فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۷، شماره ٤، تابستان ۱٤۰۵، ص. ۵۷۷۱-۵۷۵۹
مقاله علمی-پژوهشی

مدل‌سازی علی عوامل مؤثر بر کارایی خودروهای خودران در سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS)

الهام اسدامرجی، استادیار، گروه مدیریت فناوری اطلاعات، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
E-mail: elham.asadamraji@iau.ac.ir

دریافت: ۱٤۰٤/۱۲/۰۳ پذیرش: ۱٤۰۵/۰٤/۰٦

چکیده

خودروهای خودران به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند(ITS) ، نقش مهمی در ارتقای ایمنی، کارایی و پایداری شبکه‌های حمل‌ونقل شهری ایفا می‌کنند. با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه فناورانه در حوزه‌های خودکارسازی، حسگرها و سامانه‌های ارتباطی، درک جامعی از روابط علّی میان عوامل فنی، انسانی، زیرساختی و نهادی مؤثر بر عملکرد خودروهای خودران همچنان محدود است. پژوهش حاضر با هدف توسعه و آزمون تجربی یک مدل علی-آماری جامع در چارچوب ITS انجام شده است. داده‌های پژوهش با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند و در دسترس، از ۳۲۰ نفر از متخصصان و کاربران بالقوه گردآوری گردید؛ این حجم نمونه با استناد به قاعده ده‌برابری (10-times rule) در روش PLS-SEM ، از کفایت لازم برای برآورد دقیق پارامترهای مدل برخوردار است. تحلیل داده‌ها با رویکرد مدل‌یابی معادلات ساختاری بر مبنای حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) انجام شد . نتایج پژوهش نشان داد که سطح خودرانگی، قابلیت اطمینان حسگرها و کیفیت ارتباطات ITS از طریق متغیرهای میانجی اعتماد، ایمنی ادراک‌شده و پذیرش فناوری، تأثیر مثبت و معناداری بر کارایی سیستم حمل‌ونقل دارند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش چارچوبی علمی و کاربردی برای پشتیبانی از سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی زیرساختی و توسعه موفق سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند مبتنی بر خودروهای خودران ارائه می‌دهد.

واژه های کلیدی: پذیرش فناوری، خودروهای خودران، سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند، مدل علی، معادلات ساختاری

۱. مقدمه

افزایش جمعیت شهری و تقاضای سفر، رشد روزافزون وسایل نقلیه و محدودیت ظرفیت زیرساخت‌ها، مدیریت شبکه‌های حمل‌ونقل را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین اطلاعات و ارتباطات، ابزاری برای ارتقای ایمنی، کاهش تراکم ترافیک و بهبود کارایی شبکه‌های حمل‌ونقل ارائه می‌دهند (Shladover,2018)، (Chen et al, 2020) خودروهای خودران به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین اجزای ITS، با استفاده از هوش مصنوعی، حسگرهای LiDAR، دوربین‌ها و ارتباطات خودرو با همه چیز(V2X[1])، می‌توانند کاهش خطاهای انسانی، افزایش ایمنی و بهینه‌سازی جریان ترافیک را به همراه داشته باشند (Talebpour & Mahmassani 2016)، (Litman, 2020)

با وجود این، پژوهش‌های قبلی عمدتاً رویکردهای شبیه‌سازی یا توصیفی داشته‌اند و کمتر به تحلیل علّی عوامل مختلف تأثیرگذار پرداخته‌اند (Katrakazas et al., 2015). همچنین، نقش عوامل انسانی، مانند اعتماد و پذیرش فناوری، در ترکیب با عوامل فنی و زیرساختی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش درصدد پر کردن این خلأ و ارائه مدل جامع و علّی است.

ارائه یک مدل علی–پژوهشی در زمینه خودروهای خودران در ITS، امکان تحلیل نظام‌مند اثر متغیرهایی نظیر سطح خودرانگی بر اساس طبقه‌بندی SAE (SAE International, 2021)، قابلیت اطمینان حسگرها، کیفیت ارتباطات ITS، رفتار کاربران جاده و میزان اعتماد و پذیرش فناوری را فراهم می‌سازد (Venkatesh et al., 2012). چنین مدلی می‌تواند علاوه بر اثرات مستقیم، روابط غیرمستقیم و تعاملی میان متغیرها را نیز آشکار کند و عدم‌قطعیت در برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را کاهش دهد.

ازاین‌رو، هدف این پژوهش توسعه و تبیین یک مدل علی در حوزه خودروهای خودران در بستر ITS است که با تلفیق مبانی نظری و شواهد تجربی، روابط علت و معلولی کلیدی را شناسایی و آزمون کند. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش مبنایی علمی برای تصمیم‌گیران و پژوهشگران فراهم آورد و مسیر استقرار ایمن و کارآمد خودروهای خودران را هموار سازد.

بخش قابل توجهی از مطالعات پیشین در حوزه خودروهای خودران و ITS، رویکردی توصیفی یا شبیه‌سازی‌محور داشته‌اند و عمدتاً به بررسی عملکرد الگوریتم‌ها یا سناریوهای ترافیکی پرداخته‌اند (Litman, 2020). هرچند این مطالعات نقش مهمی در توسعه فناوری ایفا کرده‌اند، اما برای تصمیم‌گیری‌های کلان و سیاست‌گذاری، صرف شناسایی همبستگی‌ها کافی نیست. در این راستا، پژوهش‌های علی با تمرکز بر روابط علت و معلولی، امکان پاسخ به این پرسش را فراهم می‌کنند که کدام عامل و از چه مسیری بر ایمنی، پذیرش و کارایی خودروهای خودران اثر می‌گذارد (Pearl, 2009).

فن‌آوری خودروهای خودران به عنوان یکی از مهم‌ترین تحولات در حمل و نقل هوشمند شناخته می‌شود. این فناوری می‌تواند ایمنی جاده‌ای را افزایش داده، ترافیک را کاهش دهد و دسترسی به حمل‌ونقل را برای گروه‌های مختلف جامعه تسهیل کند. با این حال، موفقیت این فناوری صرفاً به پیشرفت‌های فنی بستگی ندارد، بلکه پذیرش اجتماعی و نگرش عمومی نسبت به آن واعتماد عمومی و سازگاری با محیط‌های واقعی ترافیکی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند. رشد سریع فناوری‌های هوش مصنوعی، حسگرها و سیستم‌های ارتباطی، امکان توسعه خودروهای خودران را فراهم کرده است. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که حتی در صورت آمادگی فناوری، نبود پذیرش اجتماعی می‌تواند مانعی جدی برای استقرار گسترده خودروهای خودران باشد. از سوی دیگر، نقص در ادراک محیط یا تعامل نامناسب با سایر وسایل نقلیه می‌تواند ایمنی را به خطر اندازد.

بر این اساس، نیاز به مدلی جامع احساس می‌شود که بتواند ارتباط میان عوامل انسانی، فنی و سیستمی را در قالبی واحد تبیین کند. هدف این مقاله، ارائه چنین مدلی بر پایه تلفیق نتایج پژوهش های منتخب در حوزه خودروهای خودران است. با وجود مطالعات گسترده در زمینه عملکرد خودروهای خودران، پژوهش‌های اندکی به مدل‌سازی روابط علّی بین متغیرهای فنی، انسانی و سیاستی در ITS پرداخته‌اند.

۲. ادبیات پژوهش

بررسی ادبیات تحقیق در زمینه خودروهای خودران نشان دهنده آن است که از منظرهای مختلفی روی این حوزه پژوهش های علمی صورت پذیرفته است.

در همین راستا در تحقیقی که در سال ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ در زمینه تاثیر خودرانگی بر میزان تصادفات صورت گرفت طبقه‌بندی سطح خودرانگی خودروها را از سطح ۰ (بدون خودرانگی) تا سطح ۵ (کاملاً خودران) تعیین شده است. پژوهش‌ها نشان می دهند که افزایش سطح خودرانگی می‌تواند به کاهش تصادفات ناشی از خطای انسانی و افزایش ایمنی ترافیکی منجر شود،(Shladover, 2018) . (SAE International, 2021)

همچنین در زمینه قابلیت اطمینان حسگرها پژوهشی در سال ۲۰۱۶ انجام شده است که در آن بیان شده حسگرهای LiDAR، Radar و دوربین، امکان شناسایی محیط و موانع را برای خودروهای خودران فراهم می‌کنند. قابلیت اطمینان این حسگرها تأثیر مستقیمی بر تصمیم‌گیری خودرو و ایمنی دارد (Anderson et al., 2016).

در زمینه کیفیت ارتباطات ITS تحقیقات متعددی انجام شده است که بیان میکند ارتباطات اتصال خودرو به خودرو (V2V)[۲] و خودرو با زیرساخت‌های شهری (V2I)[۳] برای تبادل اطلاعات ترافیکی و پیشگیری از تصادفات ضروری است. کیفیت این ارتباطات بر پایداری جریان ترافیک و عملکرد کلی سیستم اثرگذار است.، (Li et al., 2019) .(Talebpour & Mahmassani,2016)

یکی دیگر از حوزه های مرتبط به خودروهای خودران حوزه اعتماد و پذیرش فناوری میباشد. اعتماد کاربران به خودروهای خودران و ادراک ایمنی از مهم‌ترین عوامل پذیرش فناوری هستند (Zhang et al., ;Venkatesh et al., 2012 2020). مطالعات نشان می‌دهند که اعتماد نقش میانجی بین عوامل فنی و پذیرش فناوری ایفا می‌کند.

گو من و همکاران مدل ACWADOE برای خودروهای خودران ارایه داده اند که نه‌تنها یک مدل محاسباتی تصمیم‌گیری برای معضلات اخلاقی خودروهای خودران ارائه می‌دهد، بلکه می‌تواند به‌عنوان مرجعی برای سایر سیستم‌های هوش مصنوعی در حل معضلات اخلاقی مورد استفاده قرار گیرد و به اتخاذ تصمیم‌های رضایت‌بخش و شفاف کمک کند (Guoman Liu, Jing Sheng & Zhen Tao,2025).

در مقاله گرافیکا جاتی و همکاران به بررسی تاثیرعوامل مختلف از جمله آلودگی بر عملکرد سنسورهای خودروهای خودران پرداخته اند. آلودگی حسگر می‌تواند به خطاهای فاجعه‌بار در وظایف پایین‌دستی منجر شود؛ برای مثال، تشخیص نادرست اشیا با اطمینان بالا. این موضوع ضرورت تشخیص آلودگی ابرنقاط را برای ارزیابی قابلیت اعتماد داده‌ها پیش از پردازش‌های بعدی برجسته می‌کند (Grafika Jati, etal,2025)؛ بنابراین یکی از مواردی که میتواند تاثیر مستقیمی بر عملکرد خودروهای خودران و اعتماد عمومی داشته باشد کارکرد درست سنسورهای این خودروها میباشد.

هدف پژوهش دیگر در حوزه خودروهای خودران طراحی یک مدل شبیه‌سازی ترافیک میکروسکوپی برای چنین خودروهایی، همراه با یک پروتکل ارتباطی مقاوم برای تبادل اطلاعات است. پرسش اساسی این است که آیا چنین سامانه ارتباطی می‌تواند به‌طور مؤثر کیفیت سفر را بهبود بخشد و در عین حال خطر تصادفات را کاهش دهد یا خیر در این مقاله، مفاهیم بنیادی، فرضیات و طراحی مدل و نرم‌افزار شبیه‌سازی خود را ارائه

می‌دهیم و همچنین چالش‌ها و مسائل بالقوه مرتبط با رویکرد پیشنهادی را مورد بحث قرار می‌دهیم..(Pawel Gora& Inga Rub,2025)

در تحقیق دیگری که توسط چارلی هویت و همکارانش انجام شده است مدل پذیرش خودروی خودران (AVAM) را معرفی شده است؛ مدلی برای سنجش پذیرش کاربران نسبت به خودروهای خودران که از مدل‌های موجود پذیرش کاربر برای فناوری‌های عمومی اقتباس شده است. بر اساس این مدل، یک پرسش‌نامه ۲۶ سؤالی تدوین شد و یک مطالعه پیمایشی برای ارزیابی ۶ سناریوی مختلف از سطوح خودرانگی انجام گرفت. یافته های این تحقیق نشان می‌دهد که خودرانگی جزئی، صرف‌نظر از سطح آن، به‌طور یکنواخت به درگیری بیشتری از سوی راننده نسبت به خودرانگی کامل نیاز دارد .این نتایج می‌توانند به متخصصان در درک بهتر ادراک عمومی از خودرانگی در سطوح مختلف SAE کمک کنند. مدل AVAMو پرسش‌نامه مرتبط با آن، امکان ارزیابی استانداردشده خودروهای خودران در مطالعات مختلف را فراهم می‌سازد و مقایسه معنادار تغییرات ادراک در طول زمان و میان فناوری‌های گوناگون را ممکن می‌کند.(Charlie Hewitt etal, 2025)

نتایج پژوهش‌های داخلی نیز نشان می‌دهد که عوامل فنی و ادراکی به‌ویژه ایمنی ادراک‌شده، اعتماد کاربران و آمادگی زیرساختی، نقش تعیین‌کننده‌ای در پذیرش و کارایی خودروهای خودران در شبکه‌های حمل‌ونقل هوشمند دارند (رحمانی و همکاران، ۱۴۰۱).

پذیرش خودروهای خودران به‌عنوان یک فناوری نوظهور، موضوع پژوهش‌های بین‌رشته‌ای در حوزه‌های مهندسی، علوم رفتاری، روان‌شناسی و سیاست‌گذاری عمومی بوده است. مرور نظام‌مند ادبیات نشان می‌دهد که مطالعات پیشین را می‌توان در چهار محور اصلی طبقه‌بندی کرد:

- مطالعات فناورانه–عملکردی
- مطالعات روان‌شناختی و ادراکی
- مطالعات اجتماعی–فرهنگی
- مدل‌های یکپارچه پذیرش فناوری

۱. مطالعات فناورانه–عملکردی

بخشی از پژوهش‌ها بر نقش عملکرد فنی، ایمنی و قابلیت اطمینان خودروهای خودران در پذیرش عمومی تمرکز داشته‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که ادراک کاربران از کاهش تصادفات، بهبود بهره‌وری حمل‌ونقل و دقت تصمیم‌گیری سیستم‌های خودران، نقش مهمی در شکل‌گیری نگرش مثبت دارد. برای مثال، مقاله منتشرشده در گزارش های علمی[۴] تأکید می‌کند که شفافیت الگوریتم‌ها و قابلیت پیش‌بینی رفتار خودرو، اعتماد کاربران را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد (Anderson et al., 2016; Shladover, 2018; Chen et al., 2020).

۲. مطالعات روان‌شناختی و ادراکی

محور مهمی از پژوهش‌ها به بررسی متغیرهای روان‌شناختی مانند اعتماد، ادراک ریسک، ترس از فناوری و کنترل ادراک‌شده پرداخته‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که حتی در صورت عملکرد فنی مطلوب، ادراک ریسک بالا و نگرانی‌های ایمنی می تواند مانع پذیرش شود. مطالعه منتشرشده در سیستم های خبره با برنامه های کاربردی[۵] نشان می‌دهد که اعتماد، قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده نگرش مثبت به خودروهای خودران است، در حالی که ریسک ادراک‌شده اثری منفی و معنادار دارد (Khan et al., 2025

; Venkatesh et al., 2012)

۳. مطالعات اجتماعی و فرهنگی

گروه دیگری از پژوهش‌ها بر نقش هنجارهای اجتماعی، رسانه‌های جمعی و پذیرش اجتماعی فناوری تمرکز دارند. این مطالعات بیان می‌کنند که نگرش افراد نه‌تنها متأثر از تجربه شخصی، بلکه تحت تأثیر دیدگاه خانواده، دوستان و بازنمایی رسانه‌ای خودروهای خودران شکل می‌گیرد. مطالعه‌ای درمجله نوآوری مسئولانه[۶] نشان می‌دهد که چارچوب‌های اخلاقی، اعتماد نهادی و سیاست‌های عمومی شفاف، نقش کلیدی در

پذیرش اجتماعی این فناوری دارند (Raats, Lund, & Brodersen, 2024).

٤. مدل‌های یکپارچه پذیرش خودروهای خودران

در پاسخ به پیچیدگی عوامل مؤثر بر پذیرش، برخی پژوهشگران اقدام به توسعه مدل‌های یکپارچه کرده‌اند.

یکی از مهم‌ترین این مدل‌ها، مدل پذیرش خودروهای خودران (AVAM)است که توسط تعدادی از پژوهشگران[۷] ارائه شده و ترکیبی از مدل‌های TAM و UTAUT محسوب می‌شود. این مدل متغیرهایی نظیر اعتماد، نگرش، ادراک ریسک و قصد استفاده را به‌صورت هم‌زمان بررسی می‌کند. مطالعه ای با عنوان" ارزیابی برداشت عمومی از خودروهای خودران[۸]" نشان می‌دهد که نگرش کاربران نقش متغیر میانجی کلیدی بین عوامل فناورانه و قصد استفاده ایفا می‌کند (Kyriakidis et al., 2015; Hewitt et al., 2019).

۲-۱ جمع‌بندی پیشینه و خلأ پژوهشی

با وجود گستردگی مطالعات انجام‌شده، مرور ادبیات نشان می دهد که اغلب پژوهش‌ها در بافت فرهنگی کشورهای توسعه‌یافته انجام شده‌اند و نقش هم‌زمان اعتماد، ریسک ادراک‌شده و هنجارهای اجتماعی کمتر در قالب یک مدل جامع بررسی شده است. (Zhang et al., 2020; Scientific Reports, 2025)مطالعات اندکی به بومی‌سازی مدل‌های پذیرش خودروهای خودران در جوامع در حال توسعه پرداخته‌اند.

بنابراین، پژوهش حاضر با ارائه یک مدل مفهومی تلفیقی و آزمون تجربی آن، تلاش می‌کند این خلأ را پوشش دهد.

۲-۲ مدل‌های پذیرش فناوری

- پذیرش اجتماعی خودروهای خودران

یکی از مدل‌های شناخته‌شده در پذیرش فناوری، مدل پذیرش خودروهای خودران[۹] است که عوامل مختلف روانی، اجتماعی و فناوری را در بررسی پذیرش کاربران مدنظر قرار می‌دهد. این مدل با اقتباس از مدل‌های پذیرش فناوری عمومی توسعه یافته است و شامل عوامل عملکرد مورد انتظار، سهولت استفاده، نگرانی‌های ایمنی و هنجارهای اجتماعی می‌باشد.

- عوامل مؤثر بر پذیرش عمومی

بررسی ادبیات نشان می‌دهد که اعتماد به فناوری و ادراک خطر از مهم‌ترین پیش‌بینی‌کنندگان نگرش مثبت به خودروهای خودران هستند. در مدل تلفیقی UTAUT، اعتماد و ریسک ادراک شده به عنوان متغیرهای کلیدی در تعیین قصد استفاده از این فناوری معرفی شده‌اند.

تحقیقات دیگر نشان داده‌اند که هنجارهای اجتماعی و رسانه‌ها می‌توانند اثر مستقیمی بر اعتماد کاربران به فناوری داشته باشند، به‌ویژه وقتی اطلاعات دقیق و مثبت درباره‌ی عملکرد خودروهای خودران منتشر شود. جدول ۱ یک جمع بندی از محور های مورد مطالعه در پیشینه تحقیق به همراه منابع آن ارایه می‌دهد.

جدول ۱. جمع بندی مطالعات حوزه خودروهای خودران

محور	توضیح	منابع پیشنهادی
مطالعات فناورانه–عملکردی	ادراک کاربران از کاهش تصادفات، بهبود بهره‌وری حمل‌ونقل و دقت تصمیم‌گیری سیستم‌های خودران که شفافیت الگوریتم‌ها و قابلیت پیش‌بینی رفتار خودرو اعتماد کاربران را افزایش می‌دهد	Anderson et al., 2016; Shladover, 2018; Chen et al., 2020
مطالعات روان‌شناختی و ادراکی	مطالعاتی که به بررسی اعتماد، ادراک ریسک، ترس از فناوری و کنترل ادراک‌شده پرداخته اند.	Khan et al., 2025 ; Venkatesh et al., 2012
مطالعات اجتماعی و فرهنگی	چارچوب‌های اخلاقی، اعتماد نهادی و سیاست‌های عمومی شفاف نقش کلیدی در پذیرش اجتماعی فناوری دارند.	Journal of Responsible Innovation, 2016; Liu et al., 2025

محور	توضیح	منابع پیشنهادی
مدل‌های یکپارچه پذیرش فناوری	مدل‌های تلفیقی مانند AVAM را ارائه کرده‌اند که ترکیبی از TAM و UTAUT بوده و متغیرهایی مانند اعتماد، نگرش، ادراک ریسک و قصد استفاده را هم‌زمان بررسی می‌کند.	Kyriakidis et al., 2015; Hewitt et al., 2019

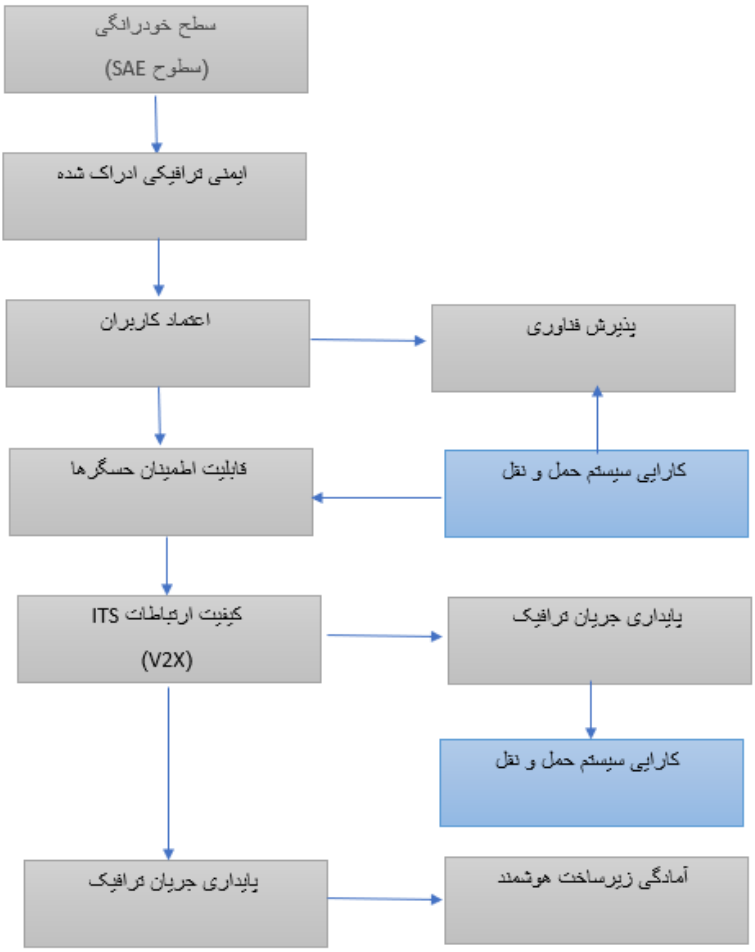
۲-۳ خلاهای پژوهشی

اکثر پژوهش‌های پیشین تنها یک بعد از عوامل فنی، انسانی یا زیرساختی را بررسی کرده‌اند و مدل علّی یکپارچه که تأثیر مستقیم و غیرمستقیم این عوامل را بر کارایی خودروهای خودران مشخص کند، به ندرت در یک مدل جامع آزمون شده است.

۳. مدل مفهومی و فرضیه‌ها

۱-۳ مدل مفهومی

مدل پژوهش شامل متغیرهای برون‌زا (سطح خودرانگی، قابلیت اطمینان حسگرها، کیفیت ارتباطات ITS، آمادگی زیرساخت)، متغیرهای میانجی (ایمنی ادراک‌شده، اعتماد کاربران، پذیرش فناوری) و متغیر درون‌زا (کارایی سیستم حمل‌ونقل) است (شکل ۱).



شکل ۱. نمایش شماتیک مدل مفهومی پژوهش

۳-۲ فرضیه‌های پژوهش

H1: سطح خودرانگی خودرو تأثیر مثبت بر ایمنی ادراک‌شده دارد.

H2: قابلیت اطمینان حسگرها تأثیر مثبت بر اعتماد کاربران دارد.

H3: کیفیت ارتباطات I TS تأثیر مثبت بر پایداری جریان ترافیک دارد.

H4: اعتماد کاربران تأثیر مثبت بر پذیرش فناوری دارد.

H5: پذیرش فناوری تأثیر مثبت بر کارایی سیستم حمل‌ونقل دار

H6: پایداری جریان ترافیک تأثیر مثبت بر کارایی سیستم حمل‌ونقل دارد.

٤. روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، کمی با رویکرد توصیفی–تحلیلی است و با هدف شناسایی و تبیین روابط علّی میان عوامل مؤثر بر پذیرش و کارایی خودروهای خودران در چارچوب سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند انجام شده است. رویکرد کلی پژوهش مبتنی بر مدل‌یابی معادلات ساختاری است که امکان بررسی هم‌زمان روابط میان متغیرهای پنهان و مشاهده‌پذیر را فراهم می‌سازد. با توجه به پیچیدگی مدل مفهومی، وجود متغیرهای میانجی متعدد و ماهیت اکتشافی–تبیینی پژوهش، روش حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM) به‌عنوان روش تحلیل اصلی انتخاب شد.

جامعه آماری پژوهش شامل متخصصان حوزه حمل‌ونقل و سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند، مدیران و کارشناسان فعال در حوزه ITS و همچنین کاربران بالقوه خودروهای خودران در شهرهای بزرگ کشور بود. نمونه‌گیری به روش در دسترس و هدفمند انجام شد و در نهایت ۳۲۰ پرسشنامه معتبر برای تحلیل آماری مورد استفاده قرار گرفت. حجم نمونه با توجه به قاعده ده‌برابری در مدل‌های PLS-SEM و تعداد بیشترین مسیرهای ورودی به یک سازه، کفایت لازم را دارا است.

ابزار اصلی گردآوری داده‌ها، پرسشنامه‌ای ساخت‌یافته بود که گویه‌های آن از طریق مرور نظام‌مند ادبیات و تطبیق با پرسشنامه‌های استاندارد در حوزه پذیرش فناوری (TAM/UTAUT)و سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند استخراج گردید. این پرسشنامه شامل دو بخش اصلی است: بخش اول به ویژگی‌های دموگرافیک پاسخ‌دهندگان می‌پردازد و بخش دوم شامل ۳۲ گویه برای سنجش ۹ سازه اصلی مدل پژوهش است. به‌منظور عملیاتی‌سازی متغیرها، از طیف پنج‌درجه‌ای لیکرت استفاده شد. جزئیات سازه‌ها، تعداد گویه‌ها و نمونه‌ای از سؤالات پرسشنامه در جدول ۲ ارائه شده است. برای سنجش سازه‌های پژوهش شامل سطح خودرانگی، قابلیت به‌منظور اطمینان از روایی ابزار، روایی محتوایی پرسشنامه با بهره‌گیری از نظرات خبرگان دانشگاهی و متخصصان حوزه ITSبررسی و اصلاح شد. همچنین، روایی سازه از طریق ارزیابی روایی همگرا و واگرا مورد سنجش قرار گرفت. پایایی ابزار اندازه‌گیری نیز با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی بررسی شد که نتایج حاکی از مناسب بودن مقادیر به‌دست‌آمده برای تمامی سازه‌ها بود. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SmartPLS 4 انجام شد و در این فرایند، ابتدا مدل اندازه‌گیری و سپس مدل ساختاری مورد آزمون قرار گرفت. در نهایت، معناداری ضرایب مسیر با استفاده از روش بوت‌استرپینگ و شاخص‌های برازش مدل مورد ارزیابی قرار گرفت تا اعتبار نتایج پژوهش تضمین شود.

جدول ۲. شاخص‌های اندازه‌گیری سازه‌های پژوهش

سازه (Variable)	تعدادگویه‌ها	نمونه گویه / منبع
سطح خودرانگی	۳	عملکرد خودرو در شرایط مختلف بدون مداخله راننده برای من اهمیت دارد.
قابلیت اطمینان حسگرها	٤	معتقدم سنسورهای خودروهای خودران در شرایط جوی نامساعد دقیق عمل می‌کنند.

سازه (Variable)	تعدادگویه‌ها	نمونه گویه / منبع
کیفیت ارتباطات ITS	٤	زیرساخت‌های ارتباطی (V2X) داده‌ها را با سرعت و دقت کافی انتقال می‌دهند.
آمادگی زیرساخت	٣	مسیرهای ویژه و تجهیزات جاده‌ای برای تردد این خودروها در شهر مهیا است.
ایمنی ادراک‌شده	٤	استفاده از خودروهای خودران، احتمال بروز تصادفات ناشی از خطای انسانی را کاهش می‌دهد.
اعتماد کاربران	٤	من به تصمیمات سیستم هوشمند خودرو در موقعیت‌های بحرانی اعتماد دارم.
پذیرش فناوری	٣	در صورت دسترسی، تمایل دارم در آینده از خودروهای خودران استفاده کنم.
پایداری جریان ترافیک	٤	حضور خودروهای خودران باعث کاهش نوسانات سرعت و بهبود جریان ترافیک می‌شود.
کارایی سیستم حمل‌ونقل	٣	استقرار این سیستم منجر به کاهش زمان سفر و مصرف سوخت در شبکه می‌گردد.

٤-١ مدل آماری و روش تحلیل

مدل آماری پژوهش بر اساس **معادلات ساختاری با رویکرد حداقل مربعات جزئی** (PLS-SEM) طراحی شد. این روش به دلیل قابلیت بررسی هم‌زمان روابط مستقیم و غیرمستقیم بین متغیرهای پنهان و مشاهده‌پذیر و همچنین نیاز کمتر به توزیع نرمال داده‌ها، برای تحلیل روابط پیچیده بین عوامل فنی، رفتاری و زیرساختی خودروهای خودران مناسب است. مدل شامل **متغیرهای برون‌زا** (سطح خودرانگی، قابلیت اطمینان حسگرها، کیفیت ارتباطات ITS، آمادگی زیرساخت)، **متغیرهای میانجی** (ایمنی ادراک‌شده، اعتماد کاربران، پذیرش فناوری، پایداری جریان ترافیک) و **متغیر درون‌زا** (کارایی سیستم حمل‌ونقل) می‌باشد.

فرایند تحلیل به دو مرحله اصلی تقسیم شد: نخست، ارزیابی مدل اندازه‌گیری جهت سنجش روایی و پایایی سازه‌ها با شاخص‌هایی نظیر آلفای کرونباخ، پایایی ترکیبی و میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE) و دوم، تحلیل مدل ساختاری برای بررسی فرضیه‌ها و روابط علت و معلولی. معناداری مسیرها با استفاده از **روش بوت‌استرپینگ** و تعداد ٥٠٠٠ نمونه بازنمونه‌گیری ارزیابی شد تا اطمینان از دقت برآورد ضرایب مسیر حاصل شود. علاوه بر این، شاخص‌های برازش مدل شامل R^2، f^2 و Q^2 محاسبه شدند تا قدرت تبیینی و اعتبار پیش‌بینی مدل ارزیابی گردد.

این روش تحلیل امکان تفکیک **تأثیرات مستقیم، غیرمستقیم و کل** هر متغیر بر پذیرش فناوری و کارایی سیستم حمل‌ونقل را فراهم می‌کند و به پژوهشگران و تصمیم‌گیران اجازه می‌دهد تا عوامل کلیدی مؤثر بر موفقیت استقرار خودروهای خودران در چارچوب ITS را به‌صورت کمی و دقیق شناسایی کنند. نتایج این تحلیل نشان‌دهنده اهمیت ترکیبی عوامل فنی، رفتاری و زیرساختی در ارتقای کارایی سیستم و پذیرش عمومی خودروهای خودران است.

برای آزمون روابط علّی، از مدل‌یابی معادلات ساختاری (SEM) با رویکرد PLS استفاده شد. مدل آماری شامل معادلات زیر است: ایمنی ادراک‌شده (= β١ سطح خودرانگی + ε١)

اعتماد کاربران (= β٢ قابلیت اطمینان حسگرها + ε٢)

پایداری جریان ترافیک = β٣(کیفیت ارتباطات ITS) + β٤(آمادگی زیرساخت) + ε٣

پذیرش فناوری = β٥(اعتماد کاربران) + β٦(ایمنی ادراک‌شده) + ε٤

کارایی سیستم حمل‌ونقل = β٧(پذیرش فناوری) + β٨(پایداری جریان ترافیک) + ε٥

٥. تحلیل داده‌ها

به‌منظور آزمون مدل مفهومی و فرضیه‌های پژوهش، از روش مدل‌یابی معادلات ساختاری با رویکرد حداقل مربعات جزئی (PLS-SEM)استفاده شد. در گام نخست، مدل اندازه‌گیری مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که تمامی سازه‌ها از

پایایی درونی مناسبی برخوردار هستند، به‌طوری‌که مقادیر آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی برای کلیه متغیرها بالاتر از حد آستانه ۷/۰ محاسبه شد. همچنین، مقادیر میانگین واریانس استخراج‌شده (AVE) برای تمام سازه‌ها بیش از ۵/۰ بود که بیانگر تأیید روایی همگرا است. روایی واگرا نیز بر اساس معیار فورنل–لارکر و بارهای عاملی متقاطع تأیید شد و نشان داد که هر سازه تمایز مفهومی مناسبی با سایر سازه‌ها دارد.

در مرحله دوم، مدل ساختاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ضرایب مسیر نشان داد که سطح خودرانگی خودرو تأثیر مثبت و معناداری بر ایمنی ترافیکی ادراک‌شده دارد که بیانگر افزایش احساس ایمنی کاربران با ارتقای سطح خودرانگی است. همچنین، قابلیت اطمینان حسگرها تأثیر مستقیم و قوی بر اعتماد کاربران به خودروهای خودران نشان داد که اهمیت زیرساخت‌های فنی و دقت عملکرد سیستم‌های خودران را برجسته می‌سازد. نتایج حاکی از آن است که کیفیت ارتباطات ITSو آمادگی زیرساخت هوشمند تأثیر معناداری بر پایداری جریان ترافیک دارند. همچنین، یافته‌ها بیانگر آن است که آمادگی زیرساخت به‌صورت مستقیم بر کارایی سیستم حمل‌ونقل اثرگذار نیست، بلکه این اثر از طریق متغیر میانجی «پایداری جریان ترافیک» منتقل می‌شود. به‌عبارت دیگر، آمادگی زیرساخت از طریق بهبود جریان ترافیک، به ارتقای کارایی سیستم حمل‌ونقل کمک می‌کند.از سوی دیگر، اعتماد کاربران و ایمنی ادراک‌شده به‌عنوان متغیرهای میانجی، اثر معناداری بر پذیرش فناوری خودروهای خودران دارند. پذیرش فناوری نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌های مدل، بیشترین اثر مستقیم را بر کارایی سیستم حمل‌ونقل نشان داد که این موضوع بیانگر نقش کلیدی عوامل رفتاری و ادراکی در موفقیت استقرار خودروهای خودران در چارچوب ITS است. مقدار ضریب تعیین (R^2) برای متغیر پذیرش فناوری و کارایی سیستم حمل‌ونقل در سطح قابل قبول ارزیابی شد که نشان‌دهنده قدرت تبیین مناسب مدل پیشنهادی است. در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که مدل ارائه‌شده از برازش مطلوبی برخوردار بوده و قادر است روابط علّی میان عوامل فنی، انسانی و زیرساختی مؤثر بر عملکرد خودروهای خودران را به‌صورت جامع تبیین کند.

جدول ۳. فرضیات تحقیق و نتایج بدست آمده از بررسی آنها

فرضیه	مسیر	β	آماره t	مقدار p	نتیجه
H1	سطح خودرانگی → ایمنی ادراک‌شده	0.41	6.52	<0.001	تأیید
H2	قابلیت اطمینان حسگرها → اعتماد کاربران	0.47	7.11	<0.001	تأیید
H3	پایداری جریان ترافیک → ITS کیفیت ارتباطات	0.52	8.34	<0.001	تأیید
H4	اعتماد کاربران → پذیرش فناوری	0.58	9.02	<0.001	تأیید
H5	پذیرش فناوری → کارایی سیستم حمل‌ونقل	0.46	3.27	<0.01	تأیید
H6	پایداری جریان ترافیک → کارایی سیستم حمل‌ونقل	0.39	2.98	<0.01	تأیید

علاوه بر اثرات مستقیم، اثرات غیرمستقیم متغیرها نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آمادگی زیرساخت هوشمند از طریق متغیر میانجی «پایداری جریان ترافیک» اثر غیرمستقیم و معناداری بر کارایی سیستم حمل‌ونقل دارد. این یافته نشان می‌دهد که توسعه زیرساخت‌های هوشمند، اگرچه به‌طور مستقیم موجب افزایش کارایی نمی‌شود، اما از طریق بهبود پایداری و روانی جریان ترافیک می‌تواند عملکرد کلی سیستم حمل‌ونقل را ارتقا دهد.

جدول ٤. جدول اثرات غیرمستقیم(Indirect Effects)

مسیر غیرمستقیم	ضریب اثر غیرمستقیم	مقدارp	نتیجه
آمادگی زیرساخت → پایداری جریان ترافیک → کارایی سیستم حمل‌ونقل	0.21	<0.01	معنادار

نتایج مدل اندازه‌گیری: پایایی و روایی سازه‌ها تأیید شد (CR>0.7، AVE>0.5). مدل ساختاری نیز نشان داد که تمامی فرضیه‌ها معنادار هستند:

سطح خودرانگی → ایمنی ادراک‌شده(β=0.41, p<0.001)

قابلیت اطمینان حسگرها → اعتماد کاربران (β=0.47, p<0.001)

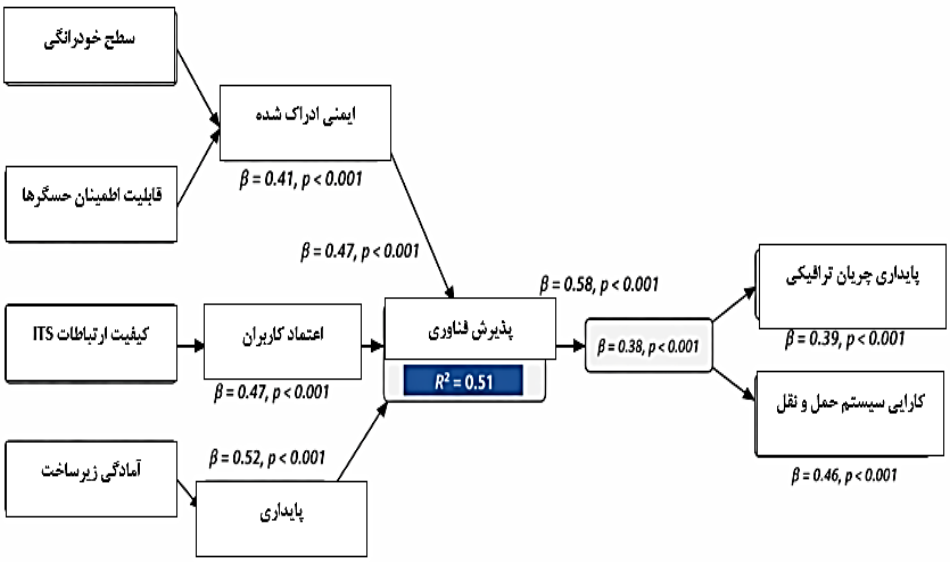
کیفیت ارتباطات ITS → پایداری جریان ترافیک (β=0.52, p<0.001)

اعتماد کاربران → پذیرش فناوری(β=0.58, p<0.001)

پذیرش فناوری → کارایی سیستم حمل‌ونقل (β=0.46, p<0.01)

پایداری جریان ترافیک → کارایی سیستم حمل‌ونقل (β=0.39, p<0.01) R^2 پذیرش فناوری=۰,٦١، R^2 کارایی=۰,٦٧

نتایج بدست آمده در غالب نمودار حرفه ای به صورت شکل زیر نمایش داده میشود:



شکل ۲. مدل مسیر با نتایج PLS-SEM

٦. بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارائه و آزمون یک مدل علّی–آماری جامع برای تبیین عوامل مؤثر بر پذیرش و کارایی خودروهای خودران در چارچوب سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS) انجام شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی معادلات ساختاری به روش PLS-SEMنشان داد که متغیرهای فناورانه نظیر سطح خودرانگی، قابلیت اطمینان حسگرها و کیفیت ارتباطاتITS ، به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر پذیرش فناوری و در نهایت بر کارایی سیستم حمل‌ونقل تأثیرگذار هستند. همچنین، نقش متغیرهای میانجی شامل ایمنی ادراک‌شده، اعتماد کاربران و پایداری جریان ترافیک در انتقال اثرات متغیرهای برون‌زا به متغیر وابسته نهایی تأیید شد. یافته‌ها بیانگر آن است که اعتماد کاربران و پذیرش فناوری، قوی‌ترین اثر مستقیم را بر بهبود کارایی سیستم حمل‌ونقل دارند که این امر اهمیت ابعاد رفتاری و ادراکی را در کنار ملاحظات فنی برجسته می‌سازد.

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات انجام‌شده در کشورهای درحال‌توسعه و نیز پژوهش‌های داخلی همخوانی دارد. به‌عنوان نمونه، رحمانی و همکاران (۱۴۰۱) نیز نشان دادند که اعتماد کاربران و کیفیت زیرساخت‌های هوشمند از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های حمل‌ونقل هوشمند در ایران هستند. بااین‌حال، در پژوهش حاضر نقش متغیرهای میانجی نظیر پایداری جریان ترافیک و ایمنی ادراک‌شده با شدت بیشتری تأیید شد که می‌تواند ناشی از تفاوت در سطح آمادگی زیرساختی و شرایط ترافیکی کلان‌شهرهای ایران باشد. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه الگوهای پذیرش خودروهای خودران در کشورهای درحال‌توسعه از برخی روندهای جهانی تبعیت می‌کند، اما عوامل بومی و زیرساختی همچنان نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پیاده‌سازی این فناوری دارند. از سوی دیگر، نتایج نشان داد آمادگی زیرساخت و کیفیت ارتباطات هوشمند، نقش معناداری در افزایش پایداری جریان ترافیک ایفا می‌کنند که خود به‌طور غیرمستقیم موجب ارتقای عملکرد کلی شبکه حمل‌ونقل می‌شود. در مجموع، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که استقرار موفق خودروهای خودران نیازمند رویکردی یکپارچه است که هم‌زمان به ابعاد فناورانه، زیرساختی و رفتاری توجه داشته باشد. مدل ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان چارچوبی تحلیلی برای سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان حمل‌ونقل و پژوهشگران حوزه ITS در ارزیابی و توسعه راهبردهای پیاده‌سازی خودروهای خودران مورد استفاده قرار گیرد.

۷. پیشنهادها و محدودیت‌ها

از جمله محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان به استفاده از داده‌های ادراکی مبتنی بر پرسشنامه اشاره کرد که ممکن است تحت تأثیر برداشت‌های ذهنی پاسخ‌دهندگان قرار گرفته باشد. همچنین، جامعه آماری پژوهش محدود به کاربران بالقوه و متخصصان حوزه حمل‌ونقل هوشمند بوده و این امر می‌تواند تعمیم‌پذیری نتایج به سایر گروه‌های اجتماعی یا مناطق جغرافیایی را محدود سازد. از سوی دیگر، در این پژوهش از داده‌های واقعی عملکرد ترافیکی و میدانی خودروهای خودران استفاده نشده است که می‌تواند بر دقت برآورد برخی روابط علّی اثرگذار باشد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با بهره‌گیری از داده‌های واقعی ترافیکی، شبیه‌سازی‌های پیشرفته و رویکردهای ترکیبی کمی–کیفی و طراحی داشبورد نظارت بر شاخص‌های اعتماد و ایمنی ادراک‌شده در سامانه‌های ITS شهری بر اساس ضرایب مسیر برآوردشده در این مدل به اعتبارسنجی و توسعه مدل ارائه‌شده بپردازند. همچنین بررسی نقش عوامل فرهنگی، نهادی و مقرراتی در پذیرش خودروهای خودران و مقایسه نتایج در شهرها یا کشورهای مختلف می‌تواند به غنای ادبیات پژوهش و ارائه راهکارهای سیاستی دقیق‌تر کمک کند.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Vehicle-to-Everything
2. Vehicle-to-Vehicle
3. Vehicle-to-Infrastructure
4. Scientific Reports
5. Expert Systems with Applications
6. Journal of Responsible Innovation
7. Kyriakidis و همکاران
8. Assessing Public Perception of Self-Driving Cars
9. Autonomous Vehicle Acceptance Model – AVAM

۹. مراجع

– رحمانی، م.، احمدی، ح.، و کریمی، س. (۱۴۰۱). بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش خودروهای خودران در سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند شهری. فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، ۱۳(٤)، ٤٥,٦٠.

- Anderson, J. M., Kalra, N., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C., & Oluwatola, O. A. (2016). Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers. RAND Corporation.

- Chen, T., Liu, Z., Wang, D., & Zhang, H. (2020). Traffic flow analysis for autonomous

- Raats, K., Lund, J., & Brodersen, M. (2024). Trust in autonomous vehicles: Insights from a Swedish suburb. Journal of Responsible Innovation, 11(1), 2318825

- SAE International. (2021). Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles (J3016).

- Scientific Reports. (2025). Public trust and behavioral intention toward autonomous vehicles. Scientific Reports, 15, Article 8187. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91921-0

- Shladover, S. E. (2018). Connected and automated vehicle systems: Introduction and overview. Journal of Intelligent Transportation Systems, 22(3), 190–200.

- Talebpour, A., & Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. Transportation Research Part C, 71, 143–163.

- Venkatesh, V., Thong, J. Y. L., & Xu, X. (2012). Consumer acceptance and use of information technology: Extending the unified theory of acceptance and use of technology. MIS Quarterly, 36(1), 157–178.

- Zhang, Y., Jing, P., & Li, M. (2020). User acceptance of autonomous vehicles: An empirical study. Transportation Research Part F, 72, 1–15.

vehicles in intelligent transportation systems. Transportation Research Part C, 113, 21–35.

- Khan, M. A., Zhang, Y., & Li, H. (2025). Modeling trust and perceived risk in autonomous vehicle adoption. Expert Systems with Applications, 211, 118608.

- Hewitt, C., Politis, I., Amanatidis, T., & Sarkar, A. (2019). Assessing public perception of self-driving cars: The autonomous vehicle acceptance model. In Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces (pp. 518–527). ACM. https://doi.org/10.1145/3301275.3302268

- Katrakazas, C., Quddus, M., Chen, W. H., & Deka, L. (2015). Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: State-of-the-art and future research directions. Transportation Research Part C, 60, 416–442.

- Kyriakidis, M., Happee, R., & de Winter, J. C. F. (2015). Assessing public perception of self-driving cars: The autonomous vehicle acceptance model. Transportation Research Part F, 30, 70–84.

- Li, Z., Chai, Y., & Li, Q. (2019). Impact of V2X communication on traffic efficiency. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20(10), 3928–3939.

- Litman, T. (2020). Autonomous vehicle implementation predictions. Victoria Transport Policy Institute.

- Liu, G., Sheng, J., & Tao, Z. (2025). Application and design of a decision-making model in ethical dilemma for self-driving cars. Scientific Reports, 15, Article 8187. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91921-0

- Pearl, J. (2009). Causality: Models, reasoning, and inference (2nd ed.). Cambridge University Press.

الهام اسدامرجی، درجه کارشناسی در رشته علوم کامپیوتر، درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی فناوری اطلاعات، و موفق به کسب درجه عالی دکترا در رشته مدیریت فناوری اطلاعات از دانشگاه آزاد تهران شمال در سال ۹۸ گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان حوزه هوش مصنوعی، ITS، سامانه های حمل و نقل هوشمند و مسایل حقوقی مرتبط با حوزه فناوری اطلاعات میباشد.