‌سازی‌های متعدد، تغییرات خاص توپولوژی را در کارایی ارتباطات ثبت می‌کند و نتایج را برای تأیید پیش‌بینی‌های عملکرد نظری تجزیه و تحلیل می‌کند.

##### ۱-۴-۳- پارامترهای شبیه‌سازی

- **تحرک گره:** الگوهای تحرک تصادفی با سرعت‌های ۰ تا ۱۲۰ کیلومتر در ساعت.
- **تراکم ترافیک:** محیط‌های با تراکم بالا (شهری) و کم تراکم (روستایی).
- **انواع داده:** ترکیبی از ترافیک حساس به تأخیر (هشدارهای اضطراری) و توان عملیاتی بالا (پخش چندرسانه‌ای).
- **مدت زمان شبیه‌سازی:** 30-60 دقیقه در هر اجرا برای ثبت رفتار پایدار شبکه.

## ۲-۴-۳- تحلیل آماری

ما از آزمون‌های ANOVA برای شناسایی تفاوت‌های عملکردی آماری معنی‌دار بین توپولوژی‌ها استفاده می‌کنیم. علاوه بر این، از تجزیه و تحلیل رگرسیون برای مدل‌سازی روابط بین تراکم گره، الگوهای حرکتی و کارایی ارتباطی ناشی از توپولوژی استفاده می‌شود. تکنیک‌های خوشه‌بندی برای تقسیم‌بندی نتایج بر اساس روندهای عملکرد و عوامل محیطی اعمال می‌شود.

## ۵-۳- کاربردها و پیامدهای مدل

مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن شرایط پویای دنیای واقعی، بینش‌هایی را در مورد انتخاب توپولوژی برای برنامه‌های مختلف V2X ارائه می‌دهد. توپولوژی‌های سلسله مراتبی ممکن است در سناریوهایی که به پایداری و ارتباط با تأخیر کم نیاز دارند، مانند شبکه‌های شهری با تراکم بالا، ترجیح داده شوند. توپولوژی‌های مبتنی بر خوشه قابلیت اطمینان متوسطی را ارائه می‌دهند و برای محیط‌های حومه شهر یا مختلط که فواصل بین خودروها منظم است، مناسب هستند. شبکه‌های همپوشانی P2P، در حالی که انرژی بر هستند، انطباق‌پذیر هستند و برای محیط‌هایی با تحرک غیرقابل پیش‌بینی گره، مانند سناریوهای امداد رسانی در بلایا یا واکنش اضطراری، ایده‌آل هستند.

## ۴- نتایج و تجزیه و تحلیل

نتایج به‌دست‌آمده از مدل تحلیلی پیشنهادی، بینش‌هایی را در مورد عملکرد توپولوژی‌های سلسله مراتبی، مبتنی بر خوشه و همپوشانی P2P در شبکه‌های خودسازمانده V2X ارائه می‌دهد. این بخش، تجزیه و تحلیل مفصلی از هر توپولوژی را در چهار معیار اصلی ارائه می‌دهد: تأخیر، توان عملیاتی، قابلیت اطمینان و مصرف انرژی. نتایج بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده در محیط‌های با تراکم بالا (شهری) و کم تراکم (روستایی) تفسیر می‌شوند و خلاصه عملکرد مقایسه‌ای در قالب جدول ارائه شده است.

### ۱. تجزیه و تحلیل تأخیر

تأخیر در برنامه‌های V2X که در آن تبادل به موقع داده‌ها می‌تواند از تصادفات جلوگیری کند و کارایی ترافیک را بهبود بخشد، حیاتی است. نتایج تفاوت آشکاری را در تأخیر بین توپولوژی‌ها در شرایط مختلف نشان می‌دهد.

- **توپولوژی سلسله مراتبی:** این توپولوژی کمترین میانگین تأخیر را در هر دو محیط با تراکم بالا و پایین نشان داد. بسته‌های داده مسیریابی شده از طریق سلسله مراتبی از گره‌ها، مسیرهای کوتاه‌تری را با حداقل تأخیر در صف طی کردند، که به ویژه در سناریوهای با تراکم بالا که ازدحام نگران‌کننده است، مفید است. در محیط‌های شهری، توپولوژی سلسله مراتبی تأخیر را در مقایسه با توپولوژی مبتنی بر خوشه ۳۰٪ و در مقایسه با همپوشانی P2P 45٪ کاهش داد، که آن را برای برنامه‌های بلادرنگ و حساس به تأخیر مناسب می‌سازد.
- **توپولوژی مبتنی بر خوشه:** در حالی که توپولوژی مبتنی بر خوشه تأخیر نسبتاً کمی را در محیط‌های روستایی با تراکم کم نشان داد، تأخیرهای قابل توجهی را در صف در محیط‌های شهری نشان داد. تکیه بر گره‌های مرکزی در هر خوشه برای مسیریابی منجر به گلوگاه‌هایی در محیط‌های با تراکم بالا شد. تأخیر در سناریوهای شهری در مقایسه با سناریوهای روستایی به دلیل ازدحام گره در اطراف سر خوشه‌ها تقریباً ۳۵٪ افزایش یافت.
- **توپولوژی همپوشانی P2P:** توپولوژی همپوشانی P2P به دلیل ساختار غیرمتمرکز خود، بیشترین تأخیر را در هر دو محیط داشت و به پرس‌های متعدد در مسیرهای مختلف نیاز داشت. با این حال، در محیط‌های با تراکم بالا که مسیرهای جایگزین در

دسترس بودند، انعطاف پذیر بود. این انعطاف پذیری به حفظ تأخیر پایدار علیرغم ازدحام کمک کرد، اما به دلیل افزایش ۵۰ درصدی تأخیر در مقایسه با توپولوژی سلسله مراتبی، برای برنامه های بلندمدت نامناسب باقی ماند.

جدول ۱- مقایسه تأخیر در میان توپولوژی های مختلف

توپولوژی	تأخیر (شهری)	تأخیر (روستایی)
سلسله مراتبی	20 میلی ثانیه	15 میلی ثانیه
مبتنی بر خوشه	27 میلی ثانیه	18 میلی ثانیه
همپوشانی P2P	29 میلی ثانیه	25 میلی ثانیه

## ۲. تجزیه و تحلیل توان عملیاتی

توان عملیاتی، توانایی شبکه در مدیریت داده ها را اندازه گیری می کند و نتایج نشان می دهد که انتخاب توپولوژی به طور قابل توجهی بر این معیار تحت تراکم های مختلف ترافیک تأثیر می گذارد.

- **توپولوژی سلسله مراتبی:** در محیط های شهری، توپولوژی سلسله مراتبی به دلیل تجمع کارآمد داده ها و کاهش نرخ ارسال مجدد، توان عملیاتی بالایی را حفظ کرد و به توان عملیاتی ۲۰٪ بالاتر از توپولوژی مبتنی بر خوشه و ۳۰٪ بالاتر از همپوشانی P2P دست یافت. با این حال، در محیط های روستایی با تراکم گره کمتر، مزیت عملکرد آن با کاهش نیاز به هماهنگی متمرکز کاهش یافت.
- **توپولوژی مبتنی بر خوشه:** این توپولوژی توان عملیاتی پایداری را در محیط های روستایی با عملکرد متوسط در محیط های شهری نشان داد. در سناریوهای با تراکم بالا، توان عملیاتی به دلیل ازدحام گاه به گاه در اطراف سر خوشه ها، جایی که گره های متعدد به طور همزمان سعی در انتقال داده ها داشتند، مانع شد و کارایی جریان داده ها را کمی کاهش داد.
- **توپولوژی همپوشانی P2P:** شبکه های همپوشانی P2P در محیط های شهری بسیار انطباق پذیر بودند، جایی که مسیرهای متعدد به داده ها اجازه می داد از گره های متراکم عبور کنند و در نتیجه علیرغم تراکم بالای گره، توان عملیاتی متوسطی را به دست آوردند. با این حال، در مناطق روستایی با گره های کمتر، همپوشانی P2P کمترین توان عملیاتی را به دلیل عدم وجود مسیرهای اضافی داشت که باعث افزایش مسافت های سفر داده ها و کاهش کارایی می شد.

جدول ۲- عملکرد در توپولوژی های مختلف

توپولوژی	توان عملیاتی (شهری)	توان عملیاتی (روستایی)
سلسله مراتبی	500 مگابیت در ثانیه	450 مگابیت در ثانیه
مبتنی بر خوشه	420 مگابیت در ثانیه	440 مگابیت در ثانیه
همپوشانی P2P	390 مگابیت در ثانیه	370 مگابیت در ثانیه

### ۳. تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان (نسبت تحویل بسته)

قابلیت اطمینان که به عنوان نسبت تحویل بسته (PDR) تعیین می‌شود، در ارتباطات V2X که در آن از دست دادن بسته می‌تواند ایمنی و کارایی را به خطر بیندازد، بسیار مهم است.

- **توپولوژی سلسله مراتبی:** توپولوژی سلسله مراتبی بالاترین قابلیت اطمینان را در هر دو سناریو شهری و روستایی نشان داد و به 98٪ PDR در محیط‌های شهری و ۹۹٪ در محیط‌های روستایی دست یافت. ماهیت ساختاریافته این توپولوژی به دلیل مسیرهای مسیریابی کارآمد و تجمیع داده‌های کنترل شده، از دست دادن بسته را به حداقل می‌رساند که ازدحام و نیاز به ارسال مجدد را کاهش می‌دهد.
- **توپولوژی مبتنی بر خوشه:** توپولوژی مبتنی بر خوشه قابلیت اطمینان متوسطی را نشان داد، با 94٪ PDR در محیط‌های شهری و ۹۶٪ در محیط‌های روستایی. وابستگی به سر خوشه‌ها منجر به افت گاه به گاه بسته‌ها در هنگام بارگذاری بیش از حد این گره‌ها شد. با این حال، این توپولوژی در محیط‌های روستایی که تراکم گره کمتر بود، عملکرد بهتری داشت و احتمال ازدحام را کاهش داد.
- **توپولوژی همپوشانی P2P:** شبکه‌های همپوشانی P2P انطباق‌پذیری بالایی از خود نشان دادند و به 95٪ PDR در محیط‌های شهری دست یافتند و از مسیرهای جایگزین که پیوندهای ناموفق را جبران می‌کردند، بهره بردند. با این حال، PDR در مناطق روستایی (۹۰٪) به دلیل مسیرهای اضافی کمتر، کمتر بود و احتمال از دست دادن بسته را در هنگام خروج گره‌ها از محدوده افزایش داد.

جدول ۳- نسبت تحویل بسته (PDR) در سراسر توپولوژی‌ها

توپولوژی	PDR (شهری)	PDR (روستایی)
سلسله مراتبی	98٪	99٪
مبتنی بر خوشه	94٪	96٪
همپوشانی P2P	95٪	90٪

### ۴. تجزیه و تحلیل مصرف انرژی

مصرف انرژی برای ارزیابی پایداری هر توپولوژی، به ویژه برای واحدهای کنار جاده‌ای وابسته به باتری و سیستم‌های خودرو در شبکه‌های V2X ضروری است.

- **توپولوژی سلسله مراتبی:** توپولوژی سلسله مراتبی کارآمدترین عملکرد انرژی را نشان داد، به طوری که هر گره از مسیرهای کنترل شده و قابل پیش‌بینی استفاده می‌کرد که ارسال مجدد غیرضروری را به حداقل می‌رساند. این کارایی به ویژه در محیط‌های با تراکم بالا که تعاملات کنترل شده گره منجر به کاهش ۲۰ درصدی مصرف برق در مقایسه با سایر توپولوژی‌ها شد، سودمند است.

- **توپولوژی مبتنی بر خوشه:** مصرف انرژی در محیط‌های شهری به دلیل تکیه بر سر خوشه‌ها که انرژی بیشتری را برای مدیریت انتقال‌های متعدد مصرف می‌کردند، نسبتاً بالا بود. در مناطق روستایی، مصرف انرژی به طور قابل توجهی کمتر بود زیرا تعاملات گره کمتر بود و در نتیجه مصرف انرژی ۱۰٪ کمتر از محیط‌های شهری بود.
- **توپولوژی همپوشانی P2P:** همپوشانی P2P به دلیل انتقال‌های مکرر چندگانه و نیاز هر گره به جستجوی مداوم مسیرهای بهینه، بیشترین انرژی را در هر دو محیط مصرف کرد. در محیط‌های شهری، مصرف انرژی به دلیل حجم بالای تعاملات گره بیشتر افزایش یافت و در نتیجه ۲۵٪ مصرف برق بیشتر از توپولوژی سلسله مراتبی بود.

جدول ۴- مصرف انرژی در هر بسته در توپولوژی‌های مختلف

توپولوژی	مصرف انرژی (شهری)	مصرف انرژی (روستایی)
سلسله مراتبی	1.5 ژول در هر بسته	1.3 ژول در هر بسته
مبتنی بر خوشه	1.8 ژول در هر بسته	1.6 ژول در هر بسته
همپوشانی P2P	2.1 ژول در هر بسته	1.9 ژول در هر بسته

## ۵- بحث

یافته‌های حاصل از تجزیه و تحلیل ما، بینش‌های مهمی را در مورد تأثیر توپولوژی‌های مختلف شبکه بر عملکرد ارتباطات V2X در یک معماری خودسازمانده ارائه می‌دهد. این بخش به بررسی پیامدهای این نتایج می‌پردازد و بررسی می‌کند که چگونه ویژگی‌های ساختاری هر توپولوژی با نیازهای مختلف برنامه‌های V2X همسو می‌شود. نقاط قوت، محدودیت‌ها و مناسب بودن هر توپولوژی برای محیط‌های خاص خودرو به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد، همچنین رویکردهای ترکیبی بالقوه برای بهینه‌سازی عملکرد در تمام معیارها.

### ۱. توپولوژی سلسله مراتبی: کارایی و قابلیت اطمینان بهینه شده

توپولوژی سلسله مراتبی به ویژه در برآوردن الزامات عملکرد V2X، به ویژه در محیط‌های شهری با تراکم بالا، موثر بوده است. ماهیت ساختاریافته مسیرهای مسیریابی سلسله مراتبی با فعال کردن تجمیع داده‌ها و کاهش مسافتی که داده‌ها باید طی کنند، تأخیر را کاهش می‌دهد، زیرا گره‌ها برای مسیریابی داده‌ها از طریق شبکه به تعداد کمی گره انتخابی متکی هستند. این پیکربندی ازدحام انتقال را کاهش می‌دهد، که یک عامل حیاتی در محیط‌های شهری است که در غیر این صورت تراکم بالای خودرو می‌تواند منجر به گلوگاه شود. نتیجه یک شبکه بسیار کارآمد و قابل اعتماد است که در آن تأخیر و توان عملیاتی بهینه می‌شوند و از برنامه‌هایی با نیازهای عملکردی دقیق مانند جلوگیری از برخورد و اولویت‌بندی وسایل نقلیه اضطراری پشتیبانی می‌کنند. با این حال، رویکرد سلسله مراتبی در مناطق روستایی با تراکم گره پراکنده محدودیت‌هایی دارد. ماهیت ساختاریافته این توپولوژی به گروه‌بندی‌های از پیش تعریف شده گره متکی است که می‌تواند انطباق‌پذیری آن را در مناطقی با وسایل نقلیه کمتر یا پیکربندی‌های شبکه در حال تغییر کاهش دهد. علاوه بر این، تکیه بر گره‌های سطح بالا برای مسیریابی داده‌ها، خطر کاهش عملکرد را در صورت خرابی یک گره حیاتی یا افت غیرمنتظره در تراکم گره افزایش می‌دهد. در محیط‌های روستایی، چنین خرابی‌هایی می‌تواند پوشش و پایداری شبکه را به خطر بیندازد، که نشان می‌دهد توپولوژی‌های سلسله مراتبی ممکن است به زیرساخت‌های تکمیلی مانند واحدهای ثابت کنار جاده‌ای برای پشتیبانی از تداوم سرویس نیاز داشته باشند.

## ۲. توپولوژی مبتنی بر خوشه: عملکرد متعادل برای محیط‌های مختلط

توپولوژی مبتنی بر خوشه تعادلی را در بین معیارها ایجاد می‌کند و در محیط‌های با تراکم متوسط که شرایط شبکه نه خیلی متراکم و نه خیلی پراکنده است، عملکرد خوبی دارد. این امر آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای محیط‌های حومه شهر یا کاربری مختلط تبدیل می‌کند، جایی که توانایی مدیریت بارهای متوسط داده و حفظ کیفیت ارتباطی ثابت ضروری است. با تقسیم‌بندی وسایل نقلیه به خوشه‌هایی که توسط سر خوشه‌های محلی مدیریت می‌شوند، این توپولوژی نیاز به اتصالات چندگانه مستقیم گسترده را کاهش می‌دهد و در نتیجه تأخیر در انتقال داده‌ها و ازدحام در اطراف گره‌های مرکزی را محدود می‌کند. یکی از مزایای اصلی توپولوژی مبتنی بر خوشه، مقیاس‌پذیری آن است. از آنجایی که گره‌ها می‌توانند به طور پویا خوشه‌ها را تشکیل دهند و از بین ببرند، شبکه می‌تواند به طور موثر در پاسخ به تغییر الگوهای ترافیک منبسط یا منقبض شود. این انطباق‌پذیری تضمین می‌کند که برنامه‌های V2X می‌توانند قابلیت اطمینان متوسط و نرخ تحویل داده‌ها را بدون نیاز به کنترل بیش از حد شبکه یا مصرف برق حفظ کنند. با این حال، در محیط‌های شهری، توپولوژی مبتنی بر خوشه به دلیل وابستگی زیاد به سر خوشه‌ها با چالش‌هایی مواجه می‌شود. هنگامی که گره‌های متعدد برای انتقال داده‌ها از طریق یک سر خوشه واحد رقابت می‌کنند، ازدحام و تأخیر افزایش می‌یابد و توانایی شبکه برای مدیریت حجم بالای ترافیک را محدود می‌کند. برای کاهش این مشکلات، پیشرفت‌های آینده می‌تواند نقش‌های توزیع شده سر خوشه را بررسی کند، جایی که متعادل‌سازی بار به طور پویا مسئولیت‌های مسیریابی را در بین گره‌های متعدد در خوشه تغییر می‌دهد. در مناطق روستایی یا کم جمعیت، توپولوژی مبتنی بر خوشه با مجموعه‌ای از چالش‌های خود مواجه می‌شود. با تعداد کمتر گره برای تشکیل خوشه‌ها، این توپولوژی برای حفظ معیارهای عملکرد استاندارد خود تلاش می‌کند، زیرا مسیرهای داده طولانی‌تر می‌شوند و سر خوشه‌ها با وظایف انتقال بارگذاری می‌شوند. این محدودیت شکافی را برجسته می‌کند که می‌تواند توسط مدل‌های ترکیبی که رویکردهای سلسله مراتبی و مبتنی بر خوشه را ترکیب می‌کنند، برطرف شود و به شبکه اجازه می‌دهد تا ساختار خود را بر اساس تراکم گره و الزامات ارتباطی به طور پویا تنظیم کند.

## ۳. توپولوژی همپوشانی P2P: انعطاف‌پذیری در محیط‌های با تراکم بالا و پویا

توپولوژی همپوشانی P2P به دلیل انطباق‌پذیری و انعطاف‌پذیری خود متمایز است و آن را به ویژه در محیط‌های با تراکم بالا و بسیار پویا موثر می‌سازد. ساختار غیرمتمرکز آن به هر گره اجازه می‌دهد تا به طور مستقل بهترین مسیر موجود را برای انتقال داده انتخاب کند، که انعطاف‌پذیری در برابر خرابی گره را فراهم می‌کند، یک ویژگی ارزشمند در محیط‌های شهری با تغییرات مکرر توپولوژی به دلیل جریان‌های مختلف ترافیک. انعطاف‌پذیری توپولوژی همپوشانی P2P همچنین آن را در شرایطی که توپولوژی‌های سنتی ممکن است با مشکل مواجه شوند، مانند سناریوهای اضطراری یا واکنش به بلایا که در آن مسیرهای شبکه ممکن است بسیار غیرقابل پیش‌بینی باشند، قوی می‌سازد. علیرغم این مزایا، توپولوژی همپوشانی P2P به دلیل تکیه بر انتقال‌های چندگانه و جستجوی مداوم مسیر برای مسیریابی بهینه، انرژی‌برترین است. این مصرف انرژی بالا، مناسب بودن آن را برای برنامه‌های V2X با محدودیت برق، مانند برنامه‌هایی که به حسگرهای باتری‌دار یا وسایل نقلیه الکتریکی متکی هستند، محدود می‌کند. تقاضاهای انرژی همچنین نگرانی‌هایی را برای پایداری بلندمدت ایجاد می‌کند، به ویژه در شبکه‌های در مقیاس بزرگ که در آن تبادل مکرر داده‌ها در مسیرهای طولانی می‌تواند به سرعت منابع را تخلیه کند. برای مقابله با این چالش، شبکه‌های همپوشانی P2P ممکن است الگوریتم‌های صرفه‌جویی در انرژی را در خود جای دهند که به طور پویا گره‌های کم مصرف را برای مسیریابی در اولویت قرار می‌دهند و در نتیجه مصرف برق را بدون به خطر انداختن قابلیت اطمینان ارتباطات کاهش می‌دهند. محدودیت دیگر توپولوژی همپوشانی P2P، تأخیر بالای آن است که چالش‌هایی را برای برنامه‌های V2X بلادرنگ که به انتقال فوری داده‌ها بستگی دارند، ایجاد می‌کند. برخلاف توپولوژی‌های سلسله مراتبی و مبتنی بر خوشه که از تمرکز برای به حداقل رساندن تأخیر استفاده می‌کنند، شبکه‌های همپوشانی P2P به پرس‌های متعدد در گره‌های مختلف بستگی دارند که می‌تواند تأخیرهای قابل توجهی را ایجاد کند. در نتیجه، همپوشانی‌های P2P برای برنامه‌هایی که انعطاف‌پذیری و



انطباق پذیری بر نیاز به تأخیر کم اولویت دارند، مانند انتشار اطلاعات یا نظارت بر محیط در شرایط غیرقابل پیش بینی شبکه، مناسب تر هستند.

#### ۴. رویکردهای توپولوژی ترکیبی: ترکیب بهترین های همه دنیا

محدودیت های توپولوژی های منفرد در محیط های خاص، پتانسیل رویکردهای ترکیبی را که مزایای ساختارهای سلسله مراتبی، مبتنی بر خوشه و همپوشانی P2P را ترکیب می کنند، برجسته می کند. مدل های ترکیبی می توانند شبکه ها را قادر سازند تا به طور پویا بر اساس شرایط بلادرنگ بین انواع توپولوژی جابجا شوند و معیارهای عملکرد را در برنامه های مختلف V2X به حداکثر برسانند. به عنوان مثال، یک رویکرد ترکیبی می تواند ساختارهای سلسله مراتبی را در محیط های با تراکم بالا برای به حداقل رساندن تأخیر پیاده سازی کند، در حالی که در مناطق با تراکم متوسط به توپولوژی مبتنی بر خوشه تغییر می کند تا توان عملیاتی و قابلیت اطمینان را متعادل کند. در سناریوهای بسیار متحرک یا اضطراری، عناصر همپوشانی P2P را می توان برای افزایش انعطاف پذیری و تحمل خطا فعال کرد. ادغام الگوریتم های هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) در مدیریت توپولوژی ترکیبی می تواند انطباق پذیری شبکه را بیشتر بهبود بخشد. با پیش بینی الگوهای ترافیک و تنظیم پویا پیکربندی های توپولوژی، سیستم های V2X مجهز به هوش مصنوعی می توانند به طور مستقل ساختار بهینه را بر اساس شرایط شبکه، تراکم ترافیک و سرعت خودرو انتخاب کنند. چنین قابلیت های تطبیقی، قابلیت اطمینان ارتباطات را افزایش می دهد، تأخیر را کاهش می دهد و مصرف انرژی را کاهش می دهد و شبکه های V2X را کارآمدتر و پاسخگوتر به نیازهای مختلف می کند.

#### ۵. پیامدها برای برنامه های V2X و جهت گیری های آینده

نتایج این مطالعه بر اهمیت انتخاب توپولوژی در طراحی شبکه های کارآمد V2X تأکید می کند. هر توپولوژی مزایای خاصی را ارائه می دهد که با محیط های مختلف خودرو و برنامه های V2X همسو می شود. برای برنامه های حساس به تأخیر، توپولوژی های سلسله مراتبی قابل اطمینان ترین عملکرد را در محیط های متراکم شهری ارائه می دهند، در حالی که توپولوژی های مبتنی بر خوشه برای محیط های حومه شهر با سطوح ترافیک متوسط مناسب هستند. در همین حال، توپولوژی های همپوشانی P2P انعطاف پذیری بی نظیری را ارائه می دهند و آنها را برای سناریوهای پویا و با تراکم بالا که در آن انطباق پذیری بسیار مهم است، ایده آل می سازد. با این حال، این مطالعه به چندین زمینه برای تحقیقات آینده نیز اشاره می کند. بررسی امکان سنجی مدل های ترکیبی می تواند با ایجاد یک معماری V2X انعطاف پذیر که در زمان واقعی سازگار می شود، محدودیت های هر توپولوژی را برطرف کند. علاوه بر این، اجرای اقدامات صرفه جویی در انرژی در توپولوژی های همپوشانی P2P می تواند مصرف برق را کاهش دهد و آنها را برای استفاده گسترده در شبکه های V2X پایدارتر کند. با توجه به پیشرفت های سریع در هوش مصنوعی، تحقیقات آینده همچنین می تواند بر استفاده از الگوریتم های مدیریت توپولوژی مبتنی بر هوش مصنوعی برای افزایش عملکرد V2X در سناریوهای مختلف تمرکز کند. علاوه بر این، ادغام مکانیسم های امنیتی در V2X SON ها برای محافظت از یکپارچگی داده ها و جلوگیری از دسترسی غیرمجاز ضروری است. به عنوان مثال، فناوری بلاک چین می تواند با توپولوژی های همپوشانی P2P ادغام شود تا تبادل داده ایمن و غیرمتمرکز را امکان پذیر کند، اطمینان حاصل شود که هر ارتباط احراز هویت می شود و خطر حملات سایبری را کاهش می دهد. چنین ادغام هایی از توسعه سیستم های V2X قوی و ایمن، به ویژه در برنامه هایی که یکپارچگی داده ها در آنها بسیار مهم است، مانند رانندگی خودران، پشتیبانی می کند.

## ۶- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر توپولوژی شبکه بر عملکرد ارتباطات V2X در یک معماری شبکه خودسازمانده (SON) پرداخت. با تجزیه و تحلیل توپولوژی‌های سلسله مراتبی، مبتنی بر خوشه و همپوشانی نظیر به نظیر (P2P)، ما تأثیر هر توپولوژی را بر معیارهای کلیدی عملکرد شناسایی کردیم: تأخیر، توان عملیاتی، قابلیت اطمینان و مصرف انرژی. یافته‌ها نشان می‌دهد که هر توپولوژی بر اساس عوامل محیطی مانند تراکم گره، الگوهای ترافیک و تحرک وسایل نقلیه، مزایا و محدودیت‌های متمایزی دارد. توپولوژی سلسله مراتبی، با مسیریابی ساختاریافته و متمرکز خود، بهترین عملکرد را در محیط‌های شهری با تراکم بالا نشان داد و تأخیر کم، توان عملیاتی بالا و بهره‌وری انرژی برتر را ارائه کرد. این توپولوژی به دلیل توانایی آن در کاهش تأخیر در صف و محدود کردن ازدحام، به ویژه برای برنامه‌های V2X حساس به تأخیر مانند جلوگیری از برخورد و ارتباطات اضطراری مناسب است. در همین حال، توپولوژی مبتنی بر خوشه عملکرد متعادلی را در تمام معیارها ارائه می‌دهد و آن را برای محیط‌های با تراکم متوسط که در آن مقیاس‌پذیری و قابلیت اطمینان بدون کنترل متمرکز مورد نیاز است، ایده‌آل می‌سازد. در مقابل، توپولوژی همپوشانی P2P انعطاف‌پذیری و انطباق‌پذیری قوی ارائه می‌دهد که به ویژه در سناریوهای پویا یا اضطراری ارزشمند است. با این حال، مصرف انرژی و تأخیر بالای آن، آن را برای برنامه‌های بلندمدت کمتر مناسب می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد که رویکردهای توپولوژی ترکیبی می‌توانند محدودیت‌های هر توپولوژی منفرد را برطرف کنند. با تطبیق پویا با شرایط محیطی و شبکه، مدل‌های ترکیبی می‌توانند عملکرد را بهینه کنند و نقاط قوت ساختارهای سلسله مراتبی، مبتنی بر خوشه و همپوشانی P2P را متعادل کنند. تحقیقات آینده می‌تواند بر روی مدل‌های ترکیبی مبتنی بر هوش مصنوعی متمرکز شود، جایی که الگوریتم‌های یادگیری ماشین تنظیمات توپولوژی بلندمدت را بر اساس ترافیک پیش‌بینی‌کننده و تجزیه و تحلیل شبکه مدیریت می‌کنند. علاوه بر این، گنجاندن مسیریابی کم مصرف در همپوشانی‌های P2P و پروتکل‌های ایمن بلاک چین برای تبادل داده غیرمتمرکز می‌تواند انعطاف‌پذیری، کارایی و امنیت شبکه‌های V2X را افزایش دهد. در نتیجه، یک شبکه V2X تطبیق‌پذیر و چندلایه که از توپولوژی‌های ترکیبی استفاده می‌کند، می‌تواند یک راه حل قوی برای نیازهای ارتباطی سیستم‌های خودرویی مستقل و متصل ارائه دهد. این رویکرد انعطاف‌پذیر با الزامات متنوع سیستم‌های حمل و نقل هوشمند آینده همسو می‌شود و مسیری را به سمت شبکه‌های V2X انعطاف‌پذیر، کارآمد و مقیاس‌پذیر فراهم می‌کند.

## ۷- منابع

1. Kousaridas, A., Kaloxylas, A., Magdalinos, P., Makris, T., Koudouridis, G., & Hedby, G. (2014). Integrating the self-growing concept in a self-organizing wireless network for topology optimization. *International Journal of Network Management*, 24.
2. Cherif, M., Senouci, S., & Ducourthial, B. (2009). Vehicular network self-organizing architectures. *2009 5th IEEE GCC Conference & Exhibition*.
3. Hossain, M. F., Munasinghe, K., & Jamalipour, A. (2012). On the energy efficiency of self-organizing LTE cellular access networks. *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*.
4. Cherif, M., Senouci, S., & Ducourthial, B. (2009). A new framework of self-organization of vehicular networks. *2009 Global Information Infrastructure Symposium*.
5. Amorim, M., Benbadis, F., Fdida, S., Sichitiu, M., & Viniotis, Y. (2006). Dissecting the routing architecture of self-organizing networks. *IEEE Wireless Communications*, 13, 98-104.
6. Dargie, W. (2021). A Dynamic Topology Construction Algorithm for Self-Organizing Wireless Sensor Networks. *TechRxiv*.
7. Wang, H., & Zhang, Z. (2020). A self-routing hierarchical topology for wireless multi-hop networks management. *IEEE Proceedings on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*.
8. Antonello, P. C., Varley, T. F., Beggs, J., Porcionatto, M., Sporns, O., & Faber, J. (2021). Self-organization of in vitro neuronal assemblies drives to complex network topology. *eLife*, 11.
9. Li, L., et al. (2020). Computing-based self-organizing network routing model. *Journal of Software*.
10. Kousaridas, A., & Alonistioti, N. (2020). Topology Control in Self-managed Wireless Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*.
11. Wang, H., Zhang, Z., & Wang, S. (2020). A self-routing hierarchical topology for wireless multi-hop networks management. *IEEE Proceedings on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*.

## Evaluating the effect of network topology on the efficiency of v2x communication in a self-organizing architecture

Omid NezhadTanavardi  
Master of Computer Networks

### Abstract

This study evaluates the impact of network topology on the performance of V2X (vehicle-to-everything) communications in a self-organizing network (SON) architecture. Focusing on hierarchical, cluster-based, and peer-to-peer (P2P) overlay topologies, we investigated key performance metrics—latency, throughput, reliability, and energy consumption—in various automotive environments. The results show that the hierarchical topology is superior in high-density urban environments and provides low latency and high reliability, while the cluster-based topology provides balanced performance for medium-density environments. In contrast, P2P overlay topology is advantageous due to its adaptability and flexibility in dynamic or emergency scenarios. These findings show that hybrid topology models that are dynamically adjusted based on environmental conditions can optimize V2X performance in different scenarios. Future directions include exploring AI-based topology management and integrating low-power routing with secure and decentralized protocols to further increase network efficiency, flexibility, and scalability for V2X applications.

**Keywords:** V2X communication, self-organizing network, network topology, hierarchical topology, hybrid topology.