

## مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از

### چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلايق رانندگان

محمدعلی حقیقت، کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

عبدالاحد چوپانی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

**E-mail: ahadchoupani@shahroodut.ac.ir**

فرشید افشار، کارشناسی ارشد حمل و نقل، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

#### چکیده

مدلسازی تصمیم توقف یا عبور رانندگان هنگام مواجهه با چراغ زرد نقش مهمی در سیستم‌های پیشگیری از تردید (dilemma protection)، کمک راننده (driver-assistive)، و هشدار به راننده دارد. تصمیم نادرست منجر به تصادفات و مخاطرات ایمنی می‌شود. مدل‌های پیش‌بینی تصمیم توقف/عبور به دو گروه مدل‌های رگرسیونی و تئوری مطلوبیت تقسیم بندی می‌شوند. اما مشخص نیست کدام گروه از این مدل‌ها، قدرت پیش‌بینی بهتری دارند و آیا منطق و تئوری قویتر مدل‌های مطلوبیت، منجر به برآزش و پیش‌بینی بهتری می‌شود. علاوه بر آن در مطالعات پیشین، کمتر اتفاق افتاده است که هر سه تصمیم توقف، عبور از چراغ زرد، و عبور از چراغ قرمز با هم پیش‌بینی شود. هدف از مقاله جاری، مقایسه نکویی برآزش و پیش‌بینی صحیح این دو گروه از مدل‌ها با در نظر گرفتن تصمیم نالیمن عبور از چراغ قرمز می‌باشد. همچنین بررسی شد در نظر گرفتن اختلاف سلیقه تصادفی یا ناهمگنی رانندگان در کنار ناهمگنی مکانی به کمک مدل‌های تئوری مطلوبیت، آیا سبب بهبود پیش‌بینی تصمیم‌های رانندگان می‌شود یا خیر. لذا طیف وسیعی از مدل‌های خانواده تئوری مطلوبیت از جمله لوچیت چندجمله‌ای، آشیانه‌ای، و ترکیبی و مدل‌های رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای، ترتیبی، و پروبیت ساخته و پرداخته شد. سپس نکویی برآزش و توانایی پیش‌بینی این دو گروه مقایسه شد. برای مدلسازی، داده‌های سه تقاطع نهضت، مدرس، و مازندران در شهر سمنان، به کمک فیلمبرداری استخراج شد. شاخص‌های لگاریتم درست نمایی، نسبت درست نمایی، درصد برآورد درست، و شاخص اطلاعات آکاپکه (AIC) نشان می‌دهد که نکویی برآزش مدل‌های رگرسیونی بهتر از مدل‌های تئوری مطلوبیت است. اعتبارسنجی به کمک ۲۰ درصد از داده‌ها نیز موید همین مطلب بود. اما مزیت مدل‌های تئوری مطلوبیت، نشان دادن ناهمگنی سلايق رانندگان و ناهمگنی مکانی بود. مدل رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای با ۹۹/۴۳ درصد برآورد درست به عنوان بهترین مدل شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: تصمیم‌گیری رانندگان، تئوری مطلوبیت، رگرسیون لجستیک، عبور از چراغ زرد/قرمز، ناهمگنی رانندگان و مکانی

## ۱. مقدمه

در سیستم حمل و نقل شهری، تقاطعات اهمیت ویژه‌ای دارد و بطور مستقیم عملکرد معابر را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. بیش از نیمی از سفرهای درون شهری با تقاطعات چراغدار برخورد دارند (Abdul Razzaqi et al, 2019). هنگام عبور رانندگان از تقاطع‌های چراغ دار، برای انتقال از فاز سبز به قرمز، چراغ زرد به کار می‌رود. چراغ زرد، به رانندگان درباره پایان زمان استفاده مجاز از راه هشدار می‌دهد و اعلام می‌کند چراغ قرمز به زودی روشن خواهد شد. ثانیاً برای وسایل نقلیه‌ای که در آخرین لحظات زمان سبز وارد تقاطع شده‌اند، فرصت کافی جهت تخلیه تقاطع، مقابل می‌دهد.

در بین رانندگانی که از تقاطع عبور می‌کنند، تعدادی در تخلیه کامل تقاطع پیش از چراغ قرمز موفق هستند. اما عده‌ای دیگر، ممکن است با چراغ قرمز مواجه شوند و به خاطر توقف دیر هنگام، باعث مسدود شدن تقاطع شوند. یا به خاطر سبز شدن چراغ مسیر دیگر، باعث تصادف جلو به پهلو با خودروهای خیابان کناری شوند. عده‌ای دیگر که قصد توقف دارند ممکن است با ترمز ناگهانی سبب تصادفات سپر به سپر با خودروهای پشت سر خود شوند.

بخشی از زمان زرد، جزء زمان سبز موثر<sup>۱</sup> حساب می‌شود. به این ترتیب چراغ زرد بر طول سبز موثر و به صورت غیر مستقیم بر ظرفیت تقاطع نیز اثر می‌گذارد (Najmi, 2017). در نتیجه تصمیم رانندگان هنگام مواجه با چراغ زرد، نقش بسزایی در ظرفیت تقاطع، تاخیر، تصادفات و ایمنی خودروها ایفا می‌کند. انتخاب یکی از عنصرهای اساسی در فرآیند تصمیم‌گیری است. مرور بر ادبیات موضوع نشان می‌دهد، مدل‌های انتخاب گسسته<sup>۲</sup> که برای پیش‌بینی تصمیم توقف/عبور به کار می‌روند، به دو گروه عمده تقسیم می‌شود. در گروه اول مدل‌های رگرسیونی نظیر رگرسیون لجستیک و درخت تصمیم‌گیری قرار دارد. در گروه

دوم، خانواده مدل‌های تئوری مطلوبیت<sup>۳</sup> نظیر لوجیت چندجمله‌ای<sup>۴</sup> و آشیانه‌ای<sup>۵</sup> قرار دارد. واژه انتخاب گسسته نشان می‌دهد که تصمیم‌گیرنده با یک مجموعه از گزینه‌های مجزا مواجه است که تنها می‌تواند یکی از آن‌ها (و نه مقداری از هر کدام) را برگزیند. رگرسیون لجستیک برای وضعیت‌هایی مفید است که احتمال رخ دادن یک پیشامد یا چند پیشامد مرتب شده، بر اساس ترکیب خطی مقادیر مجموعه‌ای از متغیرهای پیشگویی کننده، مدنظر باشد.

در تئوری مطلوبیت، فرض بر این است که تصمیم‌گیرنده وقتی با یک انتخاب مواجه می‌شود، ترجیح شخصی او نسبت به سایر گزینه‌های پیش رو می‌تواند با یک معیار مطلوبیت یا جذابیت<sup>۶</sup> بیان گردد. این مطلوبیت تابعی از ویژگی‌های گزینه‌ها و نیز مشخصات تصمیم‌گیرنده است. فرض می‌شود که تصمیم‌گیرنده، گزینه‌ای را انتخاب می‌نماید که بیشترین مطلوبیت را برای او دارد. مدل‌های تئوری مطلوبیت، کاربرد و محبوبیت بیشتری در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی فرآیندهای تصمیم‌گیری کاربران راه و سفرسازان<sup>۷</sup> دارند. همچنین مدل‌های تئوری مطلوبیت، منطق و مفهوم قوی‌تری دارند. اما، سادگی کاربرد مدل‌های رگرسیونی، استفاده گسترده‌تر آن در سایر رشته‌ها و زمینه‌های علمی، جایگاه خاصی به مدل‌های رگرسیونی بخشیده است.

در مدل‌های تئوری مطلوبیت، برای هر گزینه انتخابی، یک تابع مطلوبیت در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای تابع مطلوبیت هر گزینه، کالیبره (پرداخت) می‌شود. سپس بر اساس این مطلوبیت، احتمال انتخاب گزینه‌ها تخمین زده می‌شود. اما در مدل‌های رگرسیونی، احتمال انتخاب یک گزینه در مقایسه با یک گزینه مبنا بیان می‌شود. لذا هیچ تابع احتمالی برای انتخاب گزینه مبنا به دست نمی‌آید و پارامتری نیز برای آن کالیبره نمی‌شود. به عبارتی دیگر، به صورت مستقیم، نمی‌توان تاثیر متغیرهای اثرگذار را بر گزینه مبنا به دست آورد و تحلیل‌هایی نظیر تحلیل حساسیت برای گزینه مبنا انجام داد. این نقیصه و کمبود مدل‌های

مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلاقی رانندگان

به کار رود، از آن به لحاظ کردن ناهمگنی سلاقی تصادفی رانندگان به کمک مدل با پارامترهای تصادفی<sup>۱۱</sup> یاد می‌شود. منظور از ناهمگنی مکانی<sup>۱۲</sup> در مقاله جاری، تفاوت تصمیمات رانندگان در تقاطع‌های مختلف یک شهر است. تصمیمات رانندگان از تقاطعی به تقاطعی دیگر، و از مکانی به مکانی دیگر، متغیر است. برای لحاظ ناهمگنی مکانی، متغیرهای کمکی مربوط به تقاطعات، نظیر اینکه آیا راننده قصد عبور از تقاطع خاصی دارد یا نه، در مدل‌سازی تعریف شد. اگر این متغیرها، تاثیر معناداری بر تصمیم رانندگان داشته باشد، نشان می‌دهد تصمیمات رانندگان در تقاطع‌های مختلف یکسان نیست.

هدف اصلی و یکی دیگر از نوآوری‌های مقاله جاری، مقایسه برازندگی و قدرت پیش‌بینی مدل‌های رگرسیونی و تئوری مطلوبیت هست. برای این منظور، مدل لوجیت چندجمله‌ای و انواع خبره‌تری از مدل‌های مطلوبیت نظیر لوجیت آشیانه‌ای و لوجیت ترکیبی پرداخت و اعتبارسنجی می‌شود تا بررسی شود مدل‌های تئوری مطلوبیت که منطق و مفهوم قوی‌تری دارند و گاهی نیز این مساله پیچیدگی محاسباتی را افزایش می‌دهد، آیا منجر به برازش بهتری در مقایسه با مدل‌های رگرسیون لجستیک می‌شود.

همچنین اغلب مدل‌هایی که پیش از این ساخته شدند، تصمیم توقف و عبور از چراغ زرد را مدل‌سازی کرده‌اند. به عبارتی، متغیر تصمیم اغلب یک متغیر دودویی بوده است. اما در این مقاله هر سه تصمیم توقف، عبور از چراغ زرد، و عبور از چراغ قرمز در نظر گرفته می‌شود. عبور از چراغ قرمز سبب تصادفات شدیدی در تقاطع می‌شود و از دیدگاه تصادفات و ایمنی، بسیار مهم هست. همچنین این کار، یعنی در نظر گرفتن سه گزینه تصمیم‌گیری، امکان به کارگیری طیف گسترده‌تری از مدل‌ها نظیر رگرسیون لجستیک ترتیبی و لوجیت آشیانه‌ای را می‌دهد. مثلا تصمیم توقف را می‌توان در یک آشیانه و عبور را در آشیانه دیگر قرار داد. سپس در آشیانه عبور، عبور از چراغ زرد و قرمز را لحاظ کرد.

رگرسیونی، سبب می‌شود تا مدل‌های مطلوبیت، میدان عمل وسیع‌تری برای تحلیل‌های بیشتر در اختیار تحلیل‌گر قرار دهد. مدل لوجیت چندجمله‌ای، ابتدایی‌ترین و پرکاربردترین مدل انتخاب گسسته به شمار می‌آید. محبوبیت این مدل از آنجا ناشی می‌شود که فرم بسته‌ای برای بیان احتمال انتخاب گزینه‌ها ارائه می‌دهد که به سادگی قابل تفسیر است. با معرفی خانواده مدل‌های مقدار حدی تعمیم یافته<sup>۱۳</sup>، مدل‌های دیگری توسعه یافتند تا محدودیت‌ها یا نقایص مدل لوجیت چندجمله‌ای را برطرف کنند. از معروفترین این مدل‌ها، می‌توان به لوجیت آشیانه‌ای اشاره کرد. در این مدل، گزینه‌های وابسته به هم درون یک آشیانه قرار می‌گیرند و از بروز تناقض اتوبوس قرمز-اتوبوس آبی پیش-گیری می‌شود.

از اهداف و نوآوری‌های این پژوهش در بخش مدل‌های تئوری مطلوبیت، بررسی ساختار مدل لوجیت ترکیبی<sup>۱۴</sup>، به منظور توصیف اختلاف سلیقه در میان افراد، در پاسخ به ویژگی‌های مختلف تأثیرگذار بر تصمیم توقف/عبور رانندگان است. مدل لوجیت ترکیبی، برخلاف مدل لوجیت چندجمله‌ای به یک توزیع خاص محدود نیست و توانایی یافتن ناهمگونی در رفتار افراد و حتی منبع ایجاد این ناهمگونی را نیز دارد. مدل لوجیت ترکیبی می‌تواند، با در نظر گرفتن توزیع‌های مناسب برای ضرایب تابع مطلوبیت، رفتار رانندگان مختلف با مطلوبیت تصادفی را تقریب بزند.

رانندگان خودروها، رفتار یکسانی و همگنی ندارند. این تفاوت باعث می‌شود حتی هنگامی که شرایط یا متغیرهای تصمیم‌گیری، یکسان باشد، تصمیمات رانندگان متفاوت و تصادفی باشد. از این تفاوت‌های رانندگان، به ناهمگنی (اختلاف) سلاقی تصادفی<sup>۱۵</sup> رانندگان تعبیر می‌شود و این ناهمگنی، به کمک پارامترها و ضرایب تصادفی در مدل‌های انتخاب انعکاس می‌یابد. در مدل لوجیت چندجمله‌ای، امید ریاضی پارامترهای تابع مطلوبیت، برآورد می‌شود. اما اگر به جای این کار، تابع چگالی احتمال این پارامترها برای برآورد مطلوبیت و پیش‌بینی تصمیم‌ها

۴. سیستم‌های پیشرفته کنترل تقاطع، کمک-راننده<sup>۱۶</sup>، و هشدار به راننده که از گیر افتادن خودرو در ناحیه تردید جلوگیری می‌کند.

۵. زمان‌بندی چراغ زرد و تمام قرمز.

در این بین، مدلسازی تصمیم‌گیری توقف/عبور یکی از مواردی است که همواره مورد توجه محققین بوده است.

مدل‌های تصمیم‌گیری توقف و عبور در سیستم‌های پیشگیری از ناحیه تردید<sup>۱۷</sup> (Naik et al., 2020) کاربرد دارد. در ناحیه تردید، هنگام روشن شدن چراغ زرد، فاصله راننده نه برای توقف و نه برای عبور کافی می‌باشد و رانندگان در خصوص عبور یا توقف دچار شک و تردید می‌شوند (Gazis et al., 1978).

در سیستم‌های پیشگیری از تردید، اطلاعات رانندگان استخراج می‌شود و به کمک این مدل‌ها پیش‌بینی می‌شود که راننده در ناحیه تردید قرار می‌گیرد یا نه و همچنین تصمیم احتمالی راننده چیست. سپس برای اینکه راننده در ناحیه تردید قرار نگیرد، به راننده اعلام می‌شود که با چه سرعتی حرکت کند.

وی و همکاران (Wei et al., 2011) مشاهده کردند انواع کامیون‌ها، مخصوصاً کامیون‌های سنگین در مقایسه با خودروهای سواری (شاسی کوتاه، شاسی بلند، و ون)، تمایل بیشتری به عبور از تقاطع دارند. گیتز و همکاران (Gates et al., 2007) نیز پیش از آن، به همین نتیجه رسیده بودند. علاوه بر آن، گیتز و همکاران دریافتند تصمیمات رانندگان به حضور سایر کاربران راه (خودروها/عابرین) در معبر مورد نظر و معبر کناری نیز بستگی دارد.

راخا و همکاران (Rakha et al., 2008) بر این باورند که حرکت و توقف رانندگان در آغاز زمان زرد در سرعت‌های بالا به فاصله از تقاطع، جنسیت، و سن وابسته است. سرانجام، این مطالعه پیشنهاد می‌کند که سیستم‌های کنترل ترافیک، طول ناحیه تردید را به جای مقادیر فعلی ۲/۵ تا ۵/۵ ثانیه، با در نظر گرفتن همه گروه‌های سنی و جنسیتی راننده، بین ۱/۵ تا ۵ ثانیه در نظر بگیرند.

به طور خلاصه، اهداف تحقیق و اقدامات آن، عبارت‌اند از:

۱. مدلسازی تصمیمات توقف، عبور از چراغ زرد، و قرمز رانندگان در فاز زرد،
۲. مدلسازی رفتار رانندگان با استفاده از مدل‌های رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای<sup>۱۳</sup>، رگرسیون لجستیک ترتیبی<sup>۱۴</sup>، و رگرسیون پروبیت<sup>۱۵</sup>،
۳. مدلسازی رفتار رانندگان با استفاده از مدل‌های تئوری مطلوبیت نظیر لوجیت چندجمله‌ای، لوجیت آشیانه‌ای، و لوجیت ترکیبی،
۴. مقایسه برازندگی و توانایی پیش‌بینی مدل‌های ذکر شده و بررسی نتایج حاصل از دو گروه مدل‌ها،
۵. بررسی تاثیر اختلاف سلیقه تصادفی رانندگان و ناهمگنی مکانی بر تصمیمات رانندگان،
۶. اعتبارسنجی مدل‌های پرداخت شده.

ساختار این مطالعه به این شرح است که پس از بیان ضرورت و اهداف پژوهش در بخش آغازین، ادبیات موضوع در بخش ۲ مرور می‌شود. نحوه گردآوری و استخراج اطلاعات و روش مدلسازی در بخش ۳ ارائه می‌شود. در بخش ۴، نتایج پرداخت این مدل‌ها ارائه و درباره آنها بحث می‌شود. در بخش ۵، مدل‌ها با یکدیگر مقایسه و اعتبارسنجی می‌شوند. همچنین خوبی برازش مدل‌های مقاله جاری با مطالعات پیشین مقایسه می‌شود. بخش ۶، یعنی نتیجه‌گیری، پایان بخش مقاله خواهد بود.

## ۲. ادبیات پژوهش

چوپانی (Choupani, 2021) مطالعاتی را که بر روی چراغ زرد انجام می‌شود، به پنج دسته عمده تقسیم کرد که شامل موارد زیر است، اما محدود به آنها نمی‌شود:

۱. مدلسازی رفتار توقف/عبور رانندگان.
۲. مطالعه ویژگی‌های مجموعه راننده-خودرو که در تصمیم‌گیری توقف/عبور رانندگان اثرگذار است.
۳. مطالعاتی که بر موقعیت و طول انواع ناحیه‌های تردید تمرکز دارد (Najmi et al., 2019).

مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلاقی رانندگان

متصل، خودرویی هست که می‌تواند به صورت دو طرفه با سایر خودروها، سیستم‌های کنار جاده، و ... ارتباط برقرار کند. در این مطالعه، یک مدل اتوماتای سلولی<sup>۲۲</sup> برای فرآیندهای تصمیم‌گیری توقف/عبور خودروهای دستی و متصل با در نظر گرفتن عوامل مختلف از جمله تعاملات بین این دو گروه خودرو ایجاد شد.

کامپسی و همکاران (Campisi et al., 2020) ویژگی‌های تخلفات رانندگی عبور از چراغ قرمز و زرد را در سه تقاطع چراغ‌دار در شهر انا، ایتالیا<sup>۲۳</sup> و چهار تقاطع چراغ‌دار در شهر تسالونیک، یونان،<sup>۲۴</sup> بررسی کردند، چون سبک رانندگی و رعایت قانون، از شهری به شهر دیگر و از کشوری به کشور دیگر متفاوت است. آنها دریافتند خودروهای سواری مسئول اکثریت قریب به اتفاق تخلفات در تقاطع‌های چراغ‌دار هستند و اینکه خودروها در کدام خط حرکت می‌کنند، نقش بسزایی در تخلفات رانندگی دارد.

کای و همکاران (Cai et al., 2020) چگونگی تأثیر عوامل مختلف بر رفتارهای عبور از چراغ زرد دوچرخه سواران برقی را در شیان، چین<sup>۲۵</sup> بررسی کردند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که هفت متغیر به‌طور معنی‌داری بر رفتار عبور از چراغ زرد دوچرخه‌سواران تأثیر می‌گذارد که عبارتند از: سرعت دوچرخه برقی، فاصله تا خط توقف، سن و جنسیت دوچرخه‌سواران، نوع دوچرخه برقی، عرض تقاطع و وجود موانع فیزیکی.

در مطالعه وانگ و همکاران (Wang et al., 2020)، ۶۴ راننده دارای گواهینامه با استفاده از یک شبیه‌ساز رانندگی<sup>۲۶</sup> و یک دستگاه حقیقت مجازی<sup>۲۷</sup>، رانندگی کردند. هدف محققین، مطالعه تأثیرات سبک‌های مختلف رانندگی بر تصمیم به عبور از چراغ‌های زرد تحت شرایط روشنایی روز و شب بود. رانندگان به دو گروه سازگار<sup>۲۸</sup> و ناسازگار<sup>۲۹</sup> تقسیم شدند. رانندگان ناسازگار شامل رانندگان خطرناک<sup>۳۰</sup>، مضطرب<sup>۳۱</sup>، و عصبانی<sup>۳۲</sup> می‌شود. رانندگان با احتیاط نیز جزو رانندگان سازگار به حساب می‌آیند. رانندگان ناسازگار، مرد، و بی‌تجربه، سریعتر و بیشتر از به ترتیب رانندگان سازگار، زن، و باتجربه از چراغ زرد عبور می

المیتینی و همکاران (Elmitiny et al., 2010) و علی و همکاران (Ali et al., 2021) با استفاده از درخت طبقه‌بندی و رگرسیون<sup>۱۸</sup> احتمال توقف/عبور خودروها از تقاطع در چراغ زرد و قرمز را مدل‌سازی کردند. یکی از نتایج جالب تحقیق این بود که خودروهایی که در موقعیت دنباله رو<sup>۱۹</sup> بودند، نسبت به خودروهایی که در موقعیت پیشرو<sup>۲۰</sup> قرار داشتند، تمایل بیشتری به عبور از چراغ زرد و قرمز داشتند.

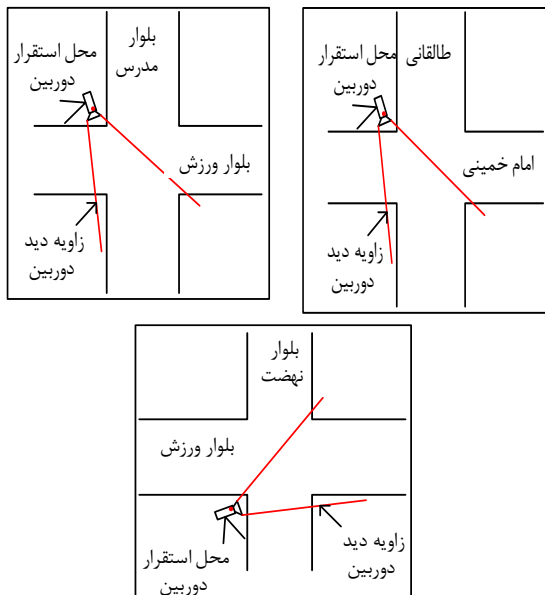
ساوولاینن و همکاران (Savolainen et al., 2016) با جمع‌آوری اطلاعات میدانی از ۸۷ تقاطع در ۵ ایالت ایالات متحده، به بررسی تأثیر زمان چراغ زرد، وجود بازه تمام قرمز، سیستم هشداردهنده هوشمند تغییر چراغ، و دوربین‌های کنترل سرعت بر تصمیم‌گیری راننده پرداختند. این محققین احتمال رفتن یا توقف خودرو را با مدل پروبیت با پارامترهای تصادفی به کمک داده‌های پنل برآورد کردند تا ناهمگنی در سایت‌های مختلف مورد مطالعه را لحاظ کنند. در نهایت، به این نتیجه رسیدند که وجود دوربین‌های کنترل سرعت و سیستم هشداردهنده تغییر چراغ که ۰/۵ ثانیه قبل از شروع زرد، شروع زرد را هشدار می‌دهد، باعث افزایش احتمال توقف می‌شود و از تصمیم عجولانه و خطرپذیری رانندگان جلوگیری به عمل آید.

یکی از ایرادات شبیه‌سازهای رانندگی، اریبی انتخاب است (Lavrenz et al., 2014). در شبیه‌ساز، یک مسیر در صفحه نمایش به راننده نشان داده می‌شود و راننده درک و ذهنیتی از سایر مسیرها ندارد. لاورنز و همکاران (۲۰۱۴)، مدل لججیت ترکیبی را بکار بردند و روشی برای برطرف کردن مشکل اریبی انتخاب، ارائه کردند.

یانگ و همکاران (Yang et al., 2014) با ساخت مدل‌های رگرسیون لجستیک، مشاهده کردند احتمال توقف وسایل نقلیه در تقاطعات بدون معکوس‌شمار بیشتر از تقاطعات دارای معکوس‌شمار می‌باشد.

حضور خودروهای متصل<sup>۳۱</sup> در جریان ترافیک می‌تواند نرخ جریان ترافیک را بهبود بخشد (Du et al., 2021). خودرو

شهر سمنان دارای سه تقاطع چراغ‌دار با نام‌های نهضت، مدرس و بلوار بوده و مازندران می‌باشد. هر سه تقاطع، تمام شرایط یادشده را دارا بودند و زمان زرد و تمام قرمز به ترتیب برابر ۳ و ۱ ثانیه است. تقاطع نهضت از برخورد بلوار نهضت و بلوار ورزش ایجاد شده و بلوار نهضت از شمال به جنوب و بلوار ورزش از شرق به غرب می‌باشد. فیلمبرداری در این تقاطع از سمت جنوب شرقی به طرف شمال غربی بوده است. و حرکت خودروهایی که از سمت بلوار ورزش می‌آمدند را ضبط کرده است. شکل ۱ نحوه استقرار دوربین‌ها را، به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۱. نحوه استقرار دوربین در تقاطعات مورد مطالعه

### ۲-۳ جمع آوری اطلاعات میدانی

برداشت داده‌ها از تقاطعات چراغ‌دار نهضت، مدرس و مازندران با دوربین فیلمبرداری دیجیتال نیکون مدل D5300 با لنز ۷۰-۲۰۰ میلی متر انجام شد. همچنین برای بررسی فیلم و برداشت داده‌ها از نرم‌افزار Adobe Premiere CS6 استفاده شده است.

کشورها در قبال چراغ زرد دو سیاست اتخاذ می‌کنند: ۱- بازدارندگی<sup>۳۳</sup>، ۲- تسهیل‌گری<sup>۳۴</sup>. در سیاست تسهیل‌گری، به خودروهایی که پشت خط ایست قرار دارند، اجازه می‌دهند تا در چراغ زرد وارد تقاطع شوند. اما در سیاست بازدارنده، قانون‌گذار معتقد هست که زمان زرد فقط برای تخلیه خودروهایی است که در حال حاضر در تقاطع هستند و خودروهایی که قبل از خط ایست قرار دارند، تحت هیچ شرایطی نباید وارد تقاطع شوند (NCHRP 731, 2012). تفسیر پلیس راهنمایی و رانندگی ایران نیز از ماده ۱۰۱ آیین نامه راهنمایی و رانندگی (۱۳۸۴)، نیز ناظر بر سیاست بازدارندگی هست. اما (UVC, 2000) معتقد هست که اعمال این قانون، در عمل مشکل است. ارزیابی چوپانی (Choupani, 2021) نیز نشان داد که میزان عبور از چراغ زرد، علیرغم ادعای ممنوع بودن آن در ایران، در مقایسه با کشورهای دیگر که عبور از چراغ زرد مجاز است، بسیار بالا هست.

### ۳. روش پژوهش

#### ۳-۱ ملاک‌های انتخاب تقاطع ایده‌آل

- برای اینکه بتوان داده‌های مناسبی از تقاطع گردآوری کرد، ویژگی‌های زیر در انتخاب تقاطع‌ها باید مد نظر قرار بگیرد:
- ۱) تقاطع مورد نظر چراغ راهنمایی داشته باشد.
  - ۲) تقاطع دارای خط کشی‌های خط ایست باشد.
  - ۳) در اطراف تقاطع محل مناسبی برای استقرار دوربین وجود داشته باشد.
  - ۴) فیلم‌برداری هنگامی انجام شود که شرایط جوی از قبیل آفتاب، باران و... خللی در ضبط فیلم ایجاد نکند.
  - ۵) در تقاطع تصادف یا اختلال ترافیکی وجود نداشته باشد.

مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلايق رانندگان

جدول ۱. مشخصات هندسی و ترافیکی تقاطعات مورد بررسی

| تقاطع                      |                     |                     |                                | مشخصات        |
|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|---------------|
| مازندران<br>(امام-طالقانی) | مدرس<br>(مدرس-ورزش) | نهضت<br>(نهضت-ورزش) | ویژگی                          |               |
| ۱۲-۱۲                      | ۱۸-۲۴               | ۲۴-۲۴               | عرض خطوط حرکتی (متر)           | هندسی         |
| ۲                          | ۳                   | ۳                   | تعداد خطوط معبر                |               |
| ۵۰-۱۱۸                     | ۶۰-۱۵۲              | ۲۴-۱۳۸              | طول چرخه (ثانیه)               |               |
| ۳                          | ۳                   | ۳                   | زمان زرد (ثانیه)               | چراغ راهنمایی |
| ۱                          | ۱                   | ۱                   | زمان تمام‌قرمز (ثانیه)         |               |
| ۵۰                         | ۶۰                  | ۶۰                  | سرعت صدک ۱۸۵ (کیلومتر بر ساعت) |               |
| ۷۳۲                        | ۱۶۵۷                | ۱۷۵۳                | حجم تردد (خودرو بر ساعت)       | ترافیکی       |
| ۱۳۰                        | ۱۳۰                 | ۱۲۰                 | محدوده پوشش دوربین (متر)       |               |



شکل ۲. نحوه اندازه‌گیری فاصله خودروها از خط ایست

- ۳- اولین خودروهای توقفی (FTS)<sup>۳۷</sup>: این گروه اولین ردیف خودروهایی هستند که بعد از قرمز شدن چراغ، پشت خط ایست توقف کامل می‌کنند.
- اطلاعات جمع‌آوری شده از فیلم‌ها به شرح زیر است:
  ۱. فاصله وسیله نقلیه تا خط ایست در ابتدای زمان زرد.

فیلمبرداری از روی پشت بام ساختمان‌هایی که اطراف تقاطع بودند انجام شد و دوربین به گونه‌ای تنظیم شد که بتواند حرکت خودروها را بطور کامل پوشش دهد. فیلمبرداری در اردیبهشت سال ۱۳۹۸ و در ساعات ۱۰ الی ۱۲ صبح برای هر تقاطع انجام گرفته است. جدول ۱ مشخصات هندسی، ترافیکی، و چراغ راهنمایی تقاطعات مورد مطالعه را نشان می‌دهد. سرعت معبر تقاطع نهضت و مدرس ۶۰ کیلومتر بر ساعت و سرعت تقاطع مازندران ۵۰ کیلومتر بر ساعت و تعداد خطوط عبور تقاطع نهضت و مدرس ۳ خط و مازندران ۲ خط می‌باشد. بعد از فیلمبرداری از تقاطع‌ها، برای اندازه‌گیری فواصل از جداول کنار بلوار استفاده شد (شکل ۲). در بررسی فیلم‌ها سه نوع حرکت خودرو مورد توجه قرار گرفت:

- ۱- خودروهای عبوری در زمان زرد (YLR)<sup>۳۵</sup>: این گروه خودروهایی هستند که هنگامی که چراغ زرد بوده، از خط ایست عبور کردند و وارد تقاطع شده‌اند.
- ۲- خودروهای عبوری از چراغ قرمز (RLR)<sup>۳۶</sup>: این گروه خودروهایی هستند که پس از اتمام بازه زرد و بعد از شروع چراغ قرمز، از خط ایست عبور کرده‌اند و وارد تقاطع شده‌اند و مرتکب تخلف ترافیکی شده‌اند.

خودرو) برای اعتبارسنجی بکار رفت. برای انتخاب خودروهایی که داده‌های آنها برای اعتبارسنجی به کار می‌روند، نمونه‌گیری تصادفی منظم انجام شد و از هر پنج خودرو، داده‌های خودروی پنجم برای اعتبارسنجی کنار گذاشته شد.

نحوه اعتبارسنجی بدین صورت است که با استفاده از توابع پرداخت شده، احتمال وقوع یکی از انتخاب‌های راننده (عبور از چراغ زرد، عبور از چراغ قرمز، و توقف) برای هر خودرو پیش بینی می‌شود و پیش‌بینی‌های به‌دست‌آمده با مشاهدات واقعی مقایسه می‌گردد تا درصد برآورد درست تصمیم رانندگان محاسبه شود.

جدول ۲ سرعت، شتاب و فاصله از خط توقف را برای خودروهای توقیفی و عبوری نشان می‌دهد. شتاب خودروهای توقیفی و عبوری به ترتیب برابر  $(m/s^2) -1/26$  و  $(m/s^2) 0/23$  است. خودروهای توقیفی به طور متوسط در فاصله ۶۸ متری بودند و در این فاصله دورتر، نسبت به خودروهای عبوری سرعت بیشتری داشته‌اند.

شکل ۳، مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

### ۳-۳ تئوری مطلوبیت و انتخاب گسسته

تابع مطلوبیت گزینه  $j$  برای فرد  $q$  به صورت  $U_{jq}$  بیان می‌شود. این مطلوبیت دارای دو بخش معین (قطعی) و تصادفی است و در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$U_{jq} = V_{jq} + \epsilon_{jq} \quad (1)$$

که در آن:

$U_{jq}$ : مطلوبیت انتخاب گزینه  $j$  توسط فرد  $q$

$V_{jq}$ : جزء معین و قطعی (مشاهده شده) مطلوبیت انتخاب گزینه

$j$  توسط فرد  $q$

۲. سرعت وسیله نقلیه در ابتدای زمان زرد: این پارامتر از تقسیم مسافت طی شده خودرو در مدت ۳ تا ۵ ثانیه قبل از زرد شدن چراغ بدست می‌آید.

۳. زمان واقعی رسیدن وسیله نقلیه به خط ایست: مقدار زمان واقعی است که خودروها بعد از زمان زرد طی می‌کنند تا به خط ایست برسند.

۴. لاین خودرو: لاینی را که خودرو در آن قرار دارد نشان می‌دهد. شماره گذاری خطوط از راست به چپ خیابان صورت گرفته است.

۵. نوع خودرو: خودروها به چهار دسته سواری، شاسی بلند، نیمه سنگین و سنگین تقسیم می‌شوند.

۶. زمان فرضی رسیدن وسیله نقلیه به خط ایست: از تقسیم فاصله وسیله نقلیه تا خط ایست بر سرعت وسیله نقلیه در ابتدای زمان زرد بدست می‌آید.

۷. سرعت پس از زرد شدن چراغ: برای خودروهای عبوری، از تقسیم فاصله وسیله نقلیه تا خط ایست در ابتدای زمان زرد بر مدت زمان واقعی رسیدن به خط ایست، سرعت پس از زرد شدن چراغ به دست می‌آید. برای خودروهای توقیفی، این سرعت صفر در نظر گرفته شد.

۸. شتاب خودروها بعد از زرد شدن چراغ: از تقسیم اختلاف سرعت قبل و بعد از زرد شدن به مدت زمان واقعی که خودرو از خط ایست عبور می‌کند، بدست می‌آید. برای خودروهای توقیفی، سرعت بعد از زرد شدن چراغ برابر صفر است.

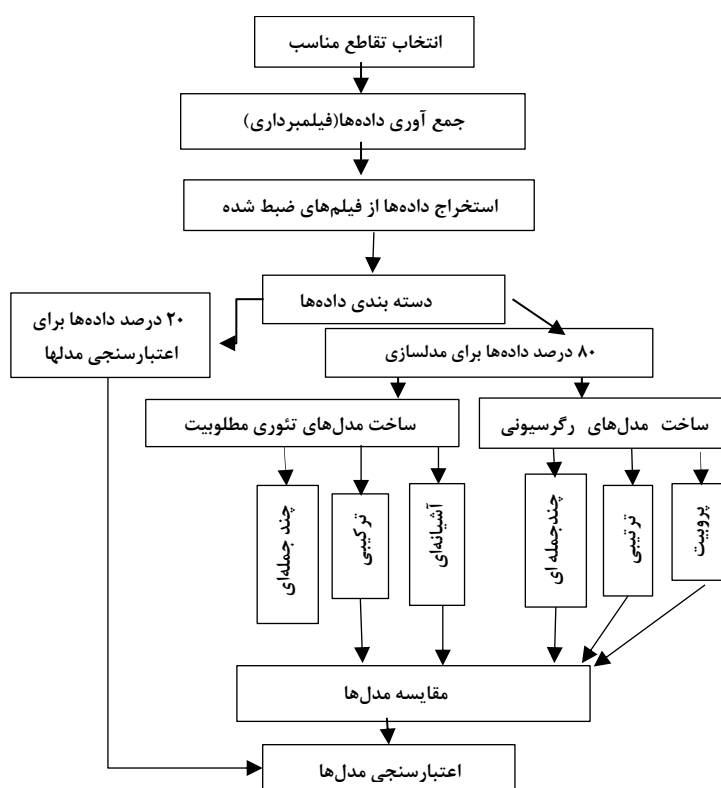
پس از فیلمبرداری از تقاطع‌ها، با مرور فیلم‌ها داده‌ها مورد نیاز استخراج شد و بانک داده در نرم افزار Excel تشکیل شد.

لازم به ذکر است که ۸۰ درصد داده‌های جمع‌آوری شده (۷۰۳ خودرو) برای پرداخت مدل و ۲۰ درصد بقیه داده‌ها (۱۷۶)

مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلاقی رانندگان

جدول ۲. میانگین شتاب، سرعت، و فاصله خودروهای توفنی و عبوری

| خودروهای عبوری       |                                |                          | خودروهای توفنی       |                                |                                 | تقاطع    |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------|
| فاصله از خط توقف (m) | سرعت در ابتدای چراغ زرد (km/h) | شتاب (m/s <sup>2</sup> ) | فاصله از خط توقف (m) | سرعت در ابتدای چراغ زرد (km/h) | شتاب کاهنده (m/s <sup>2</sup> ) |          |
| ۹/۴۶                 | ۲۰/۵۹                          | ۰/۹                      | ۵۲/۸۵                | ۳۱/۹۷                          | -۱/۳۹                           | نهضت     |
| ۲۶/۲۶                | ۳۶/۲۸                          | ۰/۲۶                     | ۷۷/۹۷                | ۴۳/۷۸                          | -۱/۶۲                           | مدرس     |
| ۸/۴۵                 | ۲۲/۲۲                          | ۰/۲۸                     | ۸۰/۷۲                | ۳۶/۷۹                          | -۰/۹                            | مازندران |
| ۲۲/۷۶                | ۲۳/۹۷                          | ۰/۲۳                     | ۶۸/۵۳                | ۳۵/۷۶                          | -۱/۲۶                           | کل       |



شکل ۳. مراحل انجام پژوهش

$$P_{jq} = P(U_{jq} \geq U_{mq}) \quad \forall m \neq j \in C_q \quad (3)$$

$$P_{jq} = P(\varepsilon_{mq} - \varepsilon_{jq} \leq V_{jq} - V_{mq}) \quad (4)$$

### ۳-۳-۱ مدل لوجیت چندجمله‌ای

مدل لوجیت چندجمله‌ای ساده‌ترین و پرکاربردترین مدل انتخاب گسسته است و حالت خاصی از مدل‌های مقدار حدی تعمیم یافته به شمار می‌آید. محبوبیت این مدل از آنجاست که فرم بسته‌ای برای بیان احتمال انتخاب گزینه‌ها ارائه می‌دهد که به سادگی قابل تفسیر است (Hess et al., 2005). به عبارتی

$\varepsilon_{jq}$ : جزء نامعین و تصادفی (مشاهده نشده) مطلوبیت انتخاب

گزینه  $j$  توسط فرد  $q$

طبق رابطه (۲) تصمیم‌گیرنده از بین گزینه‌های موجود در مجموعه انتخاب  $C_q$  گزینه‌ای را انتخاب می‌کند که دارای بیشترین مطلوبیت نسبت به سایر گزینه‌ها باشد.

$$j \in C_q \quad \text{if} \quad U_{jq} > U_{mq} \quad \forall m \neq j \quad (2)$$

احتمال اینکه فرد  $q$  گزینه  $j$  را انتخاب کند، یعنی  $P_{jq}$ ، از رابطه

(۳) تعیین می‌شود (Train et al. 2009).

$V'(j)$ : مطلوبیت معادل مجموعه گزینه‌های  $I_j$  در سطح پایین وابسته به گزینه  $j$  در سطح بالا  
 $\emptyset_j^*$ : ضریب مطلوبیت معادل مجموعه گزینه‌های  $I_j$  است.

### ۳-۳-۳ مدل لوجیت ترکیبی

مدل لوجیت ترکیبی یکی از انعطاف‌پذیرترین مدل‌های انتخاب گسسته است که به کمک آن می‌توان تقریباً هر ساختار دیگری در مدل‌های مطلوبیت تصادفی را تخمین زد. توصیف بسیار خوبی از این مدل و ویژگی‌های آن توسط (Mc Fadden and Train, 2000) ارائه شد. این مدل امکان اختلاف سلیقه تصادفی، استفاده از الگوهای جانشینی<sup>۴۰</sup> و نیز همبستگی در جزء مشاهده نشده در زمان<sup>۴۱</sup> را برای مدل‌ساز فراهم می‌آورد. این مدل برای سال‌های طولانی، شناخته شده بود. با این وجود استفاده از آن از زمان شناخت و توسعه تکنیک‌های شبیه‌سازی گسترش پیدا کرد.

در مدل لوجیت ترکیبی، بخش تصادفی (غیرقابل مشاهده) مطلوبیت (یعنی  $\varepsilon_{jq}$ ) شامل دو بخش است. قسمت اول از یک توزیع دلخواه و قسمت دوم مانند لوجیت استاندارد از توزیع مقدار حدی با توزیع یکسان و مستقل تشکیل می‌شود. بنابراین فرض‌های کمتری را بر داده‌ها تحمیل می‌کند، اما مانند مدل لوجیت دارای فرم بسته نیست.

تابع احتمال مدل لوجیت ترکیبی در حقیقت یک انتگرال از تابع احتمال انتخاب مدل لوجیت چندجمله‌ای روی یک تابع چگالی از پارامترها است. در حالت کلی این تابع احتمال تعریفی به فرم رابطه (۱۰) دارد:

$$P_{jq} = \int L_{jq}(\beta) f(\beta) d\beta \quad (10)$$

که در آن:

$P_{jq}$ : احتمال انتخاب گزینه  $j$  توسط فرد  $q$

$L_{jq}(\beta)$ : احتمال انتخاب گزینه  $j$  توسط فرد  $q$  در مدل لوجیت که تابعی از پارامتر  $\beta$  است.

$f(\beta)$ : تابع چگالی احتمال پارامتر  $\beta$

$L_{jq}(\beta)$  به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌گردد:

دیگر مدل لوجیت چندگانه، احتمال انتخاب یک گزینه را از میان چند گزینه دیگر با مطلوبیت‌های متفاوت، براساس اصل بیشینه-سازی مطلوبیت بیان می‌کند. رابطه مدل لوجیت چندجمله‌ای به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$P_{jq} = \frac{\exp(V_{jq})}{\sum_{m=1}^M \exp(V_{mq})} \quad (5)$$

### ۳-۳-۲ مدل لوجیت آشیانه‌ای

به منظور حل مشکل استقلال گزینه‌های نامرتبط<sup>۳۹</sup> یا همان مشکل اتوبوس قرمز-اتوبوس آبی در مدل لوجیت چند جمله‌ای، می‌توان از مدل لوجیت آشیانه‌ای استفاده کرد. به طور کلی ساختار لوجیت آشیانه‌ای از گروه‌بندی زیر مجموعه‌های گزینه‌های وابسته به یکدیگر در سطوح مختلف تشکیل می‌شود. در صورتی که  $J$  مجموعه گزینه‌های سطح بالا و  $I_j$  مجموعه گزینه‌های سطح پایین در ساختار لوجیت آشیانه‌ای باشد، احتمال انتخاب گزینه‌ها از روابط (۶) تا (۹) به دست می‌آید.

$$P(i) = P(j^*) \cdot P(i|j^*) \quad (6)$$

$$P(i|j^*) = \frac{\exp(V_i)}{\sum_{i \in I_j} \exp(V_i)} \quad (7)$$

$$P(j^*) = \frac{\exp(V_{j^*} + \emptyset_{j^*}^* V'_{j^*})}{\sum_{j \in J} \exp(V_{j^*} + \emptyset_{j^*}^* V'_{j^*})} \quad (8)$$

$$V'_j = Ln \left( \sum_{i \in I_j} \exp(V_i) \right) \quad (9)$$

که در آن:

$i$ : گزینه  $i$  در سطح پایین

$j^*$ : یک گزینه خاص  $j$  در سطح بالا

$P(i|j^*)$ : احتمال انتخاب گزینه  $i$  از سطح پایین به شرط انتخاب گزینه  $j^*$  در سطح بالا

$P(i)$ : احتمال انتخاب گزینه  $i$  در سطح پایین

$P(j^*)$ : احتمال انتخاب گزینه  $j^*$  در سطح بالا

$V(i)$ : جزء قطعی مطلوبیت گزینه  $i$

$V(j)$ : جزء قطعی مطلوبیت گزینه  $j$  به استثنای بخش  $V'(j)$  که می‌تواند به صورت برداری از متغیرهای بیانگر مشخصات فرد تصمیم‌گیرنده و شرایط محیطی محاسبه شود.

مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلاقی رانندگان

اگر متغیر وابسته، به جای اینکه متغیر اسمی باشد، یک متغیر ترتیبی باشد، استفاده از رگرسیون لجستیک ترتیبی به جای لجستیک چندجمله‌ای اولویت دارد، چرا که متغیرهای ترتیبی، اطلاعات بیشتری در مقایسه با متغیرهای اسمی ارائه می‌دهند. مدل لوجیت ترتیبی، به ازای ترکیب خطی متغیرهای وابسته ( $X_i$ ) احتمال رخداد پیشامد  $Y \leq y$  را تخمین می‌زند.

$$\ln(\theta_j) = \alpha_j + \beta_i X_i \quad (14)$$

که در آن،  $\theta_j$  بخت پیشامد  $Y \leq y$  است.  $j$  تعداد طبقات متغیر ترتیبی  $Y$  منهای یک است. در تحقیق جاری، تصمیم‌های رانندگان بر اساس تهاجمی بودنشان، به صورت عبور از چراغ قرمز، چراغ زرد، و توقف مرتب شدند.

### ۳-۴-۳ مدل پروبیت

مدل رگرسیون پروبیت، به ازای ترکیب خطی متغیرهای وابسته ( $X_i$ ) احتمال رخداد پیشامد  $Y=y$  را با فرض اینکه متغیرهای مستقل، از توزیع نرمال چند متغیره تبعیت می‌کند، تخمین می‌زند. فرمول پروبیت، عبارت است از:

$$P(Y = y | X_i = x_i) = \Phi(\alpha + \beta_i X_i) \quad (15)$$

که در آن  $\Phi$  تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد است. یاد آوری می‌شود که:

$$\Phi(z) = P(Z \leq z), Z \sim N(0,1) \quad (16)$$

که در آن  $Z$  متغیر با توزیع نرمال استاندارد است.

### ۳-۵ شاخص‌های خوبی برازش

در این بخش، شاخص‌هایی که برای بررسی خوبی برازش به کاررفتند، معرفی می‌شوند.  $LL(\beta)$  نشان دهنده لگاریتم درست نمایی<sup>۴۳</sup> برای مدل پرداخت شده (حاوی ضرایب  $\beta$ ) است. درست نمایی عددی در بازه  $[0, 1)$  هست. پس لگاریتم درست نمایی متعلق به بازه  $[-\infty, 0]$  خواهد بود. لگاریتم درست نمایی هر چه به صفر نزدیکتر باشد، بهتر است. آماره  $\rho_0^2$  یا نسبت درست نمایی  $McFadden$ ، برازندگی کلی مدل را نشان می‌دهد و شبیه ضریب همبستگی ( $R^2$ ) می‌باشد. مقدار آن هر

$$L_{jq} = \frac{\exp(V_{jq}(\beta))}{\sum_{m=1}^M \exp(V_{mq}(\beta))} \quad (11)$$

که در آن:

$V_{jq}(\beta)$ : جزء قطعی (مشاهده شده) تابع مطلوبیت گزینه  $j$  توسط فرد  $q$  است و به پارامتر  $\beta$  بستگی دارد. با جایگذاری (۱۱) در (۱۰)، تابع احتمال انتخاب مدل لوجیت ترکیبی در نهایت به صورت رابطه (۱۲) نوشته می‌شود:

$$P_{jq} = \int \frac{e^{V_{jq}(\beta)}}{\sum_{m=1}^M e^{V_{mq}(\beta)}} f(\beta) d\beta \quad (12)$$

در این مدل، برخلاف مدل لوجیت استاندارد، پارامتر  $\beta$  با تابع چگالی  $f(\beta)$  برای تصمیم‌گیرها متفاوت خواهد بود. با این تعریف تابع احتمال انتخاب مدل لوجیت ترکیبی یک میانگین وزنی از تابع احتمال انتخاب مدل لوجیت چند جمله‌ای روی مقادیر مختلف  $\beta$  است.

در مطالعات محققین مختلف، طیف بسیار گسترده‌ای از توابع توزیع برای  $\beta$  در نظر گرفته شده است. برخی از رایج‌ترین این توابع توزیع را می‌توان نرمال، لگاریتم نرمال، یکنواخت، مثلثی و  $S_B$  جانسون نام برد. (Hensher et al., 2005).

### ۳-۴ رگرسیون لجستیک

#### ۳-۴-۱ رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای

اگر متغیرهای مستقل  $X_1, X_2, \dots, X_n$  و مقادیر آنها برای هر مشاهده به ترتیب  $x_1, x_2, \dots, x_n$  باشند و همچنین  $Y$  یک پیشامد باشد، رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای خواهد تخمین بزند که به ازای ترکیب خطی متغیرهای مستقل  $X_1, X_2, \dots, X_n$  پیشامد  $Y=y$  با چه احتمالی رخ خواهد داد. یعنی:

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = \alpha + \beta_i X_i \quad (13)$$

که در آن  $P$  احتمال  $Y=y$  است.  $P_0$  احتمال رخداد پیشامد مبنا است.  $\alpha$  برابر مقدار ثابت (عرض از مبدا) و  $\beta_i$  ضرایب متغیرهای مستقل  $X_i$  هست. ضرایب رگرسیون لجستیک را می‌توان برای برآورد بخت<sup>۴۴</sup> هر یک از متغیرهای مستقل مدل به کار برد.

#### ۳-۴-۲ مدل لوجیت ترتیبی

درست که آماره‌ای توصیفی هست، نشان می‌دهد چند درصد از تصمیم‌ها به درستی پیش بینی شده است.

#### ۴. نتایج

در این پژوهش برای مدلسازی تصمیم‌گیری رانندگان، تعدادی متغیر پیوسته و گسسته (دودویی) تعریف شد که جدول ۳ آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. تعریف متغیرها

| متغیر      | تعریف                             | واحد/مقدار                     |
|------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| $X_0$      | فاصله تا تقاطع هنگام زرد شدن چراغ | m                              |
| $X_{L52}$  | فاصله تا خط ایست بیشتر از ۵۲ متر  | ۰ (خیر) یا ۱ (بلی)             |
| $V_0$      | سرعت هنگام زرد شدن چراغ           | km/h                           |
| $T_a$      | زمان واقعی رسیدن به خط ایست       | s                              |
| $\alpha_y$ | شتاب در بازه چراغ زرد             | m/s <sup>2</sup>               |
| SMod       | سواری‌های تقاطع مدرس              | ۰ (خیر) یا ۱ (بلی)             |
| Neh        | تقاطع نهضت                        | ۰ (خیر) یا ۱ (بلی)             |
| Maz        | تقاطع مازندران                    | ۰ (خیر) یا ۱ (بلی)             |
| Pass       | خودروهای شناسی بلند و سواری       | ۰ (خیر) یا ۱ (بلی)             |
| Taghato    | شماره تقاطع                       | ۱: نهضت ۲: مدرس<br>۳: مازندران |

تعداد کلی داده‌های مورد بررسی ۸۷۹ خودرو می‌باشد، این تعداد تمامی خودروهای مشاهده شده اعم از سواری، شناسی بلند، نیمه-سنگین و سنگین در کل تقاطع‌های نهضت، مدرس و مازندران می‌باشد. برای ساخت مدل‌های خانواده تئوری مطلوبیت، از نرم افزار NLOGIT و برای ساخت مدل‌های رگرسیونی از SPSS استفاده شد.

در این مقاله، تمامی مدلسازی‌ها یکبار با متغیر زمان تا خط ایست و یک بار دیگر با متغیر فاصله تا خط ایست انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از متغیر زمان تا خط ایست، منجر به برازش بهتری در مقایسه با فاصله تا خط ایست می‌شود. لذا در مقاله جاری، برای اختصار، نتایج پرداخت مدل‌ها تنها با متغیر زمان تا خط ایست ارائه می‌شود.

چه به یک نزدیکتر باشد، بهتر است. انواع  $\rho^2$  به شرح ذیل تعریف می‌گردد:

$$\rho_0^2 = 1 - \frac{LL(\beta)}{LL(0)} \quad (17)$$

$$\rho_c^2 = 1 - \frac{LL(\beta)}{LL(c)} \quad (18)$$

که در آن:

$LL(\beta)$ : لگاریتم درست نمایی مدل پرداخت شده،

$LL(0)$ : لگاریتم درست نمایی مدلی که مطلوبیت تمامی گزینه‌ها

برابر صفر است و در نتیجه احتمال انتخاب گزینه‌ها با هم برابر است، و

$LL(c)$ : لگاریتم درست نمایی مدلی که مطلوبیت گزینه‌ها برابر

اعداد ثابت ویژه است.

در حالت اخیر، احتمال انتخاب گزینه‌ها اعدادی ثابت، اما نابرابر

هست. به عبارتی، احتمال انتخاب گزینه‌ها برابر سهم هرگزینه

است. برای اینکه تاثیر تعداد متغیرها لحاظ شود، دو آماره دیگر

نیز پیشنهاد شده است:

$$\bar{\rho}_0^2 = 1 - \frac{LL(\beta) - K}{LL(0)} \quad (19)$$

$$\bar{\rho}_c^2 = 1 - \frac{LL(\beta) - K}{LL(c) - K_{ms}} \quad (20)$$

که در آن:

$K$ : تعداد درجات آزادی (یا پارامترهای) مدل پرداخت شده، و

$K_{ms}$ : تعداد درجات آزادی (پارامترها) در حالتی هست که تمامی

توابع مطلوبیت برابر عدد ثابت باشد.

وقتی مدلی ساخته می‌شود، پیش بینی مدل کاملاً صحیح نیست

و خطا دارد. یعنی مقداری از اطلاعات اصلی به دلیل خطا از

دست می‌رود. AIC شاخص اطلاعات آکایکه هست که میزان

اطلاعات از دست رفته توسط یک مدل را نشان می‌دهد. در

تئوری اطلاعات استفاده فراوانی از این شاخص می‌شود. معادله

AIC به شرح ذیل هست:

$$AIC = K - 2LL(\beta) \quad (21)$$

تعریف متغیرها، پیش از این ارائه شده است. همچنین از درصد

برآورد درست می‌توان از کیفیت مدل مطلع شد. درصد برآورد

مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلاقی رانندگان

جدول ۴. توابع مطلوبیت مدل لوجیت چندجمله‌ای

| انتخاب (تصمیم)    | مدل مطلوبیت                                 |
|-------------------|---|
| عبور از چراغ زرد  | $U(YLR)=a_1 + a_2*V_o + a_3*a_y + a_4*T_a$  |
| عبور از چراغ قرمز | $U(RLR)=a_5 + a_6*V_o + a_7*a_y + a_8*SMoD$ |
| توقف              | $U(FTS)= a_9*X_o$                           |

جدول ۵. نتایج پرداخت لوجیت چندجمله‌ای

| تصمیم             | متغیر    | نماد ضریب | مقدار ضریب | خطای استاندارد | p-value      | فاصله اطمینان ۹۵ درصد | آماره t |
|-------------------|----------|-----------|------------|----------------|--------------|-----------------------|---------|
| عبور از چراغ زرد  | عدد ثابت | $a_1$     | ۲۳/۰۲۷     | ۳/۶۱۹          | $0.001 \geq$ | ۱۵/۹۳۴                | ۶/۳۶    |
|                   | $V_o$    | $a_2$     | ۰/۴۳۷      | ۰/۰۶۵          | $0.001 \geq$ | ۰/۳۰۹                 | ۶/۷۲    |
|                   | $a_y$    | $a_3$     | ۹/۰۶۹      | ۱/۳۶۵          | $0.001 \geq$ | ۶/۳۹۳                 | ۶/۶۴    |
|                   | $T_a$    | $a_4$     | -۶/۴۵۲     | ۱/۰۴۶          | $0.001 \geq$ | -۸/۵۰۳                | -۶/۱۶   |
| عبور از چراغ قرمز | عدد ثابت | $a_5$     | -۰/۷۱۱     | ۰/۳۶۱          | ۰/۰۴۹        | -۱/۸۵۰                | -۱/۹۷   |
|                   | $V_o$    | $a_6$     | ۰/۳۵۰      | ۰/۰۵۰          | $0.001 \geq$ | ۰/۲۵۲                 | ۷/۰۱    |
|                   | $a_y$    | $a_7$     | ۹/۲۰۶      | ۱/۲۰۹          | $0.001 \geq$ | ۶/۸۳۵                 | ۷/۶۱    |
|                   | SMoD     | $a_8$     | -۱/۲۰۳     | ۰/۵۳۶          | ۰/۰۲۴        | -۲/۲۵۶                | -۲/۲۴   |
| توقف              | $X_o$    | $a_9$     | ۰/۱۱۶      | ۰/۰۱۸          | $0.001 \geq$ | ۰/۰۸۰                 | ۶/۴۰    |

#### ۴-۱ لوجیت چندجمله‌ای

جدول ۴ توابع مطلوبیت و جدول ۵ نتایج پرداخت مدل لوجیت چندجمله‌ای را نشان می‌دهد. برای ساخت مدل لوجیت چندجمله‌ای متغیرهای سرعت، شتاب، فاصله تا خط ایست، زمان تا خط ایست و سواری‌های عبوری از تقاطع مدرس استفاده شد. از جدول ۵ می‌توان دریافت:

۱- سطح معناداری (p-value) برای تمام متغیرها کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. یعنی ضرایب متغیرها در مدل لوجیت چندجمله‌ای اختلاف معناداری با مقدار صفر در سطح اطمینان ۹۵ دارند. پس تمامی متغیرها ارتباط معناداری با مطلوبیت و به تبع آن انتخاب گزینه‌ها دارند. لازم به ذکر است که این امر برای مدل‌هایی که در ادامه ارائه می‌شوند، نیز صادق است.

۲- با توجه به مقادیر ضرایب متغیرها، می‌توان گفت:

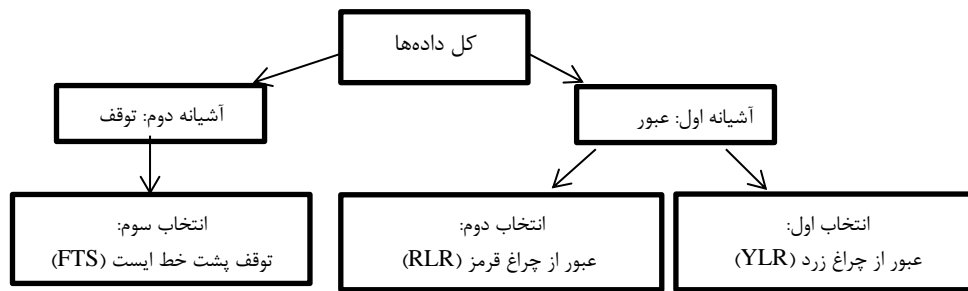
• با توجه به مثبت بودن ضریب  $V_o$  ( $a_2$ ) و ضریب  $a_y$  ( $a_3$ )، با افزایش سرعت یا شتاب، احتمال اینکه راننده تصمیم

به عبور از چراغ زرد بگیرد بیشتر می‌شود. همین امر درباره عبور از چراغ قرمز نیز صادق است. به مقدار ضرایب  $a_6$  و  $a_7$  توجه کنید.

• مقدار ضریب متغیر  $T_a$  ( $a_4$ ) برابر با -۶/۴۵۲ می‌باشد که این ضریب نشان می‌دهد که زمان رسیدن تا خط ایست رابطه معکوس با انتخاب راننده مبنی بر عبور هنگام چراغ زرد دارد. به بیان دیگر با افزایش زمان رسیدن تا خط ایست، امکان عبور راننده از چراغ زرد، کمتر می‌شود.

• سواری مشاهده‌شده در تقاطع مدرس و دارای ضریب منفی هست. یعنی سواری‌های موجود در تقاطع مدرس با احتمال کمتری از چراغ قرمز عبور می‌کنند.

• ضریب  $X_o$  نشان می‌دهد که هر چقدر فاصله تا خط ایست بیشتر باشد، راننده تمایل بیشتری به توقف دارد. در واقع رانندگان وقتی می‌بینند که فاصله آن‌ها تا تقاطع زیاد است، ریسک نکرده و عبور نمی‌کنند.



شکل ۴. نمودار آشیا نه‌ای

جدول ۶. توابع مطلوبیت لوجیت آشیا نه‌ای

| انتخاب (تصمیم)    | مدل مطلوبیت  |
|-------------------|--|
| عبور از چراغ زرد  | $U(YLR) = \alpha_1 + \alpha_2 * V_o^{-1} + \alpha_3 * Neh$ |
| عبور از چراغ قرمز | $U(RLR) = \alpha_4 + \alpha_5 * X_{L52}$                   |
| توقف              | $U(FTS) = \alpha_6 * T_a^2$                                |

جدول ۷. نتایج پرداخت لوجیت آشیا نه‌ای

| تصمیم             | متغیر     | نماد ضریب  | مقدار ضریب | خطای استاندارد | p-value      | فاصله اطمینان ۹۵ درصد | t-value |
|-------------------|-----------|------------|------------|----------------|--------------|-----------------------|---------|
| عبور از چراغ زرد  | عدد ثابت  | $\alpha_1$ | ۵/۴۹۲      | ۱/۶۹۵          | ۰/۰۰۱        | ۲/۱۶۹                 | ۳/۲۴    |
|                   | $V_o$     | $\alpha_2$ | -۱/۴۲۳     | ۲/۱۷۶          | ۰/۵۱۳        | -۵/۶۸۹                | -۰/۶۵   |
|                   | Neh       | $\alpha_3$ | -۲/۲۱۱     | ۰/۴۸۶          | $\geq ۰/۰۰۱$ | -۳/۱۶۵                | -۴/۵۵   |
| عبور از چراغ قرمز | عدد ثابت  | $\alpha_4$ | ۹/۳۸۹      | ۲/۹۶۶          | ۰/۰۰۱        | ۳/۵۷۴                 | ۳/۱۶    |
|                   | $X_{L52}$ | $\alpha_5$ | -۷/۴۴۸     | ۱/۶۹۶          | $\geq ۰/۰۰۱$ | -۱۰/۷۷۳               | -۴/۳۹   |
|                   | توقف      | $T_a$      | $\alpha_6$ | ۰/۰۸۱          | ۰/۰۰۷        | ۰/۰۶۶                 | ۱۰/۹۴   |
| آشیا نه عبور      | IV GO     |            | ۰/۴۶۵      | ۰/۱۵۲          | ۰/۰۰۲        | ۰/۱۶۶                 | ۳/۰۵    |
| آشیا نه توقف      | IV STOPS  |            | ۱          |                |              |                       |         |

#### ۲-۴ لوجیت آشیا نه‌ای

برای لوجیت آشیا نه‌ای، دو آشیا نه ایجاد شد. آشیا نه اول برای عبور رانندگان است که شامل عبور از چراغ زرد و قرمز است. آشیا نه دوم برای توقف پشت چراغ است (شکل ۴). جدول ۶ توابع مطلوبیت برای انتخاب رانندگان و جدول ۷ نیز نتایج پرداخت مدل لوجیت آشیا نه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر ضرایب متغیرها می‌توان برداشت کرد که:

- متغیر Neh که به تقاطع نهضت اشاره دارد دارای ضریب ( $\alpha_3$ ) منفی بوده و رابطه معکوس با انتخاب اول دارد که بدین معنی است رانندگان در این تقاطع تمایل کمتری به عبور از

چراغ زرد نسبت به دیگر تقاطع‌ها دارند.

- ضریب  $X_{L52}$  ( $\alpha_5$ ) برابر با -۷/۴۴ است که نشان می‌دهد رانندگانی که فاصله‌شان از خط ایست بیشتر از ۵۲ متر است، تمایل کمتری به عبور از چراغ قرمز دارد.
- در مدل آشیا نه‌ای، معکوس سرعت خودروها با تصمیم عبور از چراغ زرد ارتباط دارد. یعنی هر چه قدر سرعت کمتر باشد، احتمال عبور از چراغ زرد بیشتر است که منطقی به نظر نمی‌رسد. اما در صورت حذف این متغیر، علیرغم سعی و خطاهای متعدد، مدل معنادار دیگری به دست نیامد. لذا، همین یک مدل به دست آمده، که در آن سرعت ارتباط منطقی با تصمیم عبور از چراغ

مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلاقی رانندگان

زرد ندارد، برای مقایسات آتی (در بخش ۵) گزارش شد.

برای عبور از چراغ زرد و با توزیع نرمال شتاب (میانگین ۳/۵۸۵ و انحراف معیار ۰/۸۷۹) نشان می‌دهد (جدول ۹).

### ۳-۴ لوجیت ترکیبی

در جدول ۸ توابع مطلوبیت برای انتخاب رانندگان و در جدول ۹ نتایج پرداخت مدل لوجیت ترکیبی آمده است. در جدول ۹ مشاهده می‌گردد ضرایب دو متغیر فاصله خودرو از خط ایست ( $X_0$ ) و شتاب پس از زرد شدن چراغ ( $a_y$ ) شتاب برای گزینه عبور از زرد و قرمز، به صورت تصادفی و ضرایب ۶ متغیر دیگر، به صورت ثابت تعریف شده است. در واقع این یافته، نشان دهنده وجود اختلاف سلیقه تصادفی در بین رانندگان در ارتباط با فاصله از خط ایست و شتاب خودروها در تصمیم عبور از چراغ زرد و قرمز است.

- ضریب متغیر  $V_0$  منفی است و نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، امکان اینکه راننده تصمیم به توقف بگیرد کمتر است.
- متغیر Pass که خودروهای شاسی بلند و سواری هستند، با توجه به اینکه ضریب منفی بوده رانندگان این خودروها تمایل کمتری به توقف دارند.
- متغیر Maz که در واقع همان تقاطع مازندران است، دارای ضریب مثبت بوده و رابطه مستقیم با عبور از تقاطع را دارد. یعنی رانندگان در این تقاطع تمایل بیشتری به عبور از چراغ قرمز نسبت به دیگر تقاطع‌ها دارند. برعکس آن، متغیر Neh که در واقع همان تقاطع نهضت است (که مقدار صفر یا یک دارد) دارای ضریب منفی بوده است. یعنی رانندگان در تقاطع نهضت، تمایل کمتری به عبور از چراغ زرد نسبت به دیگر تقاطع‌ها دارند.

به عبارتی دیگر، اهمیت ویژگی‌های  $X_0$  و  $a_y$  در تصمیم عبور از چراغ زرد و قرمز برای همه رانندگان یکسان نیست. لوجیت ترکیبی این ناهمگونی در سلاقی و رفتار رانندگان خودروها را به ترتیب با توزیع نرمال (میانگین ۰/۱۳۳- و انحراف معیار ۰/۰۲۹)

جدول ۸. توابع مطلوبیت لوجیت ترکیبی

| انتخاب (تصمیم)    | مدل مطلوبیت                                |
|-------------------|--|
| عبور از چراغ زرد  | $U(YLR)=a_1 + a_2*X_0 + a_3*a_y + a_4*Neh$ |
| عبور از چراغ قرمز | $U(RLR)=a_2*X_0 + a_3*a_y + a_5*Maz$       |
| توقف              | $U(FTS)=a_6 + a_7*V_0 + a_8*Pass$          |

جدول ۹. نتایج پرداخت لوجیت ترکیبی

| نوع متغیر  | متغیر              | نماد ضریب | مقدار ضریب | خطای استاندارد | p-value | t-value |
|------------|--------------------|-----------|------------|----------------|---------|---------|
| تصادفی     | میانگین $X_0$      |           | -۰/۱۳۳     | ۰/۰۲۹          | ۰/۰۰۱≥  | -۴/۵۷   |
|            | انحراف معیار $X_0$ | $a_2$     | ۰/۰۲۹      | ۰/۰۱۱          | ۰/۰۱۲   | ۲/۴۹    |
|            | میانگین $a_y$      |           | ۳/۵۸۵      | ۰/۷۰۹          | ۰/۰۰۱≥  | ۵/۰۵    |
|            | انحراف معیار $a_y$ | $a_3$     | ۰/۸۷۹      | ۰/۴۱۸          | ۰/۰۳۵   | ۲/۱۰    |
| غیر تصادفی | عدد ثابت           | $a_1$     | ۲/۲۴۰      | ۰/۲۶۰          | ۰/۰۰۱≥  | ۸/۵۹    |
|            | Neh                | $a_4$     | -۱/۰۳۴     | ۰/۳۰۳          | ۰/۰۰۱≥  | -۳/۴۱   |
|            | Maz                | $a_5$     | ۰/۸۷۳      | ۰/۳۳۸          | ۰/۰۱۷   | ۲/۳۷    |
|            | عدد ثابت           | $a_6$     | ۱/۰۱۸      | ۰/۶۶۰          | ۰/۱۲۲   | ۱/۵۴    |
|            | $V_0$              | $a_7$     | -۰/۱۶۱     | ۰/۰۳۹          | ۰/۰۰۱≥  | -۴/۱۳   |

| نوع متغیر   | متغیر | نماد ضریب | مقدار ضریب | خطای استاندارد | p-value | t-value |
|---|-------|-----------|------------|----------------|---------|---------|
| متغیرهای فاصله $X_0$ و شتاب $a_y$ دارای توزیع نرمال می‌باشند. | Pass  | $a_8$     | -۱/۲۶۷     | ۰/۶۳۲          | ۰/۰۴۵   | -۲/۰۰   |

جدول ۱۰. مدل رگرسیون لجستیک

| انتخاب (تصمیم)    | مدل  |
|-------------------|--|
| عبور از چراغ زرد  | $U(YLR)=a_1 + a_2*T_a + a_3*V_o + a_4*a_y$ |
| عبور از چراغ قرمز | $U(YLR)=a_5 + a_6*T_a + a_7*V_o + a_8*a_y$ |

جدول ۱۱. نتایج پرداخت رگرسیون لجستیک

| تصمیم             | متغیر    | نماد ضریب | مقدار ضریب | خطای استاندارد | Wald   | p-value      |
|-------------------|----------|-----------|------------|----------------|--------|--------------|
| عبور از چراغ زرد  | عدد ثابت | $a_1$     | ۳۲/۵۳۲     | ۵/۴۷۲          | ۳۵/۳۴۳ | ۰/۰۰۱ $\geq$ |
|                   | $T_a$    | $a_2$     | -۸/۸۲۹     | ۱/۵۱۹          | ۳۳/۷۹۳ | ۰/۰۰۱ $\geq$ |
|                   | $V_o$    | $a_3$     | ۰/۶۴۵      | ۰/۱۲۱          | ۲۸/۶۲۸ | ۰/۰۰۱ $\geq$ |
|                   | $a_y$    | $a_4$     | ۱۴/۳۷۱     | ۲/۵۵۷          | ۳۱/۵۸۶ | ۰/۰۰۱ $\geq$ |
| عبور از چراغ قرمز | عدد ثابت | $a_5$     | ۶/۷۱۳      | ۱/۸۶۹          | ۱۲/۸۹۳ | ۰/۰۰۱ $\geq$ |
|                   | $T_a$    | $a_6$     | -۱/۷۳۳     | ۰/۳۴۵          | ۲۵/۱۷۶ | ۰/۰۰۱ $\geq$ |
|                   | $V_o$    | $a_7$     | ۰/۵۳۷      | ۰/۱۰۶          | ۲۵/۸۱۳ | ۰/۰۰۱ $\geq$ |
|                   | $a_y$    | $a_8$     | ۱۳/۹۴۳     | ۲/۶۲۱          | ۲۸/۲۹۷ | ۰/۰۰۱ $\geq$ |

توقف رانندگان (FTS) به عنوان گروه مبنا در نظر گرفته شد.

#### ۴-۴ رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای

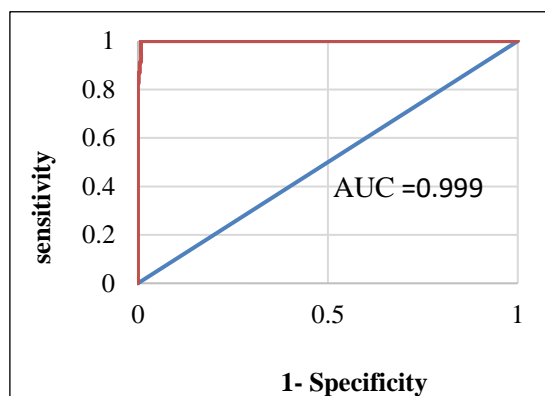
جدول ۱۰ فرم ریاضی رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای و جدول ۱۱ نتایج پرداخت این مدل را نشان می‌دهد.

با توجه به مقادیر ضرایب متغیرها می‌توان گفت متغیرهای سرعت، شتاب اثر مستقیم و متغیر زمان تا خط ایست اثر معکوس بر احتمال توقف دارند. قدر مطلق مقدار آماره آزمون Wald برای تمام متغیرها از مقدار بحرانی ۱/۹۶ بیشتر شده است (جدول ۱۱). یعنی تمام متغیرها در مدل ساخته شده (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) معنادار هستند. این نتیجه را می‌توان از مقادیر p-value که همگی از ۰/۰۵ کوچکترند، نیز دریافت. نتایج حاصله از آزمون Nagelkerke و Cox & Snell می‌دهد که مقدار ضریب همبستگی در مدل رگرسیون لجستیک برابر ۹۷/۸ درصد است.

در منحنی ROC<sup>۴۴</sup> (شکل ۵) محور عمودی حساسیت<sup>۴۵</sup> و محور افقی آن (ویژگی<sup>۴۶</sup> - ۱) است. حساسیت را نرخ مثبت صحیح نیز می‌نامند. حساسیت بدین معنی است که اگر یک پیشامد در واقعیت رخ داده باشد، به درستی پیش بینی شود که آن پیشامد اتفاق می‌افتد. حساسیت را نرخ مثبت صحیح<sup>۴۷</sup> نیز گویند. ویژگی را نرخ منفی صحیح<sup>۴۸</sup> می‌گویند که برابر است با احتمال اینکه پیشامدی رخ نداده است و بطور صحیح پیش‌بینی شود که اتفاق نمی‌افتد.

نمودار ROC نشان می‌دهد مدل ساخته شده برازندگی قابل قبولی دارد زیرا مساحت زیر منحنی (AUC)<sup>۴۹</sup> برابر ۰/۹۹۹ و بسیار نزدیک به یک است. دامنه مقادیر مساحت زیر نمودار بین ۰/۵ و ۱ می‌باشد که هرچه به یک نزدیکتر باشد بهتر است.

مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلاخی رانندگان



شکل ۵. نمودار ROC برای رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای

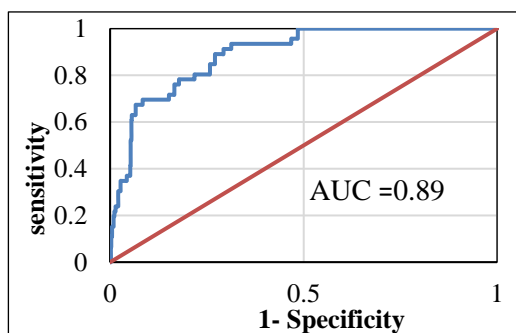
جدول ۱۲. مدل رگرسیون لوجیت ترتیبی

| انتخاب (تصمیم)    | مدل   |
|-------------------|---|
| عبور از چراغ زرد  | $U(YLR) = \alpha_1 + \alpha_2 * Ta + \alpha_3 * V_0 + \alpha_4 * \alpha_y + \alpha_5 * Taghato$ |
| عبور از چراغ قرمز | $U(YLR) = \alpha_6 + \alpha_2 * Ta + \alpha_3 * V_0 + \alpha_4 * \alpha_y + \alpha_5 * Taghato$ |

جدول ۱۳. نتایج پرداخت رگرسیون لوجیت ترتیبی

| متغیر    | نماد ضریب  | مقدار ضریب | خطای استاندارد | Wald    | p-value      |
|----------|------------|------------|----------------|---------|--------------|
| عدد ثابت | Z(YLR)     | $\alpha_1$ | ۳/۲۸۱          | ۳۹/۵۸۳  | $0.001 \geq$ |
|          | Z(RLR)     | $\alpha_6$ | ۵/۶۳۱          | ۷۵/۵۴۲  | $0.001 \geq$ |
| متغیرها  | $T_a$      | $\alpha_2$ | ۱/۳۳۶          | ۱۳۸/۷۵۸ | $0.001 \geq$ |
|          | $V_0$      | $\alpha_3$ | -۰/۰۸۹         | ۲۷/۱۵۴  | $0.001 \geq$ |
|          | $\alpha_y$ | $\alpha_4$ | -۲/۶۲۲         | ۸۷/۰۲۱  | $0.001 \geq$ |
|          | Taghato    | $\alpha_5$ | -۰/۹۳۶         | ۱۴/۹۱۴  | $0.001 \geq$ |

توقف رانندگان (FTS) به عنوان گروه مبنا در نظر گرفته شد.



شکل ۶. نمودار ROC برای مدل لوجیت ترتیبی

#### ۴-۵ لوجیت ترتیبی

مدل لوجیت ترتیبی در جدول ۱۲ نتایج پرداخت آن در جدول ۱۳ آمده است. با توجه به مقادیر موجود در ستون مقدار ضریب می‌توان گفت متغیر زمان تا خط ایست اثر مستقیم بر احتمال توقف دارند و در طرف دیگر متغیر سرعت، شتاب و نوع تقاطع اثر معکوس بر احتمال توقف دارند.

نمودار ROC (شکل ۶) نشان می‌دهد مدل ساخته شده برازندگی قابل قبولی داشته زیرا مساحت زیر منحنی برابر  $0.89$  و نزدیک به یک هست.

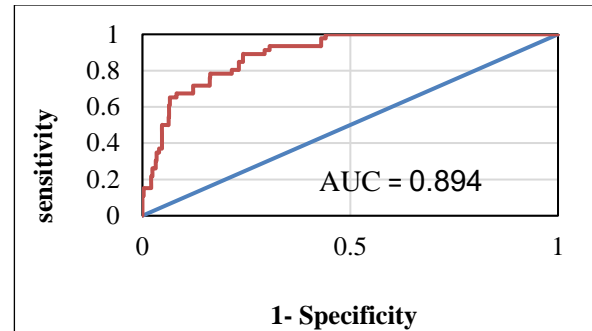
#### ۴-۶ رگرسیون پروبیت

مدل پروبیت در جدول ۱۴ و نتایج پرداخت آن در جدول ۱۵ آمده است. با توجه به مقادیر موجود در ستون مقدار ضریب

## ۵. مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌ها

در این بخش ابتدا مدل‌ها با همدیگر مقایسه و سپس نتایج اعتبارسنجی آنها ارائه می‌شود. در انتها نیز نتایج این مقاله با مطالعات پیشین مقایسه می‌شود. جدول ۱۶ و ۱۷ به ترتیب مقایسه مدل‌های مطلوبیت و رگرسیونی را نشان می‌دهد.

می‌توان گفت متغیرهای سرعت، شتاب و نوع تقاطع اثر معکوس بر احتمال توقف دارند و در طرف دیگر متغیر زمان تا خط ایست اثر مستقیم بر احتمال توقف دارند. نمودار ROC در شکل ۷ نشان می‌دهد مدل ساخته شده برازندگی قابل قبولی داشته زیرا مساحت زیر منحنی مقدار ۰/۸۹۴ است.



شکل ۷. نمودار ROC برای مدل پروبیت

جدول ۱۴. مدل رگرسیون پروبیت

| انتخاب (تصمیم)    | مدل   |
|-------------------|---|
| عبور از چراغ زرد  | $U(YLR) = \alpha_1 + \alpha_2 * Ta + \alpha_3 * V_o + \alpha_4 * \alpha_y + \alpha_5 * Taghato$ |
| عبور از چراغ قرمز | $U(YLR) = \alpha_6 + \alpha_2 * Ta + \alpha_3 * V_o + \alpha_4 * \alpha_y + \alpha_5 * Taghato$ |

جدول ۱۵. نتایج پرداخت مدل رگرسیون پروبیت

| متغیر    | نماد ضریب      | مقدار ضریب | خطای استاندارد | Wald Chi-Square | p-value |
|----------|----------------|------------|----------------|-----------------|---------|
| عدد ثابت | Z(YLR)         | ۱/۶۷۴      | ۰/۲۶۵          | ۳۹/۸۷۴          | ۰/۰۰۱≥  |
|          | Z(RLR)         | ۲/۹۱۶      | ۰/۳۲۱          | ۸۲/۰۵۴          | ۰/۰۰۱≥  |
| متغیرها  | T <sub>a</sub> | ۰/۶۹       | ۰/۰۴۹          | ۱۹۱/۰۳۸         | ۰/۰۰۱≥  |
|          | V <sub>o</sub> | -۰/۰۴۲     | ۰/۰۰۸          | ۲۸/۱۰۲          | ۰/۰۰۱≥  |
|          | α <sub>y</sub> | -۱/۴۲۶     | ۰/۱۳۷          | ۱۰۷/۸۴۳         | ۰/۰۰۱≥  |
|          | Taghato        | -۰/۵۸۵     | ۰/۱۲۹          | ۲۰/۳            | ۰/۰۰۱≥  |

توقف رانندگان (FTS) به عنوان گروه مبنا در نظر گرفته شد.

جدول ۱۶. مقایسه مدل‌های لوجیت چند جمله‌ای، آشیانه‌ای و ترکیبی

| نام مدل لوجیت | LL(β)    | LL(C)    | LL(0)    | ρ <sub>0</sub> <sup>2</sup> | ρ <sub>c</sub> <sup>2</sup> | ρ <sub>0</sub> <sup>2</sup> | ρ <sub>c</sub> <sup>2</sup> | AIC   | درصد برآورد درست |
|---------------|----------|----------|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|------------------|
| چندجمله‌ای    | -۶۵/۰۱۸  | -۵۹۶/۵۱۷ | -۷۷۲/۳۲۴ | ۰/۹۱۵                       | ۰/۸۹۱                       | ۰/۹۰۵                       | ۰/۸۷۸                       | ۱۴۷/۹ | ۹۷/۲             |
| آشیانه‌ای     | -۲۶۰/۴۵۷ | -۵۹۶/۵۱۷ | -۷۷۲/۳۲۴ | ۰/۶۶۲                       | ۰/۵۶۳                       | ۰/۶۵۶                       | ۰/۵۵۶                       | ۵۳۴/۹ | ۸۹/۳۱            |
| ترکیبی        | -۳۰۷/۱۴۶ | -۷۷۱/۲۲۵ | -۷۷۲/۳۲۴ | ۰/۶۰۲                       | ۰/۶۰۱                       | ۰/۵۹                        | ۰/۵۹۲                       | ۶۳۴/۳ | ۸۵/۳۲            |

مقایسه مدل‌های رگرسیونی و نظریه مطلوبیت در پیش‌بینی تصمیم عبور از چراغ قرمز/زرد با لحاظ ناهمگنی مکانی و سلاقی رانندگان

جدول ۱۷. مقایسه مدل‌های رگرسیون لجستیک

| نام مدل    | LL( $\beta$ ) | R <sup>2</sup> Cox and Snell | R <sup>2</sup> Nagelkerke | R <sup>2</sup> Mc Fadden | AIC     | AUC   |
|------------|---------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------|-------|
| چندجمله‌ای | -۶۴/۵۵۸       | ۰/۷۹۹                        | ۰/۹۷۸                     | ۰/۹۴۶                    | ۷۳/۵۵۸  | ۰/۹۹۹ |
| ترتیبی     | -۲۷۷/۰۴۰      | ۰/۷۲۸                        | ۰/۸۹۲                     | ۰/۷۶۸                    | ۲۸۹/۰۴۰ | ۰/۸۹  |
| پروبیتم    | -۲۷۹/۲۲۴      | -                            | -                         | -                        | ۲۹۱/۲۲۴ | ۰/۸۹۴ |

جدول ۱۸. اعتبار سنجی مدل‌ها

| نوع مدل           | درصد برآورد درست |
|-------------------|------------------|
| لوجیت چند جمله‌ای | ۹۷/۱۶            |
| لوجیت آشیانه‌ای   | ۸۹/۸۷            |
| لوجیت ترکیبی      | ۸۴/۰۹            |
| لجستیک چندجمله‌ای | ۹۹/۴۳            |
| لجستیک ترتیبی     | ۹۴/۳۱            |
| پروبیتم           | ۹۴/۳۸            |

در ادامه، نتایج حاصل از پرداخت مدل‌های مقاله جاری با مدل‌های مطالعات پیشین در دو بخش مدل‌های رگرسیونی و مطلوبیت ارائه مقایسه می‌گردد.

المیتینی و همکاران (۲۰۱۵)، مقدار ضریب همبستگی برای درخت رگرسیون و طبقه بندی را برابر ۰/۷۷۹ گزارش کردند. ضریب همبستگی در رگرسیون خطی، نسبت کاهش خطا را نشان می‌دهد. اما در رگرسیون لجستیک، فرض هم پراکنشی خطا برقرار نیست و تعبیری را که ضریب همبستگی در برازش خطی دارد، نمی‌توان برای رگرسیون لجستیک به کاربرد. لذا در رگرسیون لجستیک از شبه ضریب همبستگی<sup>۵۰</sup> استفاده می‌شود که مقادیر آن در جدول ۱۷ نشان داده شده است. مقادیر شبه ضریب همبستگی Cox and Snell، Nagelkerke، Mc Fadden مدل‌های رگرسیونی، بالا و نزدیک به یک هست و بسیار قابل قبول می‌باشد.

در دیگر مطالعات قبلی که از رگرسیون لجستیک استفاده شده، معیارهای نکویی برازش کلی مدل‌ها ارائه نشده است. در بخش مدل‌های تئوری مطلوبیت، گیتز و همکاران (۲۰۱۴)، مقدار LL را ۲۴۱۹- و شبه ضریب همبستگی McFadden را

باتوجه به جدول ۱۶ و مقادیر  $\rho_c^2$ ،  $\rho_0^2$ ،  $\bar{\rho}_c^2$  و  $\bar{\rho}_0^2$  و AIC می‌توان فهمید که مدل لوجیت چند جمله‌ای بهتر از لوجیت آشیانه‌ای و ترکیبی است. درصد برآورد درست، نسبت-های درست نمایی، و معیار آکایکه همه براین نتیجه صحه می‌گذارد. همچنین مدل لوجیت آشیانه‌ای مناسب‌تر از لوجیت ترکیبی به نظر می‌رسد.

همچنین انجام آزمون فرضیه نشان داد  $LL(\beta)$  اختلاف معناداری با  $LL(0)$  و  $LL(C)$  در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارند. یعنی ساخت مدل، باعث بهبود درست نمایی پیش‌بینی‌ها می‌شود و گام موثری در برابر گزینه عدم ساخت مدل است.

باتوجه به جدول ۱۷ برای مقایسه مدل‌های لجستیک و لوجیت ترتیبی و پروبیتم می‌توان از لگاریتم درست نمایی استفاده کرد. بهترین مقدار لگاریتم درست نمایی در حدود ۶۵- و برای رگرسیون لجستیک چند جمله‌ای هست. ضریب همبستگی Cox and Snell، Nagelkerke و McFadden نیز برای این مدل نزدیک به یک هست و نسبت به سایر مدل‌ها بهتر هست. همانگونه که در بخش ۴-۴، مشاهده شد، رگرسیون لجستیک بیشترین مساحت زیر نمودار ROC را نسبت به لوجیت ترتیبی و پروبیتم دارد. مساحت زیر نمودار ROC در رگرسیون لجستیک به عدد ۱ بسیار نزدیک بود.

جدول ۱۸ نشان می‌دهد مدل‌های رگرسیونی منجر به درصد برآورد درست بالاتری می‌شوند. علاوه برآن، در هر دو خانواده، یعنی مدل‌های رگرسیونی و مطلوبیت، لوجیت چندجمله‌ای نسبت به سایر مدل‌ها، برآوردهای بهتری دارد. مدل لوجیت آشیانه‌ای و ترکیبی، در مقایسه با سایر مدل‌ها از بابت صحت پیش‌بینی‌ها کمی ضعیف‌تر عمل می‌کند.

۰/۶۰۵ گزارش کردند. تعداد مشاهدات نیز برابر ۶۲۰۸- بود. در مطالعه (Savolainen et al., 2015)، به ازای ۵۱۲۱ مشاهده، مقدار LL برای مدل ضرایب تصادفی با داده پنل برابر ۱۸۱۵- بود. در مطالعه جاری، کمترین مقدار LL در حدود ۶۵- برای مدل- های رگرسیون لجستیک و لوجیت چندجمله‌ای بود. تعداد داده پرداخت مدل نیز برابر ۷۰۳ بود. شبه ضریب همبستگی McFadden ( $\rho_0^2$ ) برای دو مدل مزبور، به ترتیب برابر ۰/۹۴۶ و ۰/۹۱۵ بود. لگاریتم درست نمایی (LL) در مطالعه جاری نسبت به مطالعات دیگر، به صفر نزدیکتر و همچنین ضریب همبستگی McFadden به یک نزدیکتر است که حاکی از برآزش بهتر مدل‌های مقاله جاری است.

به دلیل اینکه ویژگی‌های ترافیکی و هندسی تقاطعات، سرعت معابر، رفتار راننده، قوانین راهنمایی و رانندگی در مطالعه جاری و سایر مطالعات تفاوت دارد، مقایسه مستقیم تابع احتمال توقف/عبور نیز منطقی به نظر نمی‌رسد. اما در کل می‌توان گفت رانندگان ایرانی بسیار تهاجمی هستند و عبور از چراغ زرد و تخلف عبور از چراغ قرمز در میان آنان بسیار شایع هست (Choupani, 2021). یعنی احتمال عبور رانندگان ایرانی از تقاطع در مقایسه با رانندگان سایر کشورها، بسیار بیشتر است. در مطالعه جاری، سه متغیر زمان تا خط توقف، سرعت، و شتاب متغیرهایی بودند که بیشترین تاثیر را بر متغیرهای تصمیم توقف/عبور داشتند. در سایر مطالعات، متغیرهای دیگری نیز به کار رفته است. از میان این متغیرها می‌توان سن و جنس (Papaioannou, 2007)، حضور سایر خودروها در خطوط مجاور یا خیابان کناری (Gates et al., 2007)، پیشرو یا پسرو بودن خودرو (Elmitiny et al., 2010) را نام برد. گردآوری و استخراج اطلاعاتی نظیر حضور سایر خودروها در خطوط مجاور یا خیابان کناری، پیشرو یا پسرو بودن خودرو، پس از ضبط فیلم‌های جریان ترافیک و بازبینی فیلم‌ها انجام گرفته است. اما گردآوری این اطلاعات در سیستم‌های دینامیک و بهنگام به

راحتی امکان پذیر نیست. این امر سبب می‌شود تا کاربست مدل- هایی که شامل این متغیرها هستند در سیستم‌های پویا و بهنگام با مشکلاتی مواجه شود. متغیرهای سرعت، شتاب، زمان تا خط توقف، یا فاصله تا خط توقف، متغیرهایی هستند که به کمک سیستم‌های موقعیت‌سنج، استخراج آنها در سیستم‌های بهنگام و پویا نسبت به سایر متغیرها آسان‌تر است. علاوه بر آن، متغیرهایی نظیر سن نیز بر اساس حدس و گمان آمارگیر کنار خیابان تعیین شده که جای سوال دارد.

## ۶. نتیجه‌گیری

هدف از انجام پژوهش جاری، مقایسه عملکرد و برازندگی مدل- های خانواده رگرسیون و نظریه مطلوبیت در مدل‌سازی تصمیم‌گیری توقف و عبور رانندگان هنگام مواجهه با چراغ زرد بود. برای این منظور مدل‌های رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای، ترتیبی و پروبیت و مدل‌های لوجیت چندجمله‌ای، آشیانه‌ای، و ترکیبی ساخته و پرداخته و سپس با همدیگر مقایسه شدند. در خانواده مدل‌های مطلوبیت، به ترتیب لوجیت چند جمله‌ای، آشیانه‌ای و ترکیبی بهترین نتایج را دارا بودند و این درحالیست که در خانواده مدل‌های رگرسیونی، بهترین نتایج به ترتیب متعلق به رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای، ترتیبی، و پروبیت بود. با مقایسه مدل‌های رگرسیونی و تئوری مطلوبیت، مشخص شد مدل‌های رگرسیونی عملکرد بهتری در برابر مدل‌های مطلوبیت دارند. همچنین از بین کلیه مدل‌ها، رگرسیون لجستیک چندجمله‌ای به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. نتایج اعتبارسنجی به کمک ۲۰ درصد از داده‌ها نیز موید همین مطلب است. مقادیر درصد برآورد درست در اعتبارسنجی مقادیر بالایی را نشان می‌دهد و می‌توان دریافت که مدل‌سازی‌ها به خوبی عمل کرده و عوامل موثر بر راننده در تصمیم‌گیری از عبور تقاطع را به خوبی نشان می‌دهند. از نتایج تمامی مدل‌ها می‌توان دریافت کرد که سرعت، شتاب، و زمان تا خط ایست از عوامل موثر بر رفتار راننده هنگام زرد شدن چراغ می‌باشد.

27. virtual reality
28. adaptive
29. maladaptive
30. dangerous
31. anxious
32. angry
33. restrictive policy
34. permissive policy
35. yellow light running
36. red light running
37. first to stop
38. choice set
39. independence of irrelevant alternatives
40. unrestricted substitution patterns
41. correlation in unobserved factor over time
42. odds
43. likelihood
44. receiver operating characteristic curve (ROC)
45. sensitivity
46. specificity
47. true positive
48. true negative
49. area under curve (AUC)
50. pseudo  $R^2$

## ۸ مراجع

— آیین‌نامه راهنمایی و رانندگی. (۱۳۸۴).

— عبدالرزاقی، علیرضا، میربهاء، بابک، رصافی، امیرعباس (۱۳۹۸) "مدلسازی رفتار تردید رانندگان در انتخاب عبور یا توقف پس از زمان زرد در تقاطع‌های چراغ‌دار با استفاده از مدل لوجیت ترکیبی (مطالعه موردی شهر قزوین)"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال ۱۱، شماره ۱، پیاپی ۴۲، صفحه ۲۲۱-۲۳۸.

— نجمی اتر آبادی، احمد. (۱۳۹۶) "مطالعه ناحیه تردید در میدان‌های چراغ‌دار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: ایمان آقایان و عبدالاحد چوپانی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

در مدل لوجیت ترکیبی، متغیرهای فاصله خودرو از خط ایست و شتاب به عنوان پارامترهای تصادفی در نظر گرفته شد. فاصله خودروها در ابتدای زمان زرد و شتاب آنها، باعث اختلاف سلیقه رانندگان هنگام تصمیم‌گیری توقف/عبور می‌شود. به عبارتی دیگر، اهمیت ویژگی‌های  $X_0$  و  $\alpha_y$  در تصمیم عبور از چراغ زرد و قرمز برای همه رانندگان یکسان نیست. مدل‌های رگرسیونی نتوانستند تفاوت‌ها و ناهمگنی مکانی رانندگان تقاطع‌ها را به خوبی نشان دهند. اما مدل‌های خانواده مطلوبیت نشان دادند که رانندگان در تقاطع نهضت و مدرس تمایل کمتری به عبور دارند. بر خلاف آن، رانندگان تقاطع مازندران، تمایل بیشتری به عبور دارند.

## ۷ پی‌نوشت‌ها

1. effective green
2. discrete choice theory
3. utility theory
4. multinomial logit
5. nested logit
6. attractiveness
7. trip-makers
8. generalized extreme value (GEV)
9. mixed logit
10. random taste variation
11. random parameter model
12. spatial heterogeneity
13. multinomial logistic regression
14. ordinal logit
15. probit
16. driver-assistive
17. dilemma zone protection
18. classification and regression trees (CART)
19. following vehicle
20. leading vehicle
21. connected vehicles
22. cellular automata
23. Enna, Italy
24. Thessaloniki, Greece
25. Xi'an, China
26. driving simulator

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال شانزدهم / شماره اول (۶۲) / پاییز ۱۴۰۳

- in traffic flow”, *Operations Research*, 8(1), pp. 112-132.
- Hensher, D.A., John, M.R. and William H.G. (2005) “Applied choice analysis: A primer”, Cambridge University Press, Cambridge.
- Hess, S. (2005) “Advanced discrete choice models with applications to transport demand”, PhD Thesis, University of London.
- Lavrenz, S.M., Pyrialakou, V.D. and Gkritza, K. (2014) “Modeling driver behaviour in dilemma zones: A discrete/continuous formulation with selectivity bias corrections”, *Analytic Methods in Accident Research*, 3, pp. 44-55.
- McFadde, D. and Train, K.E. (2000) “Mixed MNL models for discrete response”, *Journal of Applied Econometrics*, 15(5), pp. 447- 470.
- McGee, Sr., H.K., Moriarty, K., Eccles, K., Liu, M., Gates, T.J. and Retting, R. (2012) “NCHRP Report 731: Guidelines for Timing Yellow and All-Red Intervals at Signalized Intersections”, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2012.
- Naik, B., Appiah, J. and Rilett, L.R. (2020) “Are dilemma zone protection systems useful on high speed arterials with signal coordination? A case study”, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 18(2), pp. 219-229.
- National Committee on Uniform Traffic Laws and Ordinances (NCUTLO). (2000) “Uniform Vehicle Code”.
- Papaioannou, P. (2007) “Driver behaviour, dilemma zone and safety effects at urban signalised intersections in Greece”, *Accident Analysis & Prevention*, 39(1), pp. 147-158.
- Ali, Y., Haque, M.M., Zheng, Z. and Bliemer, M.C. (2021) “Stop or go decisions at the onset of yellow light in a connected environment: A hybrid approach of decision tree and panel mixed logit model”, *Analytic Methods in Accident Research*, 31, 100165.
- Cai, J., Zhao, J., Liu, J., Shen, K., Li, X., & Ye, Y. (2020). Exploring factors affecting the yellow-light running behavior of electric bike riders at urban intersections in China. *Journal of advanced transportation*, 2020.
- Campisi, T., Tesoriere, G., Canale, A., Basbas, S., Vaitsis, P., Nikiforiadis, A., & Nikolaidis, M. (2020). Comparison of Red-Light Running (RLR) and Yellow-Light Running (YLR) traffic violations in the cities of Enna and Thessaloniki. *Transportation research procedia*, 45, pp. 947-954.
- Choupani, A. A. (2021) “Assessing drivers’ compliance with restrictive yellow traffic lights in a developing country”, *Transportation Research Record*, 2675(6), pp. 38-50.
- Du, M., Liu, J., & Chen, Q. (2021). Improving traffic efficiency during yellow lights using connected vehicles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 578, 126108.
- Elmitiny, N., Yan, X., Radwan, E., Russo, C. and Nashar, D. (2010) “Classification analysis of driver's stop/go decision and red-light running violation”, *Accident Analysis & Prevention*, 42(1), pp. 101-111.
- Gates, T.J., Noyce, D.A., Laracuate, L. and Nordheim, E.V. (2007) “Analysis of driver behavior in dilemma zones at signalized intersections”, *Transportation Research Record*, 2030, pp. 29-39.
- Gazis, D., Herman, R., and Maradudin, A. (1960) “The problem of the amber signal light

– Rakha, H.A., Amer, A. and El-Shawarby I. (2008) “Modeling driver behaviour within a signalized intersection approach decision-dilemma zone”, *Transportation Research Record*, 2069, pp. 16–25.

– Savolainen, P.T., Sharma, A. and Gate, T.J. (2016) “Driver decision-making in the dilemma zone examining the influences of clearance intervals, enforcement cameras and the provision of advance warning through a panel data random parameters probit model”, *Accident Analysis & Prevention*, 96, pp. 351-360.

– Train, K.E. (2009) “Discrete Choice Methods with Simulation”, Cambridge University Press: Cambridge, Edition: 2.

– Wang, X., Mao, Y., Xiong, J. J., & He, W. (2022). Yellow light decision based on driving style: Day or night?. *PLoS one*, 17(3), e0265267.

– Wei, H., Li, Z., Yi, P. and Duemmel, K. (2011) “Quantifying dynamic factors contributing to dilemma zone at high-speed signalized intersections”, *Transportation Research Record*, 2259, pp. 202-212.

– Yang, Z., Tian, X., Wang, W., Zhou, X. and Liang, H. (2014) “Research on driver behavior in yellow interval at signalized intersections”, *Mathematical Problems in Engineering*.

محمدعلی حقیقت، عبدالاحد چوپانی، فرشید افشار

محمدعلی حقیقت، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-عمران را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه سمنان و درجه کارشناسی ارشد در رشته راه و ترابری در سال ۱۳۹۹ را از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی ترافیک، بررسی رفتار رانندگان و مدلسازی تصمیم‌گیری آنان در تقاطعات چراغ‌دار است. ایشان از سال ۱۳۹۷ با شرکت راه و ساختمان ازگو همکاری دارند.



عبدالاحد چوپانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۸۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در سال ۸۵ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۹۴ موفق به کسب درجه دکتری در رشته راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی ترافیک، برنامه‌ریزی حمل و نقل، و ایمنی ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی شاهرود است.



فرشید افشار، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه بناب و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را در سال ۱۳۹۳ از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی، ایمنی، انتخاب گسسته، داده کاوی، بزرگ داده، در حیطه برنامه‌ریزی حمل و نقل و مهندسی عمران است.

