فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیست و دوم، شماره ۸۸، بهار ۱۴۰۱، ص. ۷۰-۵۳

بررسی تاثیر شرایط جوی و بارندگی بر سرعت جریان آزاد و ظرفیت تردد در آزاد راه‌ها (مطالعه موردی آزاد راه تهران-قم)

امین میرزا بروجردیان (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه راه و ترابری دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مسعود ابراهیمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علوم تحقیقات واحد شاهرود، ایران

E-mail: Boroujerdian@modares.ac.ir

چکیده

تغییر شرایط پایه رانندگی موجب تغییر در ظرفیت عبوری آزادراه می‌شود که به معنای تغییر عملکرد و کیفیت سطح خدمت‌دهی راه است. عواملی که موجب کاهش ظرفیت می‌شود را می‌توان به دو دسته پایدار و ناپایدار تقسیم‌بندی کرد. در این تحقیق تاثیر عوامل جوی (بارندگی) بعنوان یکی از عوامل ناپایدار مؤثر بر سرعت جریان آزاد و ظرفیت در آزادراه تهران-قم بررسی می‌گردد تا بدین طریق مقدار ضریب کاهندگی بارش باران در منطقه جغرافیایی ایران که تاکنون مطالعه نشده، تعیین گردد و در صورتی که ساعت طرح سال آزادراهی در ساعت بارندگی قرار داشت، بابه‌کارگیری ضریب کاهندگی، ظرفیت طراحی تصحیح گردد.

بدین منظور تغییرات سرعت جریان آزاد در در دو وضعیت جوی بارندگی و آفتابی مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون چند جمله ای و اعتبار سنجی داده‌ها از طریق آزمون‌های آماری نتایج مورد ارزیابی قرار گرفتند. داده‌های ترافیکی و بارندگی مورد استفاده مربوط به ۶ ماه انتهایی سال ۱۳۹۱ می‌باشند. نتایج موید این موضوع است که بارندگی باعث کاهش۳/۵ تا ۸/۹ درصدی ظرفیت و ٤ تا ۱۰ درصدی سرعت جریان آزادراه می‌شود.

کلمات کلیدی: سرعت جریان آزاد، بارندگی، ظرفیت، آزادراه

۱. مقدمه

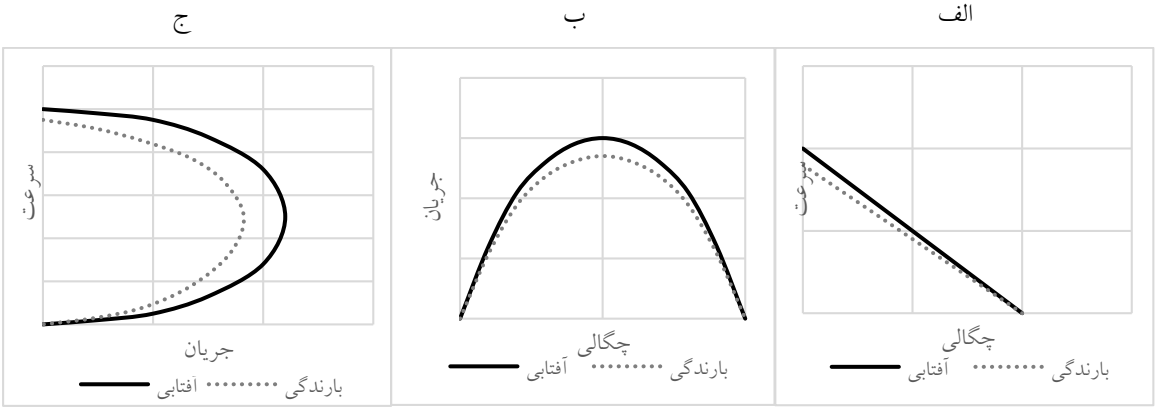
ظرفیت و سطح خدمت‌رسانی راه‌ها در تحلیل‌های عملکردی، طراحی و برنامه‌ریزی ترافیکی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. ظرفیت وسایل نقلیه، تعداد حداکثر وسایل نقلیه‌ای می‌باشند که از یک مقطع در یک زمان مشخص و تحت شرایط راه، ترافیکی، و کنترلی می‌توانند عبور کنند و سطح خدمت‌رسانی راه کمیتی است که کیفیت راه را از دیدگاه کاربران راه مشخص می‌کند. برای ارزیابی عملکردی راه‌ها از پارامترهایی مانند نسبت حجم به ظرفیت، سرعت، چگالی و غیره استفاده می‌شود.

در ارزیابی و تعیین ظرفیت آزادراه‌ها شرایط پایه‌ای شامل آب‌وهوای خوب، شرایط رویه مناسب و خشک، کاربران آشنا به مسیر و فقدان موانع در جریان ترافیک در نظر گرفته می‌شود. در اغلب موارد شرایط حاکم بر راه متفاوت از شرایط پایه است. بنابراین محاسبات و تحلیل‌های مربوط به تعیین ظرفیت راه باید با اعمال ضرایبی تعدیل گردد. شرایط حاکم بر راه شامل شرایط جاده‌ای، محیطی، ترافیکی و کنترلی می‌باشد که تغییر در هر یک از این شرایط باعث تغییر ظرفیت راه خواهد شد. بارندگی از عواملی است که شرایط محیطی راه را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد و می‌تواند شرایط حاکم بر جاده و در نهایت ظرفیت راه را تغییر دهد [TRB executive comittee 2010].

بارندگی علاوه بر این که ظرفیت راه را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد، بر مقدار سرعت جریان آزاد نیز تاثیرگذار است. به‌طوری که در زمان بارندگی، احساس ایمنی در راننده کاهش می‌یابد و راننده بطور ناخودآگاه احساس خطر کرده و سرعت خود را کاهش می‌دهد. بعلاوه آنکه با کاهش دید در راننده این احساس خطر بیشتر خواهد شد. تحقیقات نشان می‌دهد مسافت طی شده پس از ترمز می‌تواند در زمان بارندگی تا ۱۰ برابر بیشتر از زمان معمول آن باشد که این میزان بستگی به میزان بارندگی دارد [Hablas 2007] .علاوه بر تاثیر احساس ایمنی راننده در کاهش سرعت وسایل نقلیه در زمان بارندگی، سخت‌تر شدن کنترل وسیله‌نقلیه در این شرایط نیز باعث کاهش سرعت می‌شود. در شرایطی مانند وقوع بادهای شدید، جاده یخی و یا جمع شدگی آب در جاده که باعث کاهش ضریب اصطکاک بین سطح روسازی راه و لاستیک وسیله‌نقلیه می‌شود، کنترل وسیله‌نقلیه را مشکل می‌کند و اگر راننده در این وضعیت نتواند وسیله نقلیه را کنترل و مهار کند، احتمال بروز سانحه افزایش می‌یابد [Rakha et al. 2007]. بنابراین با توجه به اثر گذاری شرایط جاده بر سرعت جریان آزاد، درصورتی که رانندگان در شرایط بارندگی با سرعتی کمتر از سرعت جریان آزاد حرکت کنند، تاخیر بوجود خواهد آمد و در نهایت باعث می‌شود میزان تقاضای ترافیک نزدیک به مقدار ظرفیت یا بیش از آن شود.

در بیان تاثیر بارندگی بر چگالی باید خاطر نشان کرد که در هنگام بارندگی با کاهش احساس ایمنی، رانندگان فاصله طولی خود با وسیله‌نقلیه جلویی را افزایش می‌دهند و این موضوع باعث کاهش تعداد وسایل‌نقلیه در واحد طول می‌شود که به معنای کاهش چگالی است و در این حالت ظرفیت مسیر کاهش می‌یابد.

با افزایش جریان عبوری در حالت بارندگی کاهش سرعت شتاب بیشتری به خود گرفته و اختلاف آن با حالت آب‌وهوای آفتابی افزایش می‌یابد و به طبع آن کاهش چگالی جریان نیز بیشتر می‌شود و دیگر نمی‌توان انتظار داشت که ظرفیت عبوری در حالت بارندگی به میزان ظرفیت عبوری در وضعیت آب و هوایی خشک برسد. انتظار می رود نمودارهای سرعت–جریان ، سرعت–چگالی و چگالی–جریان تحت تأثیر این موضوع بصورت شماتیک مانند شکل ۱ (الف تا ج) باشد.



شکل ۱. نمودارهای تغییرات سرعت-جریان-چگالی در دو وضعیت آب و هوای آفتابی و بارندگی بصورت شماتیک

اثرات وضعیت جوی و بارندگی بر شرایط جاده و به تبع آن تغییرات در ظرفیت، سرعت جریان آزاد و چگالی راه‌ها تشریح گردید و مشخص شد که می‌بایست تعدیلی در ارزیابی‌های ترافیکی آزادراه‌ها در شرایط حاکم بارندگی جاده انجام شود. دستورالعمل ظرفیت راه‌ها ضریب تعدیل جامعی برای پارامتر بارندگی هوا در نظر نگرفته است و در آن پیشنهاد شده است که به منظور تدقیق محاسبات، ضریب کاهندگی جریان ترافیکی در مناطق مختلف محاسبه گردد. زیرا میزان اثر بارندگی بر کاهش سرعت جریان و ظرفیت، به سبک رانندگی مرتبط می‌باشد و رعایت فاصله طولی و عرضی بین وسایل نقلیه و حرکت بین خطوط در هر کشور متفاوت است.

بنابراین ضروری است مطالعه‌ی بررسی وضعیت تردد در شرایط بارندگی در مناطق و راه‌های مختلف انجام شود و نمودار اصلاح شده ظرفیت برای مطالعات ترافیکی برآورد گردد تا بدین ترتیب ضریب کاهندگی جریان در راه‌ها تعیین شده و در طراحی راه‌هایی که ۳۰ امین ساعت اوج ترافیک آن‌ها در وضعیت بارندگی قرار می‌گیرند، تاثیر داده شود. زیرا در مناطقی که از نظر جغرافیایی از بارش قابل توجهی برخوردار هستند، احتمال واقع شدن ساعت طرح ترافیکی (۳۰امین ساعت اوج) در یکی از ساعات روزهای بارندگی وجود دارد و می‌بایست ضریب کاهندگی جریان و حجم ترافیک ساعتی برای طراحی آزادراه لحاظ گردد.

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر بارندگی بر تغییر نرخ جریان عبوری و سرعت جریان آزاد در آزادراه‌ها می‌باشد که به صورت مطالعه موردی آزادراه تهران-قم مورد ارزیابی قرار گرفته است. فرضیه مورد ارزیابی در این پژوهش، کاهش نرخ جریان عبوری و ظرفیت آزادراه‌هایی است که۳۰ امین ساعت اوج ترافیک آن‌ها در وضعیت بارندگی قرار می‌گیرد.

۲. مرور ادبیات

مطالعات متعددی در ارتباط با تاثیر آب‌وهوا بر میزان حجم تردد و ترافیک، ایمنی راه و تصادفات، ظرفیت و سرعت جریان آزاد انجام شده است که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره شده است.

در مطالعه‌ای مشخص شده است که آب و هوای نامطلوب در اغلب موارد بر تصمیمات مربوط به انتخاب حالت سفر، مسیر، زمان، مقصد و یا حتی وقوع سفر تأثیر می‌گذارد. بنابراین آب و هوا هم بر عرضه و هم بر تقاضای حمل و نقل تأثیر گذار می‌باشد [Kockelman 1998] و در صورتی که وضعیت آب‌وهوایی مقطعی نامساعد باشد، تقاضای ترافیکی و ترددها برای مقطع کاهش خواهد یافت. این مطالعه به بررسی مقدار تاثیر آب و هوای نامطلوب بر میزان تغییرات تقاضا و عرضه ترافیکی و در نهایت ظرفیت راه‌ها نپرداخته است.

نپ[1] و همکاران در سال ۲۰۰۰ تأثیر آب و هوا بر حجم ترافیکی و ایمنی را در آزادراه ایالت آیوا طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸ مورد بررسی قرار دادند که در این بررسی به آنالیز ٦٤ توفان قابل ملاحظه پرداخته شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که حجم ترافیک به میزان ١٦ تا ٤٧ درصد و بطور متوسط ۲۲/۳ درصد کاهش داشته است. در این مطالعه مشخص شده است که حجم ترافیک کاهش یافته ارتباط قابل توجهی با بارش برف و سرعت وزش باد دارد [Knapp , Smithson and Aemal 2000]. این پژوهش تغییرات حجم ترافیک در شرایط جوی توفانی در یک آزادراه را تحلیل کرده است و به بررسی شرایط جوی بارندگی نپرداخته است.

در مطالعه‌ای که سال ۲۰۰۹ انجام شده بود، مشخص شد که آب و هوای نامطلوب در کاهش ظرفیت خدمات، کاهش امنیت سفر و قرارگیری در معرض خطر بیشتر تصادف تأثیر بسزایی دارد بطوری که حدود ۲۸ درصد از همه تصادفات آزادراه‌ها و ۱۹ درصد از تمام مرگ و میر، مرتبط با آب و هوا می‌باشد [Mamhassani et al. 2009] بر اساس این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت به دلیل کاهش ایمنی و وقوع سوانح و تصادفات در شرایط جوی نامطلوب مانند بارندگی، کاهش سرعت و حتی توقف در زمان بروز حوادث وجود خواهد داشت که نتیجه آن کاهش سطح خدمت‌دهی راه خواهد بود. با این حال این پژوهش تنها به اثر آب‌وهوای نامطلوب در تعداد تصادفات بوجود آمده در آزادراه متمرکز شده و در ارتباط با تاثیر آن بر سرعت و ظرفیت آزادراه تحلیلی صورت نگرفته است.

تحقیقات انجام شده توسط جونز[2] و گولسبی[3] نشان می‌دهد که باران سبک تاثیر چندانی بر کاهش سرعت جریان ندارد و سرعت خودروها از خیسی سطح راه تأثیر نمی‌پذیرد تا زمانی که تأثیر آن در رفتار راننده احساس شود و جمع شدگی آب باعث کاهش سرعت شود. در نتیجه در زمان باران سبک، خیسی سطح تأثیری بر جریان ترافیکی ندارد ولی در حالت باران شدید، خیسی سطح راه باعث کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی ظرفیت راه می‌شود [Jones and Goolsby 1970]. همچنین در این تحقیق مشخص شده است که بارش برف سنگین نیز مانند باران شدید تأثیر بسیار زیادی در کاهش سرعت جریان آزاد دارد به طوری که در زمان بارش برف سنگین این کاهش به میزان ۳۰ ٪ و در زمان بارش برف ملایم به میزان ۱۰ ٪ می‌رسد. این تحقیق تغییرات سرعت جریان آزاد و ظرفیت را در زمان بارش باران و برف به طور جداگانه مورد بررسی قرار داده است و مشخص گردید که بارش باران سبک بدلیل عدم تأثیر بر اصطکاک سطح راه نمی‌تواند بر تغییرات سرعت جریان موثر واقع شود و تنها بارش باران زمانی موثر است که باعث کاهش اصطکاک در سطح راه شود.

ابراهیم و هال[4] در سال١٩٩٤ با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به شرایط آب وهوا به این نتیجه رسیدند که بارش باران سبک می‌تواند باعث افت در سرعت جریان آزاد به مقدار حداکثری ۲ کیلومتر بر ساعت شود. در حالی که برای جریان ترافیکی ٢٤٠٠ وسیله نقلیه در ساعت در شرایط بارش باران سبک کاهش سرعت به ۱۳ کیلومتر بر ساعت خواهد رسید. در وضعیت بارش برف ملایم سرعت جریان آزاد به میزان ۳ کیلومتر بر ساعت کاهش می‌یابد که این عدد در حالت اشباع ترافیکی (٢٤٠٠ وسیله نقلیه در ساعت) به مقدار ۸ کیلومتر بر ساعت محاسبه شده است. همچنین سرعت جریان آزاد در وضعیت بارش باران سنگین به میزان ۵ تا ۱۰ کیلومتر بر ساعت و در هنگام بارش برف سنگین به مقدار ۳۸ تا ۵۰ کیلومتر بر ساعت کاهش می‌یابد [Ibrahim and Hall 1994]. نتایج این مطالعه با دسته‌بندی کیفی بارندگی (باران یا برف) به دو حالت (سبک و سنگین) ارزیابی شده‌اند و به تفکیک می‌توان اثرات بارش باران و برف را در کاهش سرعت جریان آزاد مشاهده نمود. البته تفکیک حالت بارش‌ها به صورت کیفی بوده است و در نظر گرفتن بازه عددی برای طبقه‌بندی بارش سبک و سنگین مطلوب‌تر خواهد بود.

در مطالعه‌ای که سال ۲۰۱۲ به‌منظور بررسی تاثیر بارش باران بر تغییرات سرعت جریان آزاد انجام شده است، مشخص شد بارش باران سبک می‌تواند از ۰/۱ تا ۲/۱ درصد سرعت جریان آزاد را کاهش دهد و در شرایط باران متوسط و سنگین به ترتیب ۱/۵ تا ۳/۸ و ٤ تا ٦ درصد کاهش در سرعت جریان آزاد رخ می‌دهد [Tsapakis , Cheng and Bolbol 2013]. بنابراین با افزایش میزان و شدت بارش باران، سرعت جریان آزاد کاهش بیشتری خواهد داشت و تاخیر بوجود آمده ناشی از آن باعث نامطلوب شدن سطح خدمت‌رسانی می‌گردد.این مطالعه نیز تاثیر شدت بارش را درنظر گرفته است.

اسمیت[5] و همکاران در موردتاثیر مقدار بارش باران در ظرفیت آزادراه و سرعت عملیاتی متغییرهای ترافیکی (حجم و زمان که به معنی سرعت و ظرفیت است) و آب و هوا (مقدار بارش باران) مطالعه کردند. این مطالعه با جمع آوری اطلاعات یکساله از یک قسمت از آزادراه انجام گردیده است و در آن بارش باران به دو حالت سبک و شدید دسته بندی شده است که در این دسته بندی باران سبک به بارش ۰/۲۵ تا ٦/۳۵ میلی‌متر در ساعت و باران شدید به بارش بیش از ٦/۳۵ میلی‌متر در ساعت تلقی می‌گردد. این مطالعه نشان داده است که در باران سبک کاهش سرعت جریان آزاد به میزان ٤ تا ۱۰ درصد و در باران شدید کاهش سرعت جریان آزاد به میزان ۲۵ تا ۳۰ درصد خواهد بود [Smith et al. 2004]. این مطالعه با جامع‌تر کردن سطح تحقیقات خود نسبت به دسته بندی شدت بارندگی به صورت یک بازه کمی نتایج دقیق‌تر و قابل تأمل‌تر از مطالعات پیشین را ارائه داده است اما عوامل جوی دیگری مانند بارش برف، مه و یا باد شدید را مورد بررسی قرار نداده است.

راخا[6] در تحقیقات خود اظهار داشته است که تمام پارامترها و روابط مربوط به سرعت جریان آزاد و آب و هوا در آزادراه‌ها بستگی زیادی به مدل راه دارد. ظرفیت راه در شرایط نامساعد آب و هوایی می‌تواند به میزان قابل توجهی کاهش یابد. در دستورالعمل ظرفیت راه‌ها[7] گزارش شده است که در شرایط بارانی ۱۰٪ و در شرایط برفی حدود ۲۰ ٪ کاهش ظرفیت مشاهده می‌شود. دستورالعمل ظرفیت راه ها با استنباط از تمام گزارش‌های مربوط به تأثیر آب و هوا روی سرعت جریان و با تحقیق روی تحلیل رگرسیون اطلاعات آب‌وهوای آفتابی یک معادله درجه دو بدست آورده که بهترین همخوانی را با اطلاعات جریان و ظرفیت دارد، که به تبع آن یک مدل ساده خطی برای سرعت جریان مناسب بدست می‌آید [Rakha et al. 2007].

سیسیوپیکو[8] در تحقیقات خود در سال ۲۰۱۱ با مطالعه بر روی تأثیر بارندگی بر سرعت جریان آزاد در دو بزرگراه شهری در استانبول و با در نظر گرفتن پارامترهایی از قبیل طبقه بندی جاده‌ها (٦ یا ۸ خطه) و حداکثر سرعت مجاز (۹۰ یا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت) و شرایط آب‌وهوایی (آفتابی، بارانی، برفی)و شرایط سطح راه (خشک یا مرطوب یا یخ زدگی) و درصد وسایل نقلیه سنگین به تجزیه و تحلیل پرداخته است. و در نهایت به این نتیجه می‌رسد که باران باعث کاهش ۸ تا ۱۲ درصدی سرعت جریان آزاد و ۷ تا ۸ درصدی ظرفیت می‌شود [Sisiopiku , Akin and Skabardonis 2011].

در مطالعات مورد بررسی این بخش که به تحلیل اثرات وضعیت جوی و آب‌وهوایی بر تغییرات حجم ترافیک، سرعت جریان آزاد و ظرفیت راه‌ها پرداخته شده بود، مشخص شد بارش باران و برف به خصوص بارش با شدت سنگین باعث کاهش سرعت جریان آزاد و ظرفیت آزادراه‌ها می‌شود. مقادیر مختلف درصد کاهش سرعت جریان و ظرفیت به منطقه مورد مطالعه وابستگی دارد.

از آنجا که مطالعه‌ای مشابه در زمینه تاثیر بارندگی بر سرعت جریان آزاد و ظرفیت آزادراه‌ها در ایران یافت نشد، و بنابر پیشنهاد دستورالعمل ظرفیت راه‌ها برای تعیین ضریب کاهندگی بارش در هر منطقه، این مطالعه انجام شد تا به صورت موردی مقدار ضریب کاهندگی بارش و تاثیرات آن بر ظرفیت و سرعت جریان آزاد آزادراه‌های کشور بر اساس داده‌های واقعی

مورد تحقیق و مطالعه قرار گیرد. بنابراین با تعیین میزان درصد کاهش در ایران و با تعمیم آن می‌توان در طراحی آزادراه‌ها استفاده نمود.

با توجه به این موضوع که مشابه‌ترین برازش برای مدل‌سازی منحنی سرعت جریان آزاد–نرخ جریان مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو شناخته شده است با استناد به این موضوع در این مطالعه تحلیل رگرسیون درجه دو مبنای تحلیل‌ها قرار گرفت.

۳. داده‌های تحقیق

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق به دو دسته داده‌های ترافیکی و داده‌های بارندگی دسته‌بندی می‌شوند. از داده‌های مربوط به بارش در محور مورد نظر برای تعیین ساعاتی که بارندگی وجود داشته و داده‌های ترافیکی در آن ساعات ثبت شده است، استفاده می‌گردد و بدین ترتیب داده‌های ترافیکی اعم از سرعت و نرخ جریان ساعات و روزهای آفتابی و بارانی از یکدیگر قابل تفکیک خواهند بود.

داده‌های ترافیکی از بخش تردد شماری بر خط سایت سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای کشور مربوط به آزادراه تهران–قم استخراج گردیده است که این داده‌ها دارای اطلاعاتی از قبیل زمان شروع و پایان ثبت ترددها، مدت زمان کارکرد ترددشمار، سرعت متوسط و تعداد کل وسایل نقلیه عبوری در بازه‌های زمانی یک ساعته می‌باشد.

داده‌های بارندگی از اطلاعات ایستگاه سینوپتیک فرودگاه امام خمینی استخراج گردیده است که این داده‌ها حاوی اطلاعات ساعت ثبت بارندگی و میزان بارش به میلیمتر می‌باشد. ایستگاه سینوپتیک فرودگاه امام خمینی فاصله‌ای نزدیک به ۲۱ کیلومتر از محل نصب سیستم تردد شماری آزادراه تهران–قم دارد.

٤. روش تحقیق

روش تحقیق به کار رفته در این پژوهش به صورت تحلیلی و توصیفی می‌باشد. مراحل گام به گام انجام این پژوهش شامل تعیین مکان مورد مطالعه، جمع‌آوری داده‌های ترافیکی و بارندگی مربوط به منطقه مورد مطالعه، تحلیل داده‌ها و در نهایت تعیین میزان تغییرات سرعت جریان آزاد و ظرفیت آزادراه در شرایط جوی بارندگی می‌باشد.

آزادراه تهران–قم به عنوان یکی از راه‌های مهم کشور که اطلاعات ترافیکی و بارندگی آن ثبت شده و در دسترس می‌باشند به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید.

پس از تعیین مکان مورد مطالعه، داده‌های ترافیکی ثبت شده مربوط به تردد شمارهای بر خط آزادراه تهران–قم و آمار بارندگی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه امام خمینی که در فاصله ۱۹ کیلومتری دستگاه تردد شمار سازمان راهداری قرار دارد جمع‌آوری گردید. داده‌های ترافیکی مورد استفاده مربوط به شش ماه از سال ۹۱ از تاریخ ۹۱/۷/۱ الی ۹۱/۱۲/۳۰ و مجموعا شامل ۳۹٤۲ ساعت تردد وسایل نقلیه و بصورت ساعتی می‌باشد که با توجه به بازه زمانی مورد مطالعه، داده‌های مربوط به این مدت زمان جامع، قابل دسترس و قابل تحلیل بودند. همچنین اطلاعات آب و هوایی نیز در همین محدوده زمانی و شامل ٦۱۰ داده ثبت شده میزان بارندگی در بازه‌های ٦ ساعته می‌باشد.

پیش از فرایند تجزیه و تحلیل، اصلاحاتی روی داده‌های ترافیکی انجام شد. همانطور که در نمودارهای سرعت–چگالی مشخص شده است، در نقطه‌ای اوج نمودار با افزایش نرخ جریان ترافیکی، سرعت جریان شروع به کاهش می‌کند تا جایی که در صورتی که مقدار نرخ جریان به حداکثر ظرفیت مقطع برسد، تردد متوقف شده و وسایل‌نقلیه ساکن شده و سرعت به صفر می‌رسد. به عبارتی در محدوده بازگشت نمودار وضعیت تراکم رخ می‌دهد. پس از بررسی روی داده‌های تردد ثبت شده، مشخص گردید در بازه‌های زمانی یک ساعته که سرعت میانگین وسایل‌نقلیه عبوری در آن از ۷۰ کیلومتر بر ساعت کمتر می‌باشد، مقطع آزادراه در شرایطی قرار می‌گیرد که با افزایش نرخ جریان، سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین بازه‌هایی

که سرعت متوسط عبوری آن‌ها کمتر از ۷۰ کیلومتر بر ساعت ثبت شده بودند، از میان داده‌ها حذف شدند. بدین ترتیب سرعت‌های متوسط عبوری در هربازه مربوط به شرایط پایه جریان آزاد خواهد بود.

در بررسی ترددهای ثبت شده، مشخص گردید در برخی از بازه‌های یک ساعته، مدت زمان کارکرد تردد شمار کمتر از یک ساعت (٦٠ دقیقه) می‌باشد و به علت نقص یا بوجود آمدن مشکلات دیگری ترددها به طور کامل در بازه ٦٠ دقیقه‌ای ثبت نشده‌اند. بدین منظور برای کاستن خطای بوجود آمده، تعداد کل وسایل‌نقلیه ثبت شده در بازه‌های ٦٠ دقیقه‌ای که در کمتر از این مدت زمان ثبت شده‌اند با میانگین‌گیری تعمیم داده شدند. همچنین با توجه به سه خطه بودن آزادراه تهران–قم مقادیر ترددهای ساعتی به تعداد خط تقسیم شدند و نرخ جریان عبوری با واحد وسیله‌نقلیه بر خط بر ساعت حاصل گردد.

پس از آن بر اساس داده‌های مربوط به آمار بارندگی، داده‌های ترافیکی اصلاح شده روزهای بارانی و غیربارانی از یکدیگر تفکیک شدند. روزهایی با بارندگی کمتر از۰/۱ میلیمتر در روز به علت تاثیر ناچیز بر مشخصات ترافیکی عبوری و سرعت جریان به عنوان روزهای غیر بارانی فرض شده‌اند.

به منظور بررسی و تجزیه و تحلیل داده‌های ترافیکی و تعیین اثرات بارندگی بر ظرفیت و سرعت جریان آزاد و همچنین مقایسه داده‌ها در روزهای بارانی و غیربارانی از روش‌ها و آزمون‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب[9] استفاده شده است.

برای تعیین رابطه بین سرعت جریان آزاد و نرخ جریان از مدل رگرسیون چند جمله‌ای استفاده شده است. معادله رگرسیون چندجمله‌ای درجه k مطابق با رابطه (۱) می‌باشد. x_iها در این مدل نشان‌دهنده داده‌های مورد نظر برای تجزیه و تحلیل می‌باشد. برای برآورد ضرایب معادله (a_i) از رویکرد حداقل مربعات خطا استفاده شده است. در این روش تلاش می‌شود که تابع درجه دوم از خطا بین برآورد داده‌ها و مقادیر واقعی کمینه گردد (روابط (۲) تا (٤)) [Bates and Watts 1998]. مدل رگرسیون مورد استفاده در این تحقیق از نوع رگرسیون درجه ۲ می‌باشد (رابطه ٥). در این مدل متغیر x نرخ جریان عبوری با واحد وسیله‌نقلیه بر خط بر ساعت و متغیر y سرعت جریان آزاد با واحد کیلومتر بر ساعت می‌باشد.

$$y = a_0 + a_1 x + \cdots + a_k x^k \quad (۱)$$

$$R^2 = \sum_{i=1}^{n} [y_i - (a_0 + a_1 x + \cdots + a_k x^k)]^2 \quad (۲)$$

$$\frac{\partial (R^2}{\partial a_k} = -2 \sum_{i=1}^{n} [y_i - (a_0 + a_1 x + \cdots + a_k x^k)]^2 x^k = 0 \quad (۳)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^{n} x_i^k + a_1 \sum_{i=1}^{n} x_i^{k+1} + \cdots + a_k \sum_{i=1}^{n} x_i^{2k} = \sum_{i=1}^{n} x_i^k y_i \quad (٤)$$

$$y = ax^2 + bx + c \quad (٥)$$

با تعیین مدل رگرسیون درجه دو برای داده‌های ثبت شده به تفکیک در روزهای بارانی و آفتابی، نمودار سرعت جریان آزاد–نرخ جریان مربوط به این آزادراه رسم شده و در نهایت با نمودارهای مربوطه که در دستورالعمل ظرفیت راه‌ها ارایه شده است مقایسه گردید.

به منظور اعتبار سنجی داده‌ها و مقایسه سرعت جریان آزاد در روزهای بارانی و روزهای غیر بارانی از آزمون‌های آماری استفاده شده است.

برای تعیین نرمال بودن داده‌های سرعت ثبت شده از روش‌های عددی شامل بررسی اعداد کشیدگی[10] و چولگی[11]، مقایسه مقادیر میانگین و میانه داده‌ها و همچنین از آزمون آماری کلموگروف–اسمیرنوف[12] استفاده شده است. ضریب کشیدگی و چولگی دو شاخص اساسی توزیع داده‌ها می‌باشند.در حالت کلی چنانچه مقادیر این ضرایب در بازه (۲ و ۲–) قرارگیرند، داده‌ها از توزیع نرمال برخوردارند. همچنین اگر مقادیر میانگین، مد و میانه داده‌ها تقریبا یکسان باشند، می‌توان انتظار داشت که

داده‌ها به صورت متقارن حول مرکز پراکنده شده‌اند و توزیعی نرمال دارند.

به منظور تعیین دقیق‌تر توزیع داده‌ها از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف استفاده می‌شود. فرضیه صفر در این آزمون نرمال بودن داده‌های مورد بررسی و فرضیه جایگزین نرمال نبودن داده‌ها می‌باشد. درصورتی که مقادیر P-Value از مقدار سطح معناداری α=۰/۰۵ بزرگتر باشد، فرضیه صفر پذیرفته شده و داده‌ها از توزیع نرمال برخوردارند [Miller and Johnson 1985].

برای بررسی معناداری تفاوت سرعت میانگین داده‌ها در روزهای بارانی و آفتابی و با توجه به نرمال بودن توزیع داده‌ها (پیش فرض استفاده از آزمون تی) از آزمون آماری تی[13] استفاده شده است. فرضیه صفر در نظر گرفته شده برای این آزمون عدم اختلاف میانگین سرعت خودروها در روزهای بارانی با میانگین سرعت خودروها در روزهای غیر بارانی می‌باشد. و فرضیه جایگزین در نظر گرفته شده وجود اختلاف میان این مقادیر سرعت‌ها می‌باشد. درصورتی که مقادیر P-Value از مقدار سطح معناداری α=۰/۰۵ بزرگتر باشد، فرضیه صفر پذیرفته خواهد شد که به معنای عدم اختلاف میان میانگین سرعت خودروها در روزهای بارانی و غیر بارانی می‌باشد

جدول **۱** ارایه شده است. مقادیر کشیدگی و چولگی هردو گروه داده‌های سرعت در بازه (۲و۲-) قرار دارد. همچنین

با توجه به این‌که مقدار آماره و درجه آزادی آزمون تی به برابری یا نابرابری واریانس‌های متغیر مورد مطالعه در دو گروه بستگی دارد، لازم است برابری واریانس‌ها نیز به موازات آزمون تی صورت پذیرد. با توجه به دسترس نبودن واریانس جامعه، از واریانس نمونه و از آزمون‌های F و لون[14] استفاده شده است. فرضیه صفر در نظر گرفته شده در این آزمون‌ها برابری واریانس داده‌های سرعت در روزهای بارانی و غیر بارانی می‌باشد و فرضیه جایگزین عدم یکسان بودن واریانس این دو گروه داده می‌باشد. درصورتی که مقادیر P-Value از مقدار سطح معناداری α=۰/۰۵ بزرگتر باشد، فرضیه صفر پذیرفته شده و واریانس داده‌های سرعت در روزهای بارانی با واریانس داده‌های سرعت در روزهای غیربارانی برابر است.

۵. نتایج مدلسازی

در این بخش از مطالعه ابتدا نتایج آزمون‌های آماری که برای اعتبارسنجی داده‌های مورد استفاده به‌کار برده شده است، ارایه شده و پس از آن مدل رگرسیون درجه دو مربوط به سرعت جریان آزاد مشخص و منحنی‌های مربوطه برای دو حالت روزهای با بارندگی و بدون بارندگی تحلیل می‌گردند.

نتایج مربوط به بررسی شاخص‌های مورد ارزیابی برای تعیین توزیع داده‌های سرعت در هر دو وضعیت بارانی و غیربارانی (آفتابی) در

مقادیر میانگین و میانه در هر دو گروه داده سرعت تقریبا یکسان می‌باشد و نشان‌دهنده توزیع متقارن داده‌ها می‌باشد.

جدول ۱. نتایج آزمون‌های بررسی نرمال بودن توزیع داده‌های سرعت در روزهای بارانی و غیر بارانی

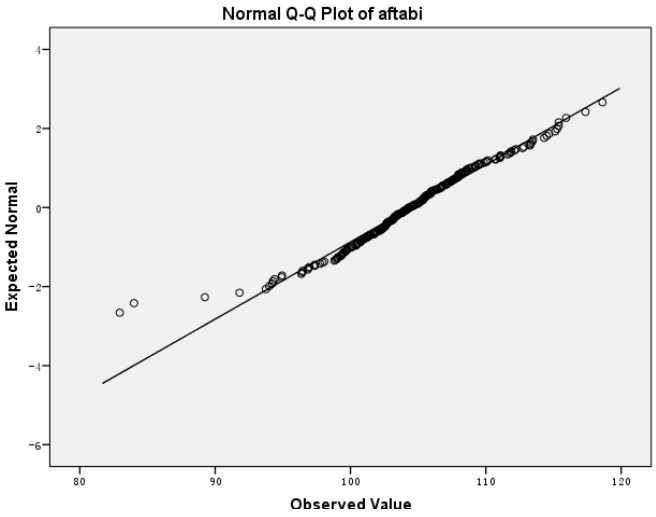
عنوان	چولگی	کشیدگی	میانگین	میانه	آماره آزمون	P-Value
سرعت وسایل‌نقلیه در آب‌وهوای بارانی	-۰/۳۳۱	-۰/۰۹۹	۱۰۱/۰۹٤	۱۰۱/٦٥٤	۰/۰۳۸	۰/۲
سرعت وسایل‌نقلیه در آب‌وهوای غیر بارانی	-۰/۳۸٤	۱/۹۱۱	۱۰٤/٤٥٥	۱۰٤/۳۳۷۷	۰/۰۵۱	۰/۲

همانطور که در

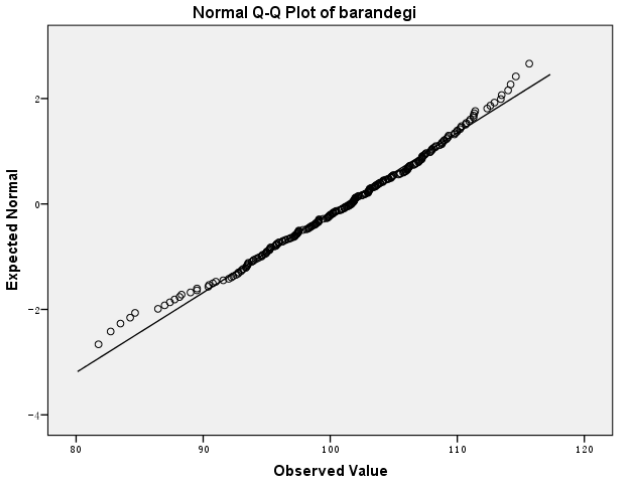
جدول **۱** مشاهده می‌شود، مقادیر P-Value آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در هر دو گروه داده‌های سرعت در آب‌وهوای بارانی و غیربارانی از مقدار سطح معناداری α=۰/۰۵ بزرگتر می‌باشد و به معنای پذیرفته شدن فرضیه صفر است و

با اطمینان ۹۵ ٪ می‌توان نتیجه گرفت که میان فراوانی‌های مشاهده شده و مورد انتظار تفاوتی وجود ندارد و به عبارت دیگر توزیع داده‌های سرعت نرمال می‌باشد. با نرمال بودن توزیع داده‌های تصادفی، میانگین توزیع همان میانگین جامعه است و تعمیم نتایج از این داده‌ها به جامعه صحیح می‌باشد.

همانطور که در نمودارهای Q_Q رسم شده برای داده‌های سرعت در هر دو گروه (شکل ۲و شکل ۳) مشاهده می‌شود، نقاط که نماینده داده‌ها هستند به خط معیار نرمال نزدیک می‌باشند و بیان‌گر توزیع نرمال داده است.



شکل ۲. نمودار Q-Q مربوط به داده‌های سرعت در روزهای آفتابی



شکل ۳. نمودار Q-Q مربوط به داده‌های سرعت در روزهای بارانی

نتایج آزمون‌های F و لون به منظور بررسی برابر واریانس‌های سرعت در روزهای بارانی و غیربارانی در جدول ۲ ارایه شده است. همانطور که نتایج هر دو آزمون نشان می‌دهد مقدارP-Value برابر صفر می‌باشد و از مقدار سطح معناداری α=۰/۰۵ کوچکتر است. بنابراین فرضیه جایگزین پذیرفته می‌شود و به معنای عدم برابری واریانس‌های سرعت خودروها در روزهای بارانی و غیربارانی می‌باشد و اختلاف معنی‌داری در مقدار واریانس سرعت خودروها در روزهای

بارانی و غیر بارانی وجود دارد و مقادیر انحراف معیار استاندارد سرعت در روزهای بارانی و غیربارانی به ترتیب ۹/٤٦ و ٦/۰۸ می‌باشد.

جدول ۲. نتایج آزمون‌های بررسی برابری واریانس داده‌های سرعت در روزهای بارانی و غیر بارانی

عنوان	انحراف معیار استاندارد	حد بالا و پایین انحراف اااستاندارد	آماره F	آماره Levene	P-Value برای هر دو آزمون
سرعت وسایل‌نقلیه در آب‌وهوای بارانی	۹/٤٦۱۱۱	(۸/۷٤۸۲۲-۱۰/۲۹٥٤)	۲/٤۲	٤۹/۳۷	۰
سرعت وسایل‌نقلیه در آب‌وهوای غیر بارانی	٦/۰۷٦٥۱	(٥/۹۱۹۱٥-٦/۲٤۲۲)			

با درنظر گرفتن پیروی از توزیع نرمال و نابرابری واریانس‌های دو گروه داده سرعت در روزهای بارانی و غیربارانی، آزمون تی برای بررسی معناداری تفاوت سرعت میانگین داده‌ها در جدول ۳ ارایه شده است. همانطور که نتایج آزمون تی نشان می‌دهد مقدار P-Value برابر صفر می‌باشد و از مقدار سطح معناداری α=۰/۰٥ کوچکتر است. بنابراین فرضیه صفر رد و فرضیه جایگزین پذیرفته می‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که با احتمال ۹٥ ٪ بین میانگین سرعت خودروها در روزهای بارانی و میانگین سرعت خودروها در روزهای غیر بارانی از نظر آماری تفاوت معناداری وجود دارد و موید تاثیر بارندگی در تغییرات سرعت خودروها می‌باشد. میانگین سرعت خودروها در آب‌وهوای بارانی و غیر بارانی به ترتیب ۱۰۱/۰۹ و ۱۰٤/٤٥ کیلومتر بر ساعت می‌باشد و مقدار میانگین سرعت خودروها در روزهای غیربارانی بیش از روزهای بارانی است و این نتایج مطابق با نتایج تحقیقات گذشته می‌باشد.

روزهای بارانی و آفتابی استفاده شد. نتایج خروجی مربوط به این آزمون در

جدول ۳. نتایج آزمون t برای بررسی میانگین داده‌های سرعت در روزهای بارانی و غیر بارانی

عنوان	میانگین داده‌ها	انحراف معیار استاندارد	فاصله اطمینان ۹٥ ٪	P-Value	آماره T
سرعت وسایل‌نقلیه در آب‌وهوای بارانی	۱۰۱/۰۹	۹/٤٦	(-٤/٤۷٤ تا -۲/٥۲۷)	۰	-۷/۰۷
سرعت وسایل‌نقلیه در آب‌وهوای غیر بارانی	۱۰٤/٤٥	٦/۰۸			

مدل رگرسیون برآورد شده برای متغیر سرعت جریان آزاد و نرخ جریان ترافیکی (x و y) و ضریب رگرسیون متناظر با شرایط جوی بارندگی مطابق با رابطه (٦) و (۷) می‌باشد.

$$y = -0.00001x^2 + 0.0102x + 99.73 \quad (٦)$$

$$R^2 = 0.0387 \quad (۷)$$

معنی داری ضرایب مدل برآورد شده بوسیله نرم افزار STATA بررسی گردید و خروجی آن بصورت جدول ٤ آمده است.

جدول ٤. اطلاعات مربوط به معناداری ضرایب مدل رابطه (٦)

Source	SS	df	MS		Number of obs =	257
					F(2, 254) =	5.11
Model	446.63034	2	223.31517		Prob > F =	0.0067
Residual	11095.9561	254	43.6848665		R-squared =	0.0387
					Adj R-squared =	0.0311
Total	11542.5864	256	45.0882283		Root MSE =	6.6095

Y	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
X	.0102153	.0050168	2.04	0.043	.0003355	.0200951
X2	-.000011	4.22e-06	-2.62	0.009	-.0000194	-2.74e-06
_cons	99.73129	1.242883	80.24	0.000	97.28362	102.179

همانطور که در جدول ٤ مشاهده می شود با توجه به اینکه P-Value ضرایب معادله کمتر از ۰/۰۵ است، ضرایب معادله در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار می باشند.

پالایش اطلاعات مطابق آنچه که در روش تحقیق بیان شد انجام گرفته و داده های با سرعت کمتر از ۷۰ کیلومتر بر ساعت حذف گردیده است. سپس با مرتب کردن اطلاعات براساس نرخ جریان (از کم به سمت نرخ جریان بیشتر) و تشکیل محدوده های نرخ جریان بصورت جدول ۵ اقدام به میانگین گیری از سرعت جریان و نرخ جریان گردید و سرعت جریان میانگین متناظر با هر محدوده نرخ جریان مطابق جدول ۵ می باشد.

جدول ۵. متوسط سرعت جریان آزاد و نرخ جریان در شرایط جوی بارندگی

محدوده نرخ جریان	میانگین نرخ جریان (X)	میانگین سرعت جریان (Y)
۲۰۰ – ۰	۱۲۱	۱۰۲/۲۷
٤۰۰ – ۲۰۰	۲۸۸	۱۰۰/۷۸
٦۰۰ – ٤۰۰	٤۸۷	۱۰۱/۷۳
۸۰۰ – ٦۰۰	٦۹۹	۱۰۱/٦۷
۱۰۰۰ – ۸۰۰	۸۹٤	۱۰۰/۰۱
۱۲۰۰ – ۱۰۰۰	۱۰۷۹	۹۸/۱۳
۱٤۰۰ – ۱۲۰۰	۱۳٦۱	۹۰/۲٤

مدل رگرسیون برآورد شده برای متغیر میانگین سرعت جریان آزاد و متوسط نرخ جریان ترافیکی (x و y) و ضریب رگرسیون متناظر با شرایط جوی بارندگی مطابق با رابطه (۸) و (۹) می‌باشد.

$$y = -0.00001x^2 + 0.0121x + 99.78 \quad (۸)$$

$$R^2 = 0.9449 \quad (۹)$$

معنی داری ضرایب مدل برآورد شده بوسیله نرم افزار STATA بررسی گردید و خروجی آن بصورت جدول ٦ آمده است.

جدول ٦. اطلاعات مربوط به معناداری ضرایب مدل رابطه (۸)

Source	SS	df	MS
Model	100.643941	2	50.3219706
Residual	5.8687834	4	1.46719585
Total	106.512725	6	17.7521208

Number of obs	7
F(2, 4)	34.30
Prob > F	0.0030
R-squared	0.9449
Adj R-squared	0.9174
Root MSE	1.2113

Y	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
X	.0120837	.0046107	2.62	0.059	-.0007177	.0248852
X2	-.0000136	3.06e-06	-4.45	0.011	-.0000221	-5.13e-06
_cons	99.78047	1.445541	69.03	0.000	95.767	103.7939

همانطور که در جدول ٦ مشاهده می شود با توجه به اینکه P-Value ضرایب معادله کمتر از ۰/۰۵ است، ضرایب معادله در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار می باشند. و تنها ضریب X دارای P-Value بزرگتر از ۰/۰۵ بدست آمده و با توجه آنکه فقط

۰/۰۰۹ بیشتر است مطمئناً در سطح اطمینان کمی کمتر از ۹۵٪ معنی دار می باشد.

با توجه به مقدار ضریب رگرسیون مشخص می‌شود که متغیر نرخ جریان عبوری در شرایط آب وهوای بارانی می‌تواند ۹٤/٤۹ درصد از تغییرات متغیر سرعت جریان آزاد را تبیین کند که در واقع مقدار چشم‌گیری می‌باشد.

مدل رگرسیون برآورد شده برای متغیر سرعت جریان آزاد و نرخ جریان ترافیکی (x و y) و ضریب رگرسیون متناظر با شرایط جوی بدون بارندگی و آفتابی مطابق با رابطه (۱۰) و (۱۱) می‌باشد.

$$y = -0.00001x^2 + 0.0136x + 102.0 \quad (۱۰)$$

$$R^2 = 0.1235 \quad (۱۱)$$

معنی داری ضرایب مدل برآورد شده بوسیله نرم افزار STATA بررسی گردید و خروجی آن بصورت جدول ۷ آمده است.

جدول ۷. اطلاعات مربوط به معناداری ضرایب مدل رابطه (۱۰)

Source	SS	df	MS
Model	12147.5718	2	6073.78591
Residual	86198.2536	3533	24.3980339
Total	98345.8254	3535	27.8206012

Number of obs =	3536
F(2, 3533) =	248.95
Prob > F =	0.0000
R-squared =	0.1235
Adj R-squared =	0.1230
Root MSE =	4.9394

Y	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
X	.0135526	.0009899	13.69	0.000	.0116117	.0154935
X2	-.0000133	7.38e-07	-18.03	0.000	-.0000147	-.0000119
_cons	101.9998	.2943693	346.50	0.000	101.4227	102.577

همانطور که در جدول ۷ مشاهده می شود با توجه به اینکه P-Value ضرایب معادله کمتر از ۰/۰۵ است، ضرایب معادله در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار می باشند.

پالایش اطلاعات مطابق آنچه که در روش تحقیق بیان شد انجام گرفته و داده های با سرعت کمتر از ۷۰ کیلومتر بر ساعت حذف گردیده است. سپس با مرتب کردن اطلاعات براساس نرخ جریان (از کم به سمت نرخ جریان بیشتر) و تشکیل محدوده های نرخ جریان بصورت جدول ۸ اقدام به میانگین گیری از سرعت جریان و نرخ جریان گردید و سرعت جریان میانگین متناظر با هر محدوده نرخ جریان مطابق جدول ۸ می باشد.

جدول ۸ متوسط سرعت جریان آزاد و نرخ جریان در شرایط جوی بدون بارندگی

محدوده نرخ جریان	میانه محدوده (X)	میانگین سرعت جریان (Y)
۰ – ۲۰۰	۱٤۸	۱۰٤/٦۹
۲۰۰ – ٤۰۰	۵۸۷	۱۰٤/۳۷
٤۰۰ – ٦۰۰	٤۹٦	۱۰٤/۹۱
٦۰۰ – ۸۰۰	۷۰۲	۱۰۵/٤٦
۸۰۰ – ۱۰۰۰	۹۷۷	۱۰۲/۱۲
۱۰۰۰ – ۱۲۰۰	۱۰۷۹	۹۹/۹٦
۱۲۰۰ – ۱٤۰۰	۱۲۷۲	۹۷/۸٦
۱٤۰۰ – ۱٦۰۰	۱٤۷٦	۹٤/۰۱
۱٦۰۰ – ۱۸۰۰	۱٦۵۰	۸۸/۲۸
۱۸۰۰ – ۲۰۰۰	۱۸۲۹	۸۰/۲۷

مدل رگرسیون برآورد شده برای متغیر میانگین سرعت جریان آزاد و متوسط نرخ جریان ترافیکی (x و y) و ضریب رگرسیون متناظر با شرایط جوی بارندگی مطابق با رابطه (۱۲) و (۱۳) می‌باشد.

$$y = -0.00001x^2 + 0.0106x + 102.89 \quad (۱۲)$$

$$R^2 = 0.9888 \quad (۱۳)$$

معنی داری ضرایب مدل برآورد شده بوسیله نرم افزار STATA بررسی گردید و خروجی آن بصورت جدول ۹ آمده است.

جدول ۹. اطلاعات مربوط به معناداری ضرایب مدل رابطه (۱۲)

Source	SS	df	MS
Model	273.720337	2	136.860169
Residual	3.09489972	6	.515816621
Total	276.815237	8	34.6019046

Number of obs	= 9
F(2, 6)	= 265.33
Prob > F	= 0.0000
R-squared	= 0.9888
Adj R-squared	= 0.9851
Root MSE	= .7182

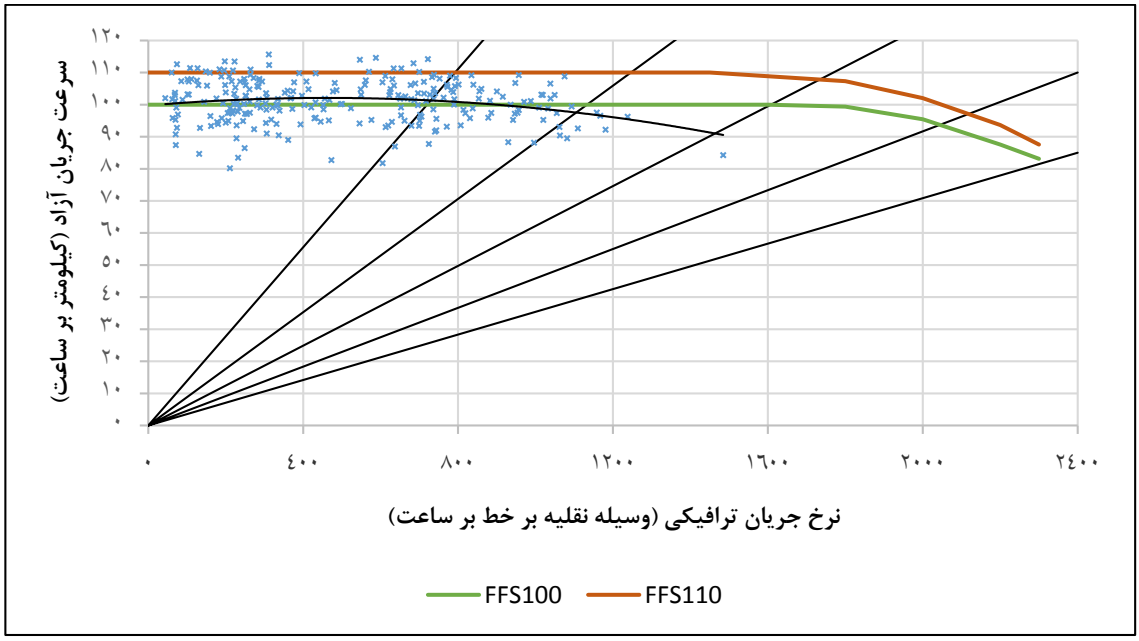
Y	Coef.	Std. Err.	t	P>|t|	[95% Conf.	Interval]
X	.0105608	.0020984	5.03	0.002	.0054262	.0156953
X2	-.0000116	1.15e-06	-10.07	0.000	-.0000144	-8.77e-06
_cons	102.8934	.7959128	129.28	0.000	100.9459	104.8409

همانطور که در جدول ۹ مشاهده می شود با توجه به اینکه P-Value ضرایب معادله کمتر از ۰/۰۵ است، ضرایب معادله در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی دار می باشند.

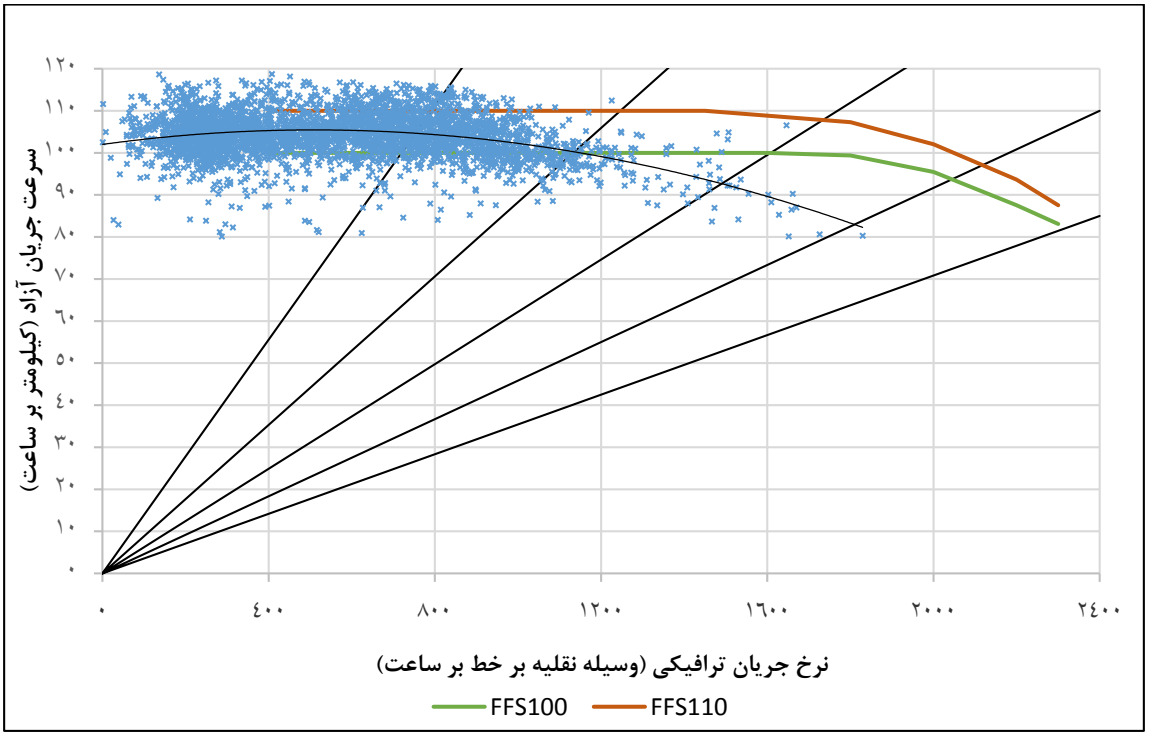
در شرایط جوی غیر بارانی و آفتابی نیز متغیر نرخ جریان عبوری می‌تواند ۹۸/۸۸ درصد از تغییرات متغیر سرعت جریان آزاد را تبیین کند که مقدار قابل توجهی می‌باشد.

منحنی‌های سرعت جریان آزاد–نرخ جریان ترافیکی برای دو وضعیت آب‌وهوای بارانی و غیر بارانی (آفتابی) متناظر با مدل‌های رگرسیون برازش شده مطابق با شکل ٤ و شکل ٥ رسم شده‌اند. و همچنین منحنی های میانگین سرعت جریان آزاد – متوسط نرخ جریان ترافیکی برای دو وضعیت آب‌وهوای بارانی و غیر بارانی (آفتابی) متناظر با مدل‌های رگرسیون برازش شده مطابق با شکل ٦ رسم شده است. بنابر انتظار منحنی مربوط به آب‌وهوای آفتابی بالاتر از منحنی مربوط به آب‌وهوای بارانی قرار گرفته است و اختلاف میان منحنی‌ها نشان‌دهنده تاثیرات بارندگی بر سرعت جریان آزاد، ظرفیت و سطح سرویس‌دهی می‌باشد. به‌طوری که درصورت شرایط جوی بارندگی، ظرفیت و سرعت جریان آزاد مقطع یکسان کاهش می‌یابد و می‌بایست ضرایب آن تعیین و در طراحی آزادراه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به این‌که منحنی‌های مربوط به روزهای آفتابی و بارانی به ترتیب از مقدار سرعت جریان آزاد ۱۰۵ و ۱۰۲ کیلومتر بر ساعت شروع شده‌اند، منحنی‌های پیشنهادی دستورالعمل ایمنی راه‌ها مربوط به سرعت‌های ۱۰۰ و ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت که محدوده بالا و پایین مقادیر سرعت منحنی‌های روزهای بارانی و آفتابی را پوشش می‌دهد در این نمودار رسم شده‌اند. انتظار می‌رود که منحنی‌های برازش شده از این دو منحنی پیروی کند. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود از محدوده سطح سرویس ۳ به بعد از منحنی‌ها پیروی نمی‌کند. علت‌یابی این موضوع با بررسی‌های داده‌های بیشتر می‌تواند به عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی مطرح گردد.



شکل ٤. منحنی سرعت جریان آزاد–نرخ جریان در وضعیت آب‌وهوای بارانی



شکل ۵. منحنی سرعت جریان آزاد–نرخ جریان در وضعیت آب‌وهوای آفتابی

شکل ٦. منحنی میانگین سرعت جریان آزاد–نرخ جریان در دو وضعیت آب‌وهوای بارانی و آفتابی

٦. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر بارندگی بر وضعیت سرعت جریان آزاد و ظرفیت در آزاد راه‌ها پرداخته شد. ابتدا با توجه به تجزیه و تحلیل تحقیقات پیشین این نتیجه استنباط گردید که تأثیر بارندگی بر سرعت جریان آزاد و ظرفیت در مناطق مختلف دنیا متفاوت بوده است و به منطقه جغرافیایی هر منطقه و میزان و شدت بارندگی و تعداد روزهای بارندگی در آن منطقه وابسته است. همچنین در مطالعات پیشین مشخص شد که نرخ جریان تردد وسایل نقلیه در میزان کاهش سرعت اثر بخش بوده است و بارندگی بر کاهش ظرفیت راه‌ها نیز تاثیر می‌گذارد.

سپس با استفاده از استنتاج نتایج آماری تردد وسایل نقلیه و وضعیت جوی آزادراه تهران– قم در طی ٦ ماه پایانی سال ۹۱، داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تجزیه و تحلیل آماری مورد استفاده در این تحقیق اعتبار سنجی داده‌های سرعت از طریق آزمون‌های آماری کلموگروف–اسمیرنوف، آزمون T و آزمون‌های F و لون و برازش یک مدل رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو برای متغیرهای سرعت جریان آزاد و نرخ جریان می‌باشد. نتیجه برازش رگرسیون درجه دو اختلاف میان منحنی سرعت–جریان در شرایط بارانی و غیربارانی را نشان داد که نشان‌دهنده تاثیر بارندگی در کاهش ظرفیت و سرعت جریان آزاد آزادراه می‌باشد.

با مقایسه دو مدل رگرسیون برآورد شده سرعت جریان در روزهای بارانی و غیر بارانی در محدوده مرزی هر سطح سرویس میزان کاهش نرخ جریان بدست می‌آید که این مقدار، میزان کاهش ظرفیت در آن سطح سرویس مشخص را تعیین می‌کند. نتایج بدست آمده مربوط به آزادراه تهران–قم بصورت زیر می‌باشند.

- کاهش ظرفیت در سطح کیفیت ترافیک (۱)[۱۵] به میزان ۳/۵ درصد می‌باشد؛
- کاهش ظرفیت در سطح کیفیت ترافیک (۲) [۱۶] به میزان ۵/۳ درصد می‌باشد؛
- کاهش ظرفیت در سطح کیفیت ترافیک (۳) [۱۷] به میزان ٦/۰ درصد می‌باشد؛
- کاهش ظرفیت در سطح کیفیت ترافیک (٤) [۱۸] به میزان ۷/٦ درصد می‌باشد؛

- کاهش ظرفیت در سطح کیفیت ترافیک (۵) [19] به میزان ۸/۹ درصد می‌باشد.

با توجه به این مقادیر، بارش باران در آزادراه تهران–قم ۳/۵ تا ۸/۹ درصد ظرفیت آزادراه را کاهش می‌دهد که به طور متوسط ٦/٢٦ درصد کاهش در ظرفیت را نشان می‌دهد. در مطالعات جونز و گولسبی ، راخا و سیسیوپیکو به ترتیب مقادیردرصد کاهش ظرفیت ۱۰ تا ۱۵ درصد، ۱۰ درصد و ۷ تا ۸ درصد تعیین شده بود که مقادیر متغیری بوده و متناسب وضعیت جوی منطقه مورد مطالعه می‌باشد که مقادیر مربوط به مطالعه سیسیوپیکو به مقدار بدست آمده در این مطالعه نزدیک‌تر است. همچنین با در نظر گرفتن مدل‌های رگرسیون برازش شده در دو حالت آب‌وهوای بارانی و آفتابی، مقادیر کاهش سرعت جریان آزاد در هر نرخ جریان مشخص مطابق با جدول ۱۰ می‌باشد.

جدول ۱۰. نتایج کاهش سرعت جریان آزاد در نرخ جریان مشخص مربوط به آزادراه تهران–قم

جریان (وسیله‌نقلیه بر خط بر ساعت)	۰	۱۲۰۰	۱٦۰۰
سرعت در ساعات بدون بارندگی (کیلومتر بر ساعت)	۱۰۳/۳٦	۹۸/۹٦	۹۰/۷۸
سرعت در ساعات با بارندگی(کیلومتر بر ساعت)	۹۹/۵۱	۹۳/۳۱	۸۱/۸۳
میزان کاهش سرعت	٪ ۳/۷	٪ ۵/۷	٪ ۹/۹

بدین ترتیب در نرخ جریان‌های ۰، ۱۲۰۰ و ۱٦۰۰ وسیله نقلیه در هر ساعت در هر خط به ترتیب سرعت جریان آزاد ۳/۷، ۵/۷ و ۹/۹ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش تردد و نرخ جریان در آزادراه، درصد کاهش سرعت جریان آزاد نیز بیشتر می‌شود. همچنین با برون یابی دو منحنی در شرایط بارانی و غیر بارانی می‌توان انتظار این نتیجه را داشت که کاهش سرعت در نرخ جریان ۲٤۰۰ وسیله نقلیه در ساعت بر خط به میزان ۳۱ درصد می‌باشد. بنابراین درصد کاهش سرعت جریان آزاد در آزادراه تهران قم ۳/۷ تا ۳۱ درصد می‌باشد که به طور متوسط ۱۲/٦ درصد کاهش در سرعت جریان آزاد مشاهده گردید.

در مطالعه راخا کاهش سرعت در اثر بارندگی تا ۱۰ درصد تعیین شده است، در مطالعه سیسیوپیکو ۸ تا ۱۲ درصد کاهش و در مطالعه سپاکیز[20] برای باران سبک، متوسط و سنگین به ترتیب ۰/۱ تا ۲/۱، ۱/۵ تا ۳/۸ و ٤ تا ٦ درصد کاهش در سرعت جریان آزاد تعیین شده بود که تفاوت در این مقادیر به دلیل تفاوت منطقه جغرافیایی می‌باشد. بازه ۳/۷ تا ۹/۹ درصد کاهش بدست آمده در این مطالعه شامل شدت بارش باران سبک، سنگین و متوسط می‌باشد که از یکدیگر تفکیک نشده‌اند و مقادیر بدست آمده در این مطالعه به نتایج بدست آمده در مطالعات پیشین بسیار نزدیک بوده و اختلاف جزئی میان آنها را می توان به دلیل تفاوت منطقه جغرافیای توجیه نمود.

با تعیین ضرایب کاهش سرعت جریان آزاد (۳/۷ تا ۹/۹ درصد) و ظرفیت (۳/۵ تا ۸/۹ درصد) در زمان بارش باران مربوط به آزادراه تهران–قم و با تعمیم این ضرایب به آزادراه‌های ایران، می‌توان مقادیر ظرفیت و سرعت جریان آزاد آزادراه‌هایی که سی‌امین ساعت اوج سال آن‌ها در روزها بارانی قرار دارد، با استفاده از این ضرایب تصحیح نمود.

به منظور تعیین دقیق‌تر مقدار این ضرایب کاهندگی و تعمیم آن به کلیه آزادراه‌های کشور پیشنهاد می‌گردد این فرایند در چند آزادراه دیگر هم به عنوان مطالعه موردی انجام شود و با میانگین‌گیری یا منطقه‌بندی مربوط به هر مورد مطالعه، ضریب کاهندگی کشور تعیین شود. همچنین با تفکیک وضعیت بارندگی به بارش‌های برف و باران و تفکیک از لحاظ شدت بارش، می‌توان به نتایج دقیق‌تری دست یافت.

۷. سپاسگذاری

از مساعدت‌های فراوان جناب آقای مهندس هزارسی که در تهیه داده‌های بارندگی همکاری فراوانی نموده‌اند و همچنین از همکاری‌های سرکارخانم دکتر روشن‌پور سپاسگذاری می‌شود.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Knepp
2. Jones
3. Goolsby
4. Ibrahim and Hall
5. Smit
6. Rakha
7. Highway Capacity Manual 2000 (HCM)
8. Sisiopiku
9. Minitab
10. Kurtosis
11. Skewness
12. Kolmogorov-Smironv (K_S)
13. T-Student Test
14. Levene
15. LOS A.
16. LOS B.
17. LOS C.
18. LOS D.
19. LOS E.
20. Tsapakis

۹. مراجع

- Bates, D.M. & Watts, D.G. (1998) "Nonlinear regression:iterative estimation and linear approximations"

- Hablas, H.E. (2007) "A Study of Inclement Weather Impacts on Freeway Free-Flow Speed"

- Ibrahim, A.T. & Hall, F.L. (1994). "Effect of adverse weather conditins on speed-flow-occupancy relationshps", Transportation Research Record No. 1457, Part 2, Traffic Flow and Capacity., pp.184–191.

- Jones, E.R. & Goolsby, M.E. (1970). "The environmental influenceof rain on freeway capacity", Transportation Research Board, pp.74–82.

- Knapp, Keith k., Smithson, Leland. D. & Khattak, Aemal. J. (2000)." The mobility and safety impacts of winter storm events in a freeway environment", Mid-Continent transportation symposium proceedings, pp.67–71.

- Kockelman, K.M. (1998). "Changes in the flow-density realation due to environmental , vehicele , and draiver characteristics", Transportation Research Board, (1644), pp.47–56.

- Mamhassani, H.S., Dong, Jing., Kim, Jiwon., Chen, Roger B. & Park, Byungkyu. (2009). "Incorporating weather impacts in traffic estimation and prediction systems". U.S. Department of transportation.

- Miller, Freund’s & Johnson, R. (1985). "Engineers, for, university of Wisconsin—Madison.

- Rakha, H., Hranac, Robert., Sterzin, Emily., Krechmer, Daniel. & Farzaneh, Mohamadreza. (2006). "empirical studies on traffic flow in inclement weather". U.S. Department of transportation.

- Sisiopiku, Virginia.P., Akin , Darcin. & Skabardonis, Alexander. (2011). "Impacts of weather on traffic flow characteristics of urban freeways in Istanbul". 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, (November 2015), pp.89–99.

- Smith, Bralin.L., Byrne, Kirists. G., Copperman, Rachel. B., Hennessy, Susan. M. & Goodall, Noah. J. (2003). "an investigation into the impact of rainfall on freeway traffic flow". 83th annual meeting of the Transportation Research Board, p.15.

- TRB Executive comittee, (2010). "Highway capacity manual (HCM)". Transportation Research Board (TRB).

- Tsapakis, I., Cheng, T. & Bolbol, A. (2013). "Impact of weather conditions on macroscopic urban travel times". Journal of transport geography, 28, pp.204–211. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.11.003.