یادداشت پژوهشی

تحلیل اثر هدف سفر بر تابع حجم- تأخیر معابر پیاده

زهرا الهی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

میثم اکبرزاده (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

E-mail: makbarzadeh@cc.iut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹٤/۰٤/۰۷ پذیرش :۱۳۹٤/۱۱/۱۱

چکیده

انتخاب پیاده‌روی به عنوان یک گونه قابل توجه، مستلزم وجود زیرساخت‌های مناسب شهری است. طراحی مناسب و کارآمد پیاده‌راه‌ها مستلزم درک صحیح از رفتار حرکتی پیاده‌ها در بافت شهری مورد نظر است. پژوهش‌های انجام شده در چند دهه اخیر، بیانگر تفاوت رفتار پیاده‌ها در موقعیت‌های مختلف بوده است. از این‌رو امکان تعمیم نتایج پژوهشگران در محیط‌های مختلف وجود نداشته و این امر ارزش ساخت مدل‌های بومی را مشخص می‌سازد. هدف این مقاله آن است که اثر کاربری مجاور پیاده‌رو بر ویژگی‌های جریان پیاده را ارزیابی کند و نیز مقادیر صحیح ظرفیت عبوردهی معابر پیاده را برای شرایط یک شهر ایرانی محاسبه نماید. در این مقاله نشان داده شده است که ویژگی‌های کلان جریان پیاده‌ها (نرخ تردد، سرعت متوسط و چگالی) علاوه بر مشخصات فردی، به کاربری مجاور معبر پیاده و هدف سفر آنها نیز بستگی دارد. کاربری زمین در محدوده معبر به‌عنوان تعیین‌کننده هدف سفر بیشتر افراد ترددکننده در نظر گرفته شد. داده‌های مورد نیاز شامل مقادیر سرعت متوسط مکانی، نرخ تردد و چگالی بود. این داده‌ها با نصب دوربین در ارتفاع مناسب و تهیه فیلم از معابر موجود در سه کاربری آیینی، تفریحی و آموزشی در شهر اصفهان استخراج شد. سپس توابع اساسی (تردد بر حسب چگالی و سرعت بر حسب چگالی) برای سه کاربری ساخته و پرداخته شد. توابع برازش داده شده از دقت مناسبی برخوردار هستند، به‌گونه‌ای که ضرایب تشخیص برای سه کاربری مذکور بترتیب ۰/۷۸، ۰/۶۷ و ۰/۸ به‌دست آمده است و تمامی پارامترها معنی‌دار بوده است. بررسی نتایج نشان داد که ضرایب توابع، و نیز ظرفیت و چگالی بحرانی در معابر با کاربری‌های مختلف یکسان نیست. بیشترین و کمترین ظرفیت عبوردهی بترتیب مربوط به کاربری‌های آموزشی و تفریحی بوده است. ازمیان توابع مختلف، مدل گرینبرگ رابطه سرعت- چگالی کاربری آیینی و تفریحی را بهتر توصیف کرده است. تعامل و رفتار عابران در کاربری‌های آموزشی به‌نحو محسوسی متفاوت از سایر کاربری‌های مورد بررسی بوده است. مقادیر مشاهده‌شده ظرفیت در کاربری‌های آیینی و تفریحی کمتر از مقادیر ارائه شده توسط آئین‌نامه ظرفیت راه‌ها (HCM) بود.

واژه‌های کلیدی: نمودار اساسی، پارامترهای کلان جریان، تابع حجم-تأخیر، هدف سفر

۱. مقدمه

ترویج پیاده‌روی به‌عنوان یکی از رویکردهای اساسی در شهرها مورد توجه است. انطباق پیاده‌روی با شاخص‌های توسعه پایدار شهری و نیز تقویت سلامت عمومی و مواجهه اجتماعی، باعث اهمیت روزافزون آن در ساختار حمل و نقلی شهرهاست. آگاهی از میزان استفاده، رفتار ترددی پیاده‌ها، و کاربری‌های بدنه، لازمه طراحی مناسب زیرساخت‌های پیاده‌روی است. ایده اصلی مقاله حاضر این است که بافت شهری و هدف سفر بر رفتار عابران پیاده تاثیرگذار است. نتیجه بلافصل این ایده آن است که ویژگی‌های کارکردی معابر پیاده (شامل ظرفیت و سرعت بیشینه) با هندسه یکسان، در کاربری‌های مختلف، متفاوت خواهد بود. بنابراین در صورت اثبات این فرضیه، ارائه یک مقدار واحد برای ظرفیت یا آستانه‌های سطح سرویس (مطابق آنچه در آیین نامه‌های متداول طراحی آمده است) امری نادرست است و استفاده از مقادیر حاصل از این پژوهش می‌تواند بر دقت طراحی پیاده‌راه‌ها بیفزاید. بمنظور ارزیابی و تدقیق این ایده، تردد عابران در معابر مختلف شهری مورد مشاهده، محاسبه و تحلیل قرار گرفت. فرضیه مورد ارزیابی در این پژوهش این است که هدف سفر در رفتار حرکتی پیاده‌ها تأثیرگذار است. راستی‌آزمایی این فرضیه مستلزم برداشت اطلاعات ترددی افراد با اهداف سفر مختلف و تحلیل رفتار و نسبت پارمترهای جریان ترافیک است. سنجش هدف سفر هر پیاده در معابر ممکن نیست. در نتیجه در مقاله حاضر، با فرض این که کاربریِ دربرگیرنده یک پیاده‌رو تعیین‌کننده هدف سفر عمده افراد گذرنده از آن است، سه کاربری مجزا در نظر گرفته شد و رفتار پیاده‌ها در معابر واقع در هر کاربری مورد تحلیل قرار گرفت. مشخصا، نموارهای اساسی پیاده‌ها در سه کاربری آیینی، تفریحی و آموزشی از داده‌های واقعی ساخته شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل از داده‌های واقعی می‌تواند جانشین آیین‌نامه‌ها شود و همچنین تائید فرض تفاوت در پارامترهای ماکروسکوپی می‌تواند تحولی در طراحی و برنامه‌ریزی‌های مربوط به پیاده‌راه‌ها ایجاد کند. از این گذشته، شناخت بهتر پدیده‌های مرتبط با تردد، فارغ از امتداد اجرایی آنها، فی نفسه واجد ارزش علمی است.

از ویژگی‌های جریان پیاده‌ها عدم دخالت فناوری خودرو و در نتیجه تأثیر مشهودتر عوامل انسانی مانند سن و جنسیت و همچنین عوامل فرهنگی و اجتماعی مربوط به نوع تعامل پیاده‌ها با یکدیگر است. این امر اهمیت انجام مشاهدات و ساخت و پرداخت مدل‌های بومی را مشخص‌تر می‌سازد، چه آن که خطای انتقال مدل بین محیط‌های مختلف به‌دلیل تفاوت‌های قابل توجه رفتاری احتمالا همراه با خطایی قابل توجه خواهد بود. همچنین شرایط محیط اطراف و هدف سفر نیز می‌تواند در رفتار حرکتی پیاده تأثیرگذار باشد. هدف از این پژوهش بررسی نمودارهای اساسی عابرین پیاده در پیاده‌روهای با کاربری‌های مختلف در شهر اصفهان است. برای این منظور از پیاده‌روها در مناطق با کاربری‌های مختلف فیلمبرداری شده و داده‌ها به‌طور مستقیم از فیلم‌ها استخراج شده است. داده‌های به‌دست آمده از معابر مختلف، باتوجه به نوع کاربری تفکیک شده است. بر داده‌های به‌دست‌آمده، نموداری برازش داده شده است تا توابع حجم – تأخیر برای پیاده‌روها با کاربری‌های مختلف پرداخته گردد. در ادامه، نمودارهای به‌دست‌آمده مورد تحلیل قرارگرفتند.

۲. ادبیات موضوع

رفتار عابران پیاده را می‌توان از دو دیدگاه ماکروسکوپی و میکروسکوپی مورد بررسی قرارداد. مدل‌های ماکروسکوپی یا کلان‌نگر، تعاملات میان پیاده‌ها را براساس نمودارهای اساسی مانند تردد- چگالی و سرعت – چگالی بیان می‌کنند. مدل‌های میکروسکوپی یا خردنگر، رفتار هر پیاده را به‌طور مجزا و در تعامل با محیط و نفرات پیرامونی بررسی می‌کنند که بیشتر برای تخمین مسیر حرکت و سرعت پیاده‌ها کاربرد داشته است. مطالعات ماکروسکوپی از سال ۱۹۷۱ توسط فرون و پژوهشگران دیگر ابداع شد. تجزیه و تحلیل میکروسکوپی با پژوهش هندرسون آغاز شد که رفتار جمعیت پیاده‌ها را با سینماتیک گازها و دینامیک سیالات مقایسه کرده است. هلبینگ مدل هندرسون را با درنظرگرفتن اراده، سرعت مطلوب و اثر سایرین بر حرکت هر پیاده، اصلاح نمود [Teknomo, 2002]. پس از آن، پژوهش‌های متعددی به ارائه مدل‌های رفتاری خردنگر و استخراج رفتارهای کلان از این مدل‌ها پرداخته‌اند.در پژوهش حاضر رفتار ماکروسکوپی پیاده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این زمینه مطالعات متعددی انجام شده است که تعدادی از آنها در ادامه ارائه شده‌اند.

دامِن و همکاران با مطالعه سرعت پیاده‌ها در دو چگالی بالا (۰/۶ پیاده بر مترمربع) و پایین (۰/۱۵ پیاده بر مترمربع)، بیان نمودند که سرعت پیاده‌ها را نه تنها ضرورت‌ها واهدافشان، بلکه جمعیت اطرافشان نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. اثر منفی چگالی بر سرعت ناشی از کمبود فضای فیزیکی نیست و احتمالا به این دلیل است که پیاده‌ها هنگامیکه در میان یک جمعیت متراکم حرکت می‌کنند، با نقاط تصمیم‌گیری بیشتری مواجه می‌شوند. معمولا زمان لازم برای مشاهده اطراف و گرفتن تصمیمات مربوطه، حرکت پیاده را کند می‌کند [Daamen and Hoogendoorn, 2003].

فانگ و همکاران برای توصیف رابطه بین چگالی و سرعت معادله‌ای شامل سه جمله ساختند. جمله اول مربوط به تأثیرات افرادی است که در راستای طولی پیاده قرار دارند. جمله دوم معادله مربوط به تأثیرات افرادی است که در راستای عرضی پیاده قرار دارند و جمله سوم معادله مربوط به ویژگی‌های فردی پیاده است. در ناحیه بین چگالی جریان آزاد (بیشترین چگالی که در آن پیاده‌ها می‌توانند با سرعت جریان آزاد حرکت کنند) و چگالی فوق اشباع (کمترین چگالی که در آن انسداد اتفاق می‌افتد) سرعت حرکت پیاده‌ها وابسته به چگالی است [Fang, Lo and Lu, 2003].

سایفراید و همکاران با استفاده از داده تک‌بانده گردآوری‌شده در محیط آزمایشگاهی رابطه‌ای خطی بین سرعت و معکوس چگالی به‌دست آوردند. در این مطالعه همچنین اثر جانبی سایر پیاده‌ها بر هر نفر در چگالی‌های بین ۱ تا ۵ نفر بر مترمربع ناچیز دیده شد [Seyfried et al. 2005]. دامِن و هوگندورن به بررسی اعتبار معادلات درجه اول در توصیف جریان دوبعدی پیاده‌ها پرداختند. آنان همچنین با تحلیل داده‌های برداشت‌شده از ورودی یک گلوگاه مشاهده نمودند که یک نمودار اساسی نمی‌تواند رفتار در مکان‌های مختلف جمعیت را توصیف نماید [Daamen and Hoogendoorn, 2007]. چاتاراج و همکاران تأثیر ویژگی‌های فرهنگی و طول کریدور را در نمودار‌اساسی پیاده‌ها بررسی کردند. برای این منظور دو راهرو با طول و شکل مشابه در هند و آلمان ساخته شده است. نتایج این آزمایش نشان داده است که متوسط سرعت جریان آزاد در هر دو محیط تقریبا برابر ۱/۲۵ متر بر ثانیه به‌دست آمده است. براساس نمودار سرعت – چگالی رسم‌شده برای دو محیط، نتیجه گرفته شده است که به ازای چگالی برابر، هندی‌ها کمی سریع‌تر از آلمانی‌ها حرکت می‌کنند. همچنین در هر چگالی، پراکندگی سرعت در داده‌های هند بیشتر از آلمان بوده است. تفاوت دیگر، نرخ تغییرات سرعت با تغییر چگالی است؛ در سطوح چگالی متوسط به بالا (بین ۱ تا ۲ نفر بر متر)، نرخ تغییرات سرعت در آلمان نسبت به هند خیلی بالاتر به‌دست آمده است. مهم‌ترین نکته به‌دست آمده از این آزمایش، خطی نبودن رابطه سرعت – چگالی در هر دو نمودار آلمان و هند بوده است. انجام آزمایش در دو راهرو با طول‌های متفاوت نشان داد که تفاوت قابل توجهی در مقادیر به‌دست آمده وجود ندارد و در نتیجه طول راهرو اثری بر شکل نمودار اساسی ندارد [Chattaraj et al., 2009].

لاکسمن و همکاران به مقایسه نمودارهای اساسی ساخته‌شده برای چهار شهر مختلف در هندوستان و نیز مقایسه این نمودارها با مجموعه‌ای از روابط ساخته‌شده در مطالعات سایر مناطق جهان پرداختند. بر اساس این مطالعه سرعت پیاده‌روی افراد در هندوستان به آمریکا و فیلیپین شبیه، از سرعت افراد در آلمان کمتر و از سرعت افراد در چین و سنگاپور کمتر است [Laxman et al. 2010].

ژنگ و همکاران به مقایسه رفتار پیاده‌ها در معابر مستقیم و سه‌راه با بررسی تطبیقی نمودارهای چگالی–سرعت پرداختند. یکی از نتایج این مطالعه این بود که نمودار چگالی–سرعت در معبر مستقیم شبیه به رفتار آن در شاخه اصلی سه‌راهی است. اما در شاخه‌های سه‌راهی، نمودار در چگالی بین ۰,۵ تا ۲ نفر بر متر مربع، پایین‌تر از نمودار معبر مستقیم قرار می‌گیرد. همچنین عرض خروجی کریدور آزمایش بر رفتار نمودار چگالی–سرعت اثر بسزایی دارد [Zhang et al. 2011].

رحمان و همکاران با استفاده از روش رگرسیون وزنی به استخراج روابط بین تردد و سرعت برای معابر مختلف پیاده در شهر داکا در بنگلادش پرداختند. تکیه اصلی این پژوهش بر تناسب بیشتر منطق رگرسیون وزنی نسبت به رگرسیون معمولی برای ساخت نمودارهای اساسی بود اگر چه نتایج حاصله تفاوت چشمگیری بین دو روش نشان نمی‌دهد. [Rahman et al. 2013].

ژنگ و سایفراید به بررسی اثر دوطرفه بودن جریان بر نمودارهای اساسی پرداختند. آنان دریافتند که برای چگالی‌های بیشتر از ۱ نفربرمترمربع، شکل نمودار در حالت دوطرفه و یک‌طرفه متفاوت است. همچنین مقدار ظرفیت عبوردهی معبر (نقطه اوج منحنی

نرخ تردد–چگالی) برای حالت جریان یک‌طرفه بیشتر از دوطرفه است [Zhang and Seyfried, 2013].

کیم و همکاران به محاسبه سطح سرویس معابر پیاده از دیدگاه افراد استفاده‌کننده و مقایسه آن با مقادیر گزارش‌شده در راهنمای ظرفیت راه کره جنوبی (KHCM) پرداختند. اندازه‌گیری سطح سرویس معابر پیاده با استفاده از سرانه فضا و تعداد حرکت‌های گریز ارائه نمودند. با فرض این که دلیل حرکت‌های گریز، برخورد با مانع و یا ورود پیاده‌های دیگر به حریم پیاده و عکس العملی برای حفظ فضای شخصی باشد، هر چه تعداد حرکت‌های گریز در یک معبر بیشتر یاشد، نشان‌دهنده سطح سرویس پایین‌تر آن است. سطح سرویس درک شده توسط افراد که از طریق پرسشنامه به‌دست آمده با سطح سرویس حاصل از روش ابداعی این مقاله وروش ارائه شده در KHCM مقایسه شده است و نشان داده شده که نتایج حاصل از روش این مقاله به واقعیت نزدیک‌تر است و KHCM سطح سرویسی بالاتر از واقعیت را تخمین می‌زند [Kim et al. 2014].

در مجموع، از بررسی مطالعات پیشین این گونه برمی‌آید که رفتار ترددی پیاده‌ها در جوامع مختلف قابل تعمیم و انتقال به یکدیگر نیست. از سوی دیگر اثر عوامل محیطی مانند کاربری بدنه بر رفتار ترددی پیاده‌ها مورد اشاره قرار گرفته است. بر این اساس، سنجش این اثر بر رفتار عابران در یکی از شهرهای ایران می‌تواند تکمیل‌کننده دانش موجود در این زمینه باشد.

۳. گردآوری داده ها

داده‌های مورد نیاز برای کاربری آیینی از نمازجمعه اصفهان و راهپیمایی‌های روز ۲۲ بهمن در سال‌های ۹۲ و ۹۳ این شهر برداشت شده است. داده‌های مورد نیاز برای کاربری آیینی در یک بعد از ظهر پاییز بمدت ۲ ساعت (که دربرگیرنده زمان خلوت و شلوغ بوده است) ازخیابان چهارباغ باغ عباسی و سی‌وسه پل در شهر اصفهان برداشت شده است. داده‌های مورد نیاز برای کاربری آموزشی از محل برگزاری کنکور کارشناسی ارشد و دکتری سال ۹۳ و همچنین پیاده‌روهای دانشگاه صنعتی اصفهان (حوالی ظهر یک روز پاییز) جمع‌آوری شده است. تعداد مشاهدات در کاربری آیینی برابر ۷۷ نفر، در کاربری آموزشی برابر ۱۰۳ نفر و در کاربری تفریحی برابر ۹۶ نفر بوده است.

پس از تهیه فیلم از معابر، استخراج داده‌ها بصورت دستی انجام شد. به این منظور شاخص‌هایی با مسافت معلوم در فضای تصویر مشخص گردید و سرعت و چگالی جریان بر اساس زمان حرکت هر نفر بین دو شاخص و نیز تعداد نفرات حاضر در فضای بین دو شاخص محاسبه گردید.

۴. روش پژوهش و تحلیل نتایج

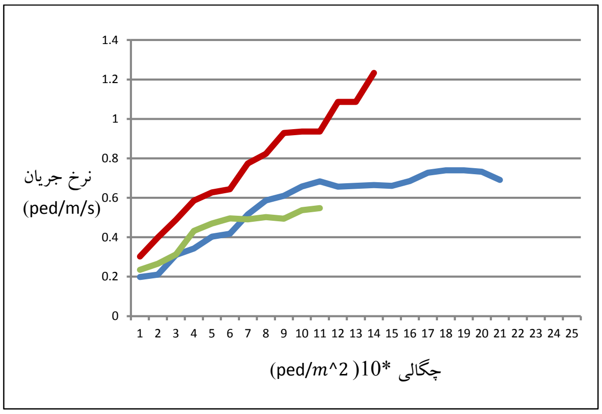
به منظور درک کلی رفتار متغیرها، مقادیر چگالی و نرخ تردد مشاهده‌شده در معابر با کاربری‌های مختلف در نمودارهای (۱–الف) و (۱–ب) ارائه شده است. نمودار (ا–الف) روند تغییرات نرخ تردد پیاده‌ها با افزایش چگالی را در سه کاربری آیینی، آموزشی و تفریحی نشان می‌دهد.

حاصل متوسط‌گیری متحرک داده‌ها در بازه‌هایی به اندازه ۰/۵ نفر بر مترمربع است. همانطور که از نمودار قابل مشاهده است، نوع واکنش نرخ تردد به افزایش چگالی در این سه کاربری یکسان نیست. نرخ تردد در هر بازه چگالی در کاربری آموزشی بیشتر از دو کاربری دیگر بوده و روند صعودی خود را حفظ می‌کند. در کاربری آیینی و تفریحی، با افزایش چگالی از مقدار ۱ نفر بر مترمربع، ابتدا نرخ تردد افزایش می‌یابد. در کاربری تفریحی، با افزایش چگالی از مقدار تقریبی ۳ نفر بر متر مربع، آهنگ افزایش نرخ تردد تقریبا به صفر می‌رسد. این اتفاق در کاربری آیینی برای چگالی تقریبی ۱۰ نفر بر متر مربع رخ می‌دهد.

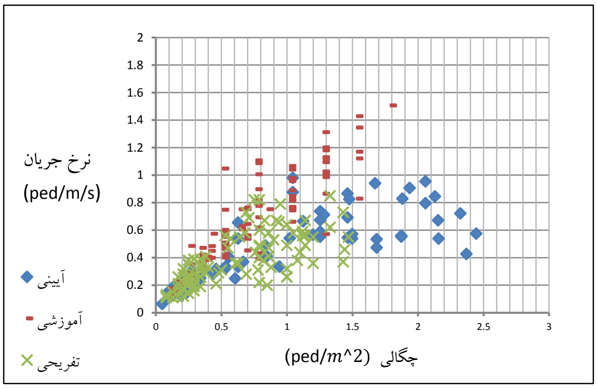
نمودار (ا–ب) مقادیر مشاهده‌شده نرخ تردد و چگالی را نشان می‌دهد. در واقع نمودار (ا–الف) با متوسط‌گیری مقادیر نمودار (ا–ب) به‌دست آمده است. هدف از این متوسط‌گیری، تسهیل برداشت کیفی و تشخیص تفاوت الگوی نمودار اساسی در کاربری‌های مختلف است. در ادامه روابط برازش‌شده برای هر کاربری محاسبه‌شده و مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۴–۱ نمودارهای اساسی پیاده‌ها

نمودارهای اساسی رابطه بین پارامترهای جریان ترافیکی (چگالی، سرعت و نرخ تردد) را نشان می‌دهد



نمودار ١ (الف). متوسط متحرک نرخ تردد بر حسب چگالی



نمودار ١ (ب). پراکندگی نرخ تردد بر حسب چگالی

این سه پارامتر نشان‌دهنده وضعیت جریان ترافیک و سطح سرویس تسهیلات حمل‌ونقلی هستند. در ادامه نمودارهای چگالی–نرخ تردد و چگالی–سرعت در کاربری‌های مختلف ارائه و مقایسه شده اند.

٤-١-١ نمودارهای چگالی- نرخ تردد

بر داده‌های به‌دست آمده نمودارهای خطی و درجه دو برازش داده شد و رابطه مناسب‌تر بر اساس مقدار ضریب تشخیص (R^2) تعیین شد. مشخصات روابط برازش داده شده در جدول (١) ارائه شده است. مقدار آماره آزمون فیشر (F) بمنظور تعیین معنی‌داری کلی رابطه برازش‌شده نیز گزارش شده است. بر اساس این جدول، برای کاربری‌های آیینی و تفریحی، مقدار ضریب تعدیل منحنی درجه دو بیشتر از نمودار خطی برازش داده شده است. بنابراین معادله درجه دوم داده‌های چگالی–نرخ تردد را بهتر توصیف می‌کند. در نتیجه، با محاسبه مشتق نرخ تردد نسبت به چگالی، در کاربری آیینی، ظرفیت برابر ٠/٦٦ نفر بر ثانیه و چگالی بحرانی برابر ١/٥٦ نفر بر مترمربع خواهد بود. در کاربری تفریحی، ظرفیت برابر ٠/٥٩ نفر بر ثانیه و چگالی بحرانی برابر ١/٢١ نفر بر مترمربع خواهد بود. در کاربری آموزشی، مقدار ضریب تشخیص منحنی درجه دو و نمودار خطی برازش داده شده تقریبا یکسان است. بنابراین می‌توان گفت که برازش خطی به‌دلیل سادگی برای توصیف داده‌ها، مناسب‌تر است. در نتیجه از آنجا که نمودار روند صعودی خود را حفظ کرده، می توان گفت که در قسمت جریان آزاد قرار داریم و داده‌ها نیمه‌ی متراکم منحنی را پوشش نمی‌دهند. بنابراین ظرفیت معابر در کاربری آموزشی بیشتر از بالاترین نرخ تردد مشاهده شده است و نمی‌تواند مقدار چگالی بحرانی و ظرفیت را تخمین

بزند. تراکم‌های بالا در کاربری آموزشی به ندرت و در مکان‌های خاص اتفاق می‌افتد که در داده‌های این پژوهش نیز این تراکم اتفاق نیفتاده است.

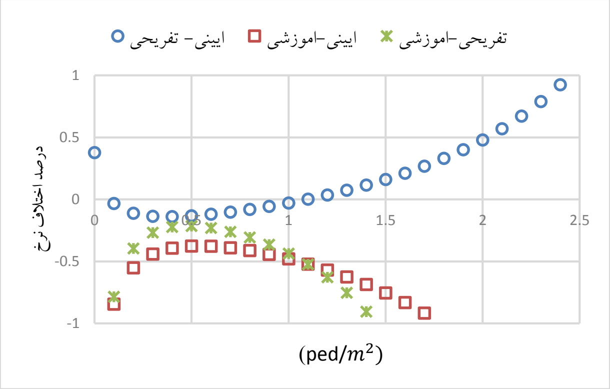
نمودارهای برازش داده‌شده بر داده‌های چگالی-نرخ تردد به‌دست آمده از معابر در کاربری‌های مختلف، در نمودار (۲) مورد مقایسه قرار گرفته است. در این نمودار اختلاف نسبی نرخ تردد دو کاربری در هر چگالی رسم شده است.

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، در چگالی‌های کمتر از ۰/۲، تفاوت بین کاربری‌ها کاملا مشهود است. در این محدوده چگالی، نرخ تردد در کاربری آموزشی بسیار بیشتر از کاربری‌های آیینی و تفریحی است و کاربری آیینی نیز جریان بالاتری را نسبت به کاربری تفریحی عبور می‌دهد. در چگالی ۰/۲ تا ۰/۸ این تفاوت به حداقل می‌رسد. البته این روند کاهشی در نمودار آبی (اختلاف نرخ تردد کاربری آیینی و تفریحی) تا چگالی ۱/٤ نیز ادامه دارد. در چگالی‌های بالا، این تفاوت بوضوح بیشتر شده است که بیانگر رفتار متفاوت پیاده‌ها در معابر شلوغ در کاربری‌های متفاوت است.

لازم بذکر است که در همه سطوح چگالی، نرخ تردد و درنتیجه سرعت در کاربری آموزشی بیشتر از سایر کاربری‌ها می‌باشد. علت این امر ممکن است جوانی جمعیت ترددکننده در معابر این کاربری باشد که با سرعت بالاتری نسبت به سایر افراد حرکت می‌کنند. دلیل دیگری که می‌توان برای توجیه این مشاهده بیان نمود این است که در کاربری آموزشی هدف خارج از مسیر است و در مسیر هیچ جاذبه‌ای برای پیاده‌ها وجود ندارد اما در کاربری تفریحی و آیینی هدف در مسیر واقع است؛ بنابراین افراد در کاربری آموزشی با سرعت بالاتری حرکت می‌کنند.

جدول ۱. روابط نرخ جریان-چگالی برازش داده‌شده برای کاربری‌های مختلف

کاربری	معادله	R^2	F	ظرفیت	چگالی بحرانی
آیینی	$q=0.18+0.28D$	۰/٦۵	۱۳۰	–	–
	$q=0.04+0.74D-0.21D^2$	۰/۷۸	۱۱۹	۰/٦٦	۱/۵٦
تفریحی	$q=0.14+0.44D$	۰/٦۱	۱۰۹	-	-
	$q=0.03+0.97D-0.4D^2$	۰/٦۷	۷۲	۰/۵۹	۱/۲۱
آموزشی	$q=0.14+0.72D$	۰/۸	٤۰۸	–	–
	$D=0.07+0.96D-0.15D^2$	۰/۸۱	۲۱۱	۱/۵۹	۳/۱٦



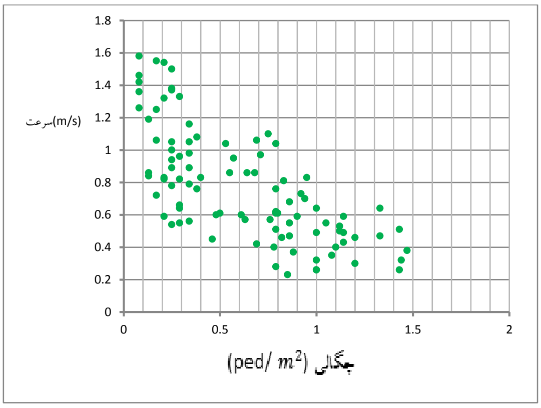
نمودار ۲. مقایسه اختلاف نرخ تردد در کاربری‌های مختلف

همچنین بر اساس تصاویر برداشت‌شده، نوع رفتار تعاملی مشاهده‌شده در کاربری آموزشی نسبت به سایر کاربری‌ها بیشتر مبتنی بر همکاری است.

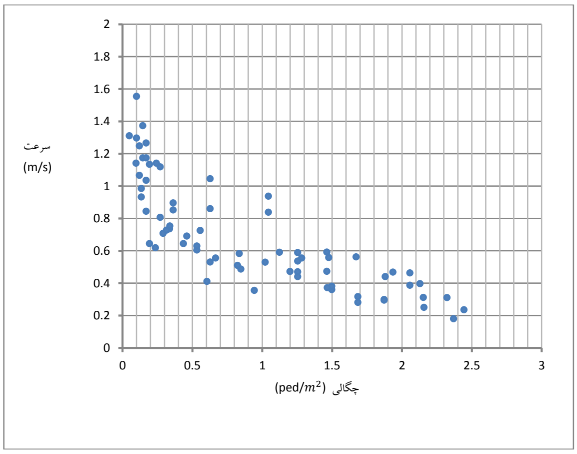
٤-١-٢ نمودارهای سرعت-چگالی

با توجه به ارتباط بین سطح سرویس و چگالی جریان در معابری مانند پیاده‌راه‌ها، مطالعه اثر چگالی بر سرعت اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. ازاینرو مدل‌های ریاضی که بتوانند این رابطه را بهتر نشان دهند، پایه محکمی برای تجزیه و تحلیل و کنترل جریان ترافیک ایجاد می‌کنند. نمودار (۳) پراکندگی سرعت در چگالی‌های مختلف در معابر واقع در کاربری‌های مختلف را نشان می‌دهد. نورسوسترن، درو، پایپس مانجال، نیوول، گرینشیلدز اصلاح‌شده، مک نیکلاس دل‌کستیلو وکرنر بمنظور استخراج رابطه سرعت-چگالی، روابط گرین‌شیلدز، گرینبرگ، آندروود، بر داده‌های چگالی-سرعت برازش داده شد که نتایج در جدول (۲) ارائه شده است. شرح این روابط در منابعی از جمله ونگ و همکاران (۲۰۱۱) موجود است.

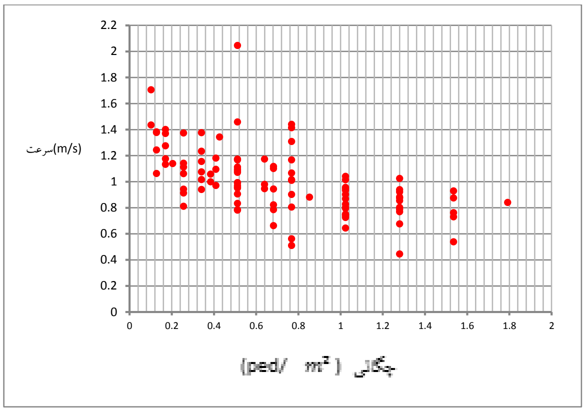
بر اساس جدول (۲)، در کاربری‌های آیینی و تفریحی، مقدار ضریب تشخیص مدل گرینبرگ (مدل چهارم)، بیشتر از سایر نمودارهای برازش داده شده است. بنابراین معادله $V=0.6\times\log\left(\frac{7.2}{D}\right)$ در کاربری آیینی و معادله $V=0.75\times\log\left(\frac{5.2}{D}\right)$ در کاربری تفریحی به‌عنوان بهترین نمودار برای توصیف داده‌های چگالی-سرعت درنظر گرفته می‌شود. در نتیجه اگر چه در چگالی پایین، ظرفیت معابر در کاربری‌های تفریحی بالاتر است، افزایش چگالی باعث افت بیشتر نرخ تردد در معابر این کاربری می‌شود.



نمودار ۳ (الف). پراکندگی سرعت-چگالی کاربری تفریحی



۳ (ب). پراکندگی سرعت-چگالی کاربری آیینی



۳ (ج). پراکندگی سرعت-چگالی کاربری آموزشی

جدول ۲. روابط سرعت-چگالی برازش داده‌شده برای کاربری‌های مختلف

کاربری	معادله	R^2	F	توضیح
آیینی	$V=1.03-0.4D$	۰/۶۶	۱۳۱	-
	$V=1.16-0.8D+0.2D^2$	۰/۷۲	۸۶	-
	$V=1.06e^{-0.6D}$	۰/۷۵	۲۰۶	-
	$V=0.6\times\log\left(\frac{7.2}{D}\right)$	۰/۷۸	۲۴۴	گرینبرگ
	$V=1.15\times\exp\left(-\frac{D}{1.5}\right)$	۰/۷۲	۱۷۷	آندروود
تفریحی	$V=1.2-0.6D$	۰/۵۱	۹۸	-
	$V=1.3-1.2D+0.4D^2$	۰/۵۴	۵۴	-
	$V=1.2e^{-0.9D}$	۰/۵۳	۱۰۴	-
	$V=1.2\left(1-\frac{D}{1.85}\right)$	۰/۵۱	۹۸	گرینشیلدز
	$V=0.75\times\log\left(\frac{5.2}{D}\right)$	۰/۵۶	۱۲۰	گرینبرگ
	$V=1.3\times\exp\left(-\frac{D}{1.1}\right)$	۰/۵۴	۱۱۰	آندروود
آموزشی	$V=1.3-0.4D$	۰/۳۴	۵۰	-
	$V=1.4-0.7D+0.2D^2$	۰/۳۶	۲۷	-
	$V=1.26e^{-0.4D}$	۰/۳۶	۵۴	-
	$V=1.3\left(1-\frac{D}{3.5}\right)$	۰/۳۴	۵۲	گرینشیلدز
	$V=1.3\times\exp\left(-\frac{D}{2.6}\right)$	۰/۳۵	۵۴	آندروود

برای کاربری آموزشی، ضریب تشخیص نمودارهای برازش داده شده نسبتا پایین است. درواقع داده‌های مشاهده‌شده در محدوده‌ای هستند که چگالی اثر معنی‌داری بر سرعت نگذاشته است. این به آن معنی است که در چگالی برابر، ظرفیت معابر در کاربری‌های آموزشی بسیار بیشتر از ظرفیت معابر در کاربری‌های آیینی و تفریحی است.

٤-۲ مقایسه با آیین‌نامه ظرفیت راه‌ها (HCM)

مقادیر ظرفیت و چگالی بحرانی به‌دست‌آمده در کاربری‌های آیینی و تفریحی با مقادیر گزارش‌شده در HCM مقایسه شد. داده‌های کاربری آموزشی بعلت واقع‌شدن در نواحی کمتر از چگالی بحرانی قابل مقایسه با مقادیر متناظر HCM نبود. HCM مقدار ظرفیت معابر پیاده را برابر ۱/۲٦ نفر بر ثانیه در متر بیان می‌کند. این مقدار از ظرفیت به‌دست‌آمده برای کاربری آیینی (۰/٦٦) و تفریحی (۰/۵۹) بیشتر است. همچنین HCM مقدار چگالی بحرانی معابر پیاده را ۱/۳٤ نفر برمترمربع بیان می‌کند. این مقدار کمتر از چگالی بحرانی به‌دست‌آمده برای کاربری آیینی (۱/۵٦) و بیشتر از مقدار به‌دست آمده برای کاربری تفریحی (۱/۲۱) است. اختلاف موجود در مواردی باعث تفاوت تشخیص سطح سرویس میان مدل‌های این پژوهش و HCM می‌گردد. به‌عنوان نمونه، نقطه متناظر با چگالی بحرانی در کاربری آیینی و تفریحی، طبق محاسبات HCM بترتیب در سطح سرویس F و E واقع می‌شوند.

۵. نتیجه‌گیری

سه ویژگی کلان جریان پیاده (سرعت، چگالی و نرخ تردد) در سه کاربری آیینی، تفریحی و آموزشی مشاهده شده است. نتایج تحلیل داده‌های هر کاربری نشان‌دهنده تفاوت رفتاری پیاده‌ها در کاربری‌های مختلف است. بر داده‌های به‌دست آمده نمودارهایی برازش داده شده و بر اساس معناداری و بالاترین ضریب تشخیص، بهترین نمودار برای توصیف داده‌ها انتخاب شده است. براساس این نمودارها، میزان ظرفیت و چگالی بحرانی در کاربری‌های مختلف محاسبه شده است که بیشترین ظرفیت مربوط به کاربری آموزشی و کمترین آن مربوط به کاربری تفریحی است. این می‌تواند به این دلیل باشد که در کاربری آموزشی قسمت عمده‌ای از جمعیت آن را جوانان تشکیل می‌دهند که سرعت بالاتری نسبت به سایر افراد دارند؛ علاوه براین از بررسی فیلم‌ها می‌توان مشاهده کرد که در چگالی‌های بالا، افراد با یکدیگر برخورد نمی‌کنند و براحتی به یکدیگر اجازه عبور می‌دهند. در معابر این کاربری جذابیتی در مسیر وجود ندارد و هدف افراد در خارج از مسیر است که سبب می‌شود آنها با سرعت بالاتری حرکت کنند؛ درحالی‌که در کاربری آیینی و تفریحی، هدف در مسیر واقع است و به‌دلیل جذابیت بالای مسیر، افراد کندتر حرکت می‌کنند.

مقادیر به‌دست آمده برای ظرفیت و چگالی بحرانی با مقادیر ارائه شده در HCM مقایسه شده است. ظرفیت گزارش‌شده در HCM بیشتر از ظرفیت مشاهده‌شده در معابر با کاربری‌های مختلف شهر اصفهان بود. در نتیجه بنظر می‌رسد ساخت و پرداخت مدل‌های بومی و نیز بتفکیک هدف سفر غالب معبر دارای توجیه فنی باشد.

از نظر اجرایی، ظرفیت‌های محاسبه‌شده می‌توانند در طراحی عرض موثر معابر مورد استفاده قرار گیرد. دستاورد اصلی این پژوهش آن است که مقدار برابر عرض موثر در کاربری‌های مختلف باعث عبوردهی حجم برابر نمی‌شود. در واقع در کاربری‌های تفریحی و تجاری، طراحی بر حسب آیین‌نامه موجود ظرفیت راه، ظرفیت عبوری برابر نصف مقدار پیش‌بینی‌شده در مقاله حاضر را به‌دست می‌دهد. از سوی دیگر، استناد به ارقام آیین‌نامه باعث ایجاد ظرفیت اضافی در کاربری‌های آموزشی می‌گردد. در نتیجه با استفاده از ارقام محاسبه‌شده در این مقاله، امکان طراحی دقیق‌تر معابر پیاده فراهم می‌گردد. مطالعه اثر کاربری مجاور بر ویژگی‌های ترددی به‌طور مصرح در منابع علمی گذشته مورد توجه قرار نگرفته است. خلاصه نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳ مقایسه ظرفیت پیشنهادی آیین‌نامه و مقادیر محاسبه‌شده

کاربری	تفریحی	آیینی	مقدار HCM
ظرفیت عبوردهی	۰/۵۹	۰/٦٦	۱/۲٦

۶. مراجع

- Chattaraj, U., Seyfried, A. and Chakroborty, P. (2009) "Comparison of pedestrian fundamental diagram across cultures", Advances in Complex Systems, Vol. 12, No. 3.

- Daamen, W. and Hoogendoorn, S. P. (2003) "Qualitative results from pedestrian laboratory experiments", In E. R. Gales (Ed.), Pedestrian and Evacuation Dynamics, pp. 121-132.

- Daamen, W. and Hoogendoor,n S. P. (2007) "Flow-density relations for pedestrian traffic", In Traffic and granular flow'05, Vol. 5, pp. 315-322.

- Fang, Z., Lo, S.M. and Lu, J. A. (2003) "On the relationship between crowd density and movement velocity", Fire Safety Journal, Vol. 38, No. 3, pp. 271–283.

- Kim, S., Choi, J., Kim, S. and Tay, R. (2014) "Personal space, evasive movement and pedestrian level of service", Journal of Advanced Transportation, Vol. 48, No. 6, October, pp. 673–684.

- Laxman, K .K., Rastogi, R. and Chandra, S. (2010) "Pedestrian flow characteristics in mixed traffic conditions", Journal of Urban Planning and Development, Vol. 136, No. 1, February, pp. 23–33.

- Rahman, K., Ghani, N. A., Kamil, A. A. and Mustafa, A. (2013) "Weighted regression method for the study of pedestrian flow characteristics in Dhaka", Modern Applied Science, Vol. 7, No. 4, March.

- Seyfried, A., Steffen, B., Klingsch, W. and Boltes, M. (2005) "The fundamental diagram of pedestrian movement revisited", Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, Vol. 2005, October.

- Teknomo, K. (2002) "Microscopic pedestrian flow characteristics", Tohoku University, Japan.

- Transportation Research Board (2010) "Highway capacity manual", Published by the National Research Council, Washington DC, 2010.

- Zhang, J., Klingsch, W., Schadschneider, A. and Seyfried, A. (2011) "Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions", Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, Vol. 2011, June.

- Zhang, J. and Seyfried, A. (2013) "Empirical characteristics of different types of pedestrian streams", Procedia Engineering, Vol. 62, pp. 655 – 662.

- Wang, H., Li, J., Chen, Q. and Ni, D. (2011) "Logistic modeling of the equilibrium speed-density relationship", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 45, No. 6, pp. 554-566.

زهرا الهی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی راه آهن- خطوط را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-برنامه ریزی حمل و نقل در سال ۱۳۹٤ را از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بررسی جریان پیاده (مهندسی ترافیک) بوده ودر حال حاضر کارمند شهرداری قم است.

میثم اکبرزاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق (مخابرات) را در سال ۱۳۸۱ و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی صنایع (سیستم‌های اقتصادی-اجتماعی) را در سال ۱۳۸٦ از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. در سال ۱۳۹۱موفق به کسب درجه دکتری در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل از دانشگاه ایالتی لوئیزیانا (آمریکا) گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان حمل‌ونقل همگانی، شبکه‌های پیچیده و مهندسی ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی اصفهان است.