

## ارزیابی عملکرد میدان‌های دوخطه استاندارد تحت شرایط تقاضای غیرقطعی

### با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو

#### مقاله علمی - پژوهشی

محسن بابایی\*، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

پیام سجادی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، مؤسسه آموزش عالی عمران و توسعه، همدان، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.babaei@basu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

صفحه ۸۷-۱۰۲

#### چکیده

ظرفیت میدان یکی از مهمترین مشخصه‌هایی است که می‌تواند جایگاه میدان را به عنوان یک تقاطع همسطح شهری روشن سازد. بسیاری از میدان‌هایی که در گذشته طراحی و اجرا شده‌اند، امروزه با مشکلات ظرفیتی مواجه هستند، به گونه‌ای که در اکثر موارد تجدید طراحی آنها ضروری گشته است. امکان برنامه‌ریزی برای استفاده از میدان هنگامی به صورت صحیح و مناسب، میسر خواهد شد که میزان تقاضای سیستم و نوسانات آن از قبل تعیین شده باشد؛ یعنی، برای پاسخ‌گویی به تقاضای سفر به‌دنبال ایجاد ظرفیت مناسب برای میدان در سطوح خدمت مشخصی باشیم. با این حال، در شرایط دنیای واقعی به سختی می‌توان مقادیر دقیق تقاضا را به دلیل نوسانات آن در طول دوره‌های مختلف عملیات ثابت فرض کرد. در این تحقیق، ظرفیت میدان دو خطه با توجه به پراکندگی تقاضا در شاخه‌های ورودی مورد تحلیل قرار گرفته است و نیز تأثیر تغییرات تقاضای گردش‌ها بر ظرفیت میدان مورد بررسی قرار گرفته است. برای در نظر گرفتن پراکندگی تقاضا، احجام تقاضا بصورت توابع توزیع احتمال پیوسته یکنواخت در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی ظرفیت میدان، از روش توصیه‌شده در راهنمای ظرفیت معابر (HCM 2010) استفاده شده است. برای تحلیل ظرفیت تحت تقاضای احتمالاتی از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش پراکندگی احجام ورودی برای عبور از میدان، تأخیر برای وسایل نقلیه در میدان زیاد می‌شود بطوری که پراکندگی زیاد برای حجم‌های ورودی می‌تواند سطح سرویس میدان را نسبت به زمانی که پراکندگی در تقاضای ورود وجود ندارد دو درجه نامطلوب‌تر سازد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات تقاضا، تأخیر کنترل، میدان دوخطه، شبیه‌سازی مونت-کارلو

#### ۱- مقدمه

ترافیک حادثر در آن معبر و یا حتی در کل شبکه شده است. یک میدان موفق نشان‌دهنده‌ی توانایی شهر و یک میدان ضعیف نشانگر ضعف مدیریت شهری است. اگر شهری بخواهد میزان موفقیت میادین را بالا ببرد، باید در طرح و مطالعات اولیه در احداث چنین فضاهایی دقت شده و عواملی که می‌تواند کارایی این نوع از تسهیلات ترافیکی را بالا ببرد مدنظر قرار گیرد. عدم وجود توازن بین عرضه و تقاضا در سیستم حمل‌ونقل درون‌شهری، فقدان برنامه‌ریزی مناسب در بحث حمل‌ونقل

تقاطع‌های شهری می‌بایست با ترافیک پیش رو و تقاضاهای عبوری از آن، همخوانی داشته باشند، به گونه‌ای که ابتدا با مطالعه و پژوهش اولیه و اصولی، شبکه حمل‌ونقل آنالیز شده و بعد تسهیلات حمل‌ونقلی با توجه به تقاضای آن طرح و اجراء گردد. تا احداث این تسهیل ترافیکی جدید باعث بروز مشکلات حادثر ترافیکی در آن منطقه یا کل شبکه نگردد. در بسیاری مواقع تقاطع‌هایی طرح و اجراء شده است که نه تنها ترافیک آن منطقه را بهبود نبخشیده، بلکه باعث ایجاد

میدان میدان دارد و میزان تقاضا از هر شاخه از میدان و همچنین تغییرات و پراکندگی آن می‌تواند تأثیر چشم‌گیری بر ظرفیت کل میدان و در نتیجه شبکه حمل‌ونقل داشته باشد.

امکان برنامه‌ریزی برای یک سیستم حمل‌ونقلی هنگامی به صورت صحیح و مناسب میسر خواهد شد که میزان تقاضای سیستم از قبل تعیین شده باشد؛ یعنی، برای پاسخ‌گویی به تقاضای سفر به دنبال ایجاد ظرفیت مناسب برای تسهیلات در سطوح خدمت مشخصی باشیم. از آنجا که تقاضا در دوره‌های زمانی مختلف متغیر است و بنابراین می‌بایست ظرفیت میدان بگونه‌ای تعیین شود که بتواند با این تغییرپذیری در تقاضا همخوانی داشته باشد، بدیهی است که در نظر گرفتن تغییرات تقاضا نتایج تحلیل نزدیک‌تر به واقعی در دسترس قرار می‌دهد که در صورت در نظر نگرفتن آن، خطاهایی در برآورد میزان کارایی (سطح خدمت) میدان به وجود خواهد آمد، و نتیجتاً بهره‌گیری مناسب از میدان محقق نخواهد شد. در این مقاله، ظرفیت میدان دوخطه استاندارد با توجه به پراکندگی تقاضا در شاخه‌های ورودی و نیز تأثیر تغییرات تقاضای گردش‌ها بر ظرفیت میدان مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای در نظر گرفتن پراکندگی تقاضا، احجام تقاضا به صورت توابع توزیع احتمال پیوسته یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. برای ارزیابی ظرفیت میدان، از روش توصیه‌شده در راهنمای ظرفیت معابر (HCM 2010) و برای تحلیل ظرفیت تحت تقاضای احتمالاتی از روش «شبیه‌سازی مونت-کارلو»<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. ادامه مقاله به این صورت بخش‌بندی شده است. ابتدا در بخش ۲ به بیان مسأله و اهداف پژوهش پرداخته می‌شود. در بخش ۳ پیشینه پژوهش بررسی می‌شود. در بخش ۴ فرض‌ها و در بخش ۵ مبانی پژوهش توضیح داده می‌شود. در بخش ۵ نتایج تحلیل‌ها ارائه خواهد شد. بخش‌هایی نیز نتیجه‌گیری و توصیه موضوع‌هایی برای مطالعات آتی را در بر دارد.

## ۲- پیشینه تحقیق

برآورد عملکرد و ظرفیت میدان‌ها یکی از مباحث مهم مطرح در زمینه مهندسی ترافیک است، و با توجه به اینکه در یک تقاطع، میزان تقاضا در ساعات روز و یا روزهای سال با هم متفاوت است (Mohammad et al., 2008)، بررسی میزان تأثیر تغییرپذیری تقاضا بر ظرفیت میدان بسیار اهمیت می‌یابد. در این تحقیق، ظرفیت میدان با توجه به الگوهای متغیر تقاضا مورد تحلیل قرار می‌گیرد و تأثیرات این تغییرات و

شهری و سرانجام ناتوانایی و کارایی پایین مدل‌های مورد استفاده در تقاضای سفر عواملی است که تشدید و تداوم مشکلات حمل‌ونقل شهری و معضلات تراکم ترافیکی فشرده را به دنبال خواهد داشت. به‌طور کلی، می‌توان گفت که میزان تقاضا در دوره بهره‌برداری (هرچند کوتاه مدت، مثلاً یکساله) ثابت نیست و در اثر عوامل مختلف رفتار سفر و جذابیت سفر نقاط مختلف شهری در ساعات و روزهای مختلف سال در معرض تغییرات مداوم است (Will R, et, al, 2004). در این مقاله، تغییرپذیری تقاضا در قالب توابع توزیع احتمال در نظر گرفته می‌شود تا بتوان تأثیر تغییرات تقاضا را با دقت بیشتری بر نحوه عملکرد میدان‌های شهری بررسی کرد.

با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته در کشورهای پیشرفته می‌توان گفت که در اکثر موارد، میدان‌ها از تقاطع‌های بدون چراغ کارآتر و ایمن‌تر عمل می‌کنند. میدان به عنوان یک امکان ترافیکی می‌تواند نقش بسزایی در مدیریت ترافیک و ایمنی و آرامش ترافیک داشته باشد (Ziolkowski, 2014). تعیین ظرفیت میدان، به علت پیچیدگی رفتار رانندگان، همواره یکی از موضوعات قابل بحث در مسئله ظرفیت معابر بوده است. سازمان‌های مربوط به مسائل راه و حمل‌ونقل در کشورهای مختلف با صرف هزینه‌های بسیار و تهیه نشریات و آیین‌نامه‌هایی که در آنها پارامترهای شاخص میدان‌ها و نحوه تعیین ظرفیت آنها مشخص شده است، به این موضوعات جهت اصلاح و ساماندهی حمل‌ونقل پرداخته‌اند. به‌طور کلی برای شناسایی مسائل و نحوه عملکرد یک سیستم، ابتدا باید اطلاعات کافی در زمینه عوامل موثر بر آن و میزان تأثیر هر یک تعیین گردد. در تقاطع‌های شهری تمرکز شدید ترافیک در فضاهای محدود وجود دارد و از طرفی هزینه احداث تقاطع‌ها معمولاً بالا است. لذا هزینه‌ی سنگین احداث تقاطع‌ها، انجام تحلیل دقیق مهندسی بر اساس اطلاعات ترافیکی را ایجاب می‌نماید. میدان‌ها یا به عبارتی تقاطع‌های دایروی انواع گوناگونی دارند که امروزه اکثراً از میدان‌هایی تحت عنوان میدان‌های مدرن در طراحی‌ها استفاده می‌شود. میدان‌های مدرن با سایر تقاطع‌های دایروی تفاوت‌های گوناگونی از لحاظ مشخصات فیزیکی و عملکردی دارند. ظرفیت یک میدان بطور مستقیم تحت تأثیر الگوهای جریان، یا به عبارت دیگر تحت تأثیر سه جریان ورودی، گردش و خروجی است. هر کدام از گردش‌های ورودی به نوبه خود تأثیرات مستقیمی بر ظرفیت

پراکندگی تقاضا، بر ظرفیت میدان مشخص می‌شود. همچنین، با نادیده گرفتن تغییرات تقاضا هر سری از جریان‌های گردشی در بازه‌های تغییرات تقاضای احتمالاتی، این مهم بررسی می‌شود که هر سری از گردش‌های ورودی به میدان چه میزان تأثیر بر ظرفیت میدان دارند، تا بتوان با شناسایی بهتر زمان اوج ترافیک در میدان با توجه به تقاضای هر شاخه از میدان، راه‌کارهایی را جهت بهبود و روان‌سازی آن ارائه داد. به طور کلی، هدف از این تحقیق، بررسی میزان تأثیر تغییرات تقاضا در دوره‌های مختلف بهره‌برداری بر ظرفیت و سطح سرویس میدان است. با توجه به روش ارائه‌شده تأثیرات پراکندگی تقاضا در هر مسیر ورودی، بر ظرفیت میدان دوخطه استاندارد مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا مشخص شود که تغییرات در پراکندگی تقاضا چه تأثیری بر ظرفیت یا ترافیک و سرویس‌دهی میدان دارد. یعنی، کم شدن احجام ورودی در یک پایه (روی‌کرد) و ازدیاد احجام ورودی در پایه‌های دیگر میدان نسبت به میانگین آنها، بر ظرفیت و سرویس‌دهی میدان به چه میزان تأثیرگذار است.

به طور کلی میداین به منظور حل مشکل دواير ترافیکی موجود معرفی شدند و با به کاربردن این اصل که حق تقدم با ترافیک چرخشی است و نه ترافیک ورودی، میدان‌ها تقاطعات مؤثرتری از دیگر چند راه‌ها و در برخی از حالات بهتر از تقاطعات زمان‌بندی شده بوده‌اند (WSDOT, 2017). معمولاً میدان‌های متداول به‌عنوان ابزار کنترل تقاطع برای جریان‌های متوسط استفاده می‌شوند. این تسهیلات حرکت منظم ترافیکی را در اطراف جزیره مرکزی که عموماً دایره‌ای است شکل می‌دهند. جریان گردشی به‌عنوان جریانی که دارای اولویت است محسوب می‌شود و جریان ورودی در انتظار یک فاصله مناسب در ترافیک گردشی وارد میدان می‌شود (Mahesh et al., 2016). به علت اینکه میداین مدرن در اوایل دهه ۱۹۶۰ برای اولین بار معرفی شدند روابط ریاضی زیادی به منظور تعیین ظرفیت و تأخیر میدان بسط داده شده‌اند. از جمله تحقیقاتی که در این زمینه انجام گرفته است می‌توان به (Zhaowei and Yuzhou, 2014) اشاره کرد که به بررسی ظرفیت میدان‌ها پرداخته‌اند.

روش‌های موجود برای محاسبه ظرفیت و تحلیل عملکرد میدان بر اساس دو رویکرد اصلی رگرسیون و تحلیل فاصله قابل قبول استوارند (Madani, 2014; Ren et al., 2016).

همچنین، می‌توان گفت که مدل شبیه‌سازی خردنگر که در سراسر دنیا توسعه یافته است به‌عنوان یک مدل برای تعیین ظرفیت بر مبنای تحلیل فاصله قابل قبول به حساب می‌آید (Hosseini, 2014). البته روش‌های دیگری نیز مانند شبکه عصبی (Barggol et al., 2016) و منطق فازی (Behbahani et al., 2016) در سال‌های اخیر مد نظر محققین قرار گرفته و در حال بررسی‌های بیشتر است.

از جمله آیین‌نامه‌هایی که در آنها تحلیل ظرفیت میدان‌های ترافیکی مطرح شده است آیین‌نامه راهنمای ظرفیت معابر (HCM 2010) است که ظرفیت میدان‌های یک‌خطه و دوخطه را بررسی و رابطه‌ای برای تعیین تأخیر و سطح سرویس آنها ارائه کرده است. در حال حاضر، در کشور ما و در بسیاری از کشورهای جهان تحلیل ظرفیت میدان با استفاده از همین راهنما (به عنوان معتبرترین مرجع عملی در زمینه تحلیل ظرفیت در مهندسی ترافیک) انجام می‌گیرد. در این آیین‌نامه پارامترهایی مانند  $v_e$  (نرخ جریان ورودی)،  $v_c$  (نرخ جریان برخورد)، و  $v_{ex}$  (نرخ جریان خروجی)، نقش اصلی در تعیین ظرفیت میدان‌های یک‌خطه و دوخطه با خطوط کناری را دارند (Lenters, 2010).

در مدل‌های مبتنی بر فاصله قابل قبول که مدل‌های تحلیلی به حساب می‌آیند، سعی می‌شود رفتار رانندگان به‌طور مستقیم با استفاده از تابع توزیع احتمال سرفاصله زمانی بین خودروها در مسیر گردشی و قبول سرفاصله زمانی توسط رانندگان در شاخه‌های ورودی میدان در نظر گرفته شود. با این حال، در مدل مبتنی بر فاصله قابل قبول نمی‌توان همه رفتارهای مشاهده شده را تجزیه و تحلیل کرد و می‌توان گفت کالیبراسیون این روش پیچیده و دشوار است و در هنگامی که درک خصوصیات رانندگان ناقص باشد اغلب از مدل رگرسیون استفاده می‌شود.

از جمله مطالعاتی که در زمینه عدم قطعیت در سرفاصله زمانی و تأثیر آن بر ظرفیت تقاطع‌های بدون چراغ راهنمایی انجام شده است می‌توان به (Troutbeck, 1986; 1991) اشاره کرد. گیفره و همکارانش در سال ۲۰۱۷ (Giuffrè et al., 2017) برای اولین بار بحث عدم قطعیت در محاسبه ظرفیت میدان را به میان آوردند؛ به این معنی، که اگر پارامترهایی مانند سرفاصله زمانی وسایل نقلیه در دوره زمانی تحلیل همراه با عدم قطعیت باشند، ظرفیت میدان در ورودی‌ها چه تغییراتی به همراه خواهد داشت؟ قابل ذکر است که در مقاله گیفره و

مدل‌ها بر اساس این فرض اساسی شکل گرفته‌اند. همچنین، فرض شده است که تغییرات تأخیر در میدان ناشی از تغییرات تقاضا در میدان است و عوامل دیگری مانند آب و هوا و روز و شب در آن تأثیری ندارند. این فرض‌ها مطابق با روش تحلیل ظرفیت راه‌ها (HCM2010) برای میدان‌های دوخطه است، و بنابراین هر فرض دیگری که در زمینه تحلیل میدان‌های دوخطه مورد بحث قرار نگرفته باشد به این معنی است که فرض‌های آیین‌نامه مذکور در مورد آن برقرار است.

#### ۴- مبانی نظری

##### ۴-۱- تئوری تحلیل ظرفیت و برآورد تأخیر میدان

مطالب ارائه شده در این قسمت بر مبنای روش تحلیل ظرفیت میدان در HCM 2010 است. رابطه ۱ و ۲ ظرفیت دو خط ورودی به میدان در برخورد با دو مسیر گردش (مشخص شده در شکل ۱) را نشان می‌دهند.

$$C_{e,R,pce} = 1,130e^{(-0.7 \cdot 10^{-3})v_{c,pce}} \quad (1)$$

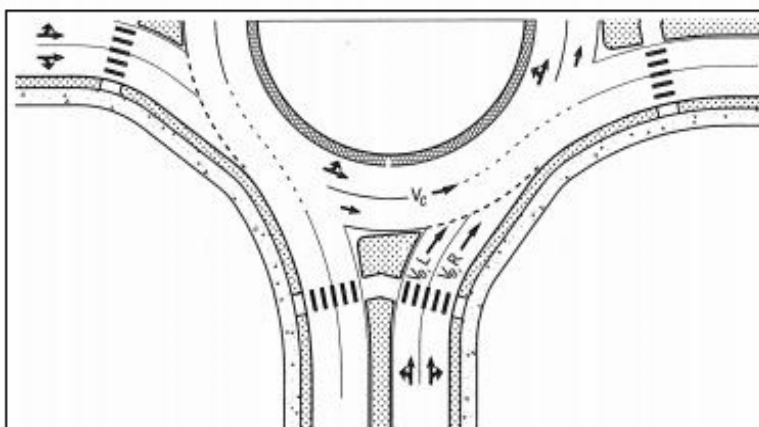
$$C_{e,L,pce} = 1,130e^{(-0.75 \cdot 10^{-3})v_{c,pce}} \quad (2)$$

که در آن:

$C_{e,R,pce}$  = ظرفیت خط ورودی راست (تعدیل شده برای خودروهای سنگین) (pc/h)

$C_{e,L,pce}$  = ظرفیت خط ورودی چپ (تعدیل شده برای خودروهای سنگین) (pc/h)

$v_{c,pce}$  = نرخ جریان برخورد (برای دو مسیر) (pc/h)



شکل ۱. مثالی از یک میدان دو خطه به شکل استاندارد

همکارانش تغییرات مربوط به دوره‌های زمانی بهره‌برداری نبوده و تقاضا در شاخه‌های ورودی میدان ثابت است، و در حقیقت با غیرقطعی بودن سرفاصله زمانی تنها می‌توان غیرقطعی بودن رفتار رانندگان را در نظر گرفت، نه غیرقطعی بودن تقاضا را. بر خلاف مطالعه گیفره و همکارانش، در پژوهش حاضر، تقاضا در دوره‌های مختلف بهره‌برداری متفاوت و دارای تغییرپذیری است، و در عوض رفتار رانندگان - که در غیرقطعی بودن سرفاصله زمانی منعکس می‌شود - ثابت در نظر گرفته می‌شود؛ به این معنی که جامعه همگنی از رانندگان سر و کار داریم.

##### ۳- فرض‌ها

در این تحقیق فرض شده است که رفتار کلیه رانندگان همگن بوده و در مواجهه با میدان رفتاری مشابه از خود بروز می‌دهند. همچنین، فرض شده است که همواره وسایل نقلیه گردش نسبت به وسایل نقلیه ورودی حق تقدم دارند و کلیه

رابطه تأخیر کنترل برای میدان بر اساس روش عمومی است که برای تقاطع‌های بدون چراغ دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته شده است. رابطه ۳ مدل تخمین متوسط تأخیر کنترل را برای هر خط از یک رویکرد میدان نشان می‌دهد:

$$d = \frac{3600}{c} + 900T \left[ x - 1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c}\right)x}{450T}} \right] + 5 \times \min[x, 1] \quad (3)$$

که در این رابطه:

$$d = \text{میانگین کنترل تأخیر (s/veh)}$$

$$x = \text{نرخ حجم به ظرفیت از خط مورد نظر}$$

$$C = \text{ظرفیت از خط مورد نظر و}$$

$$T = \text{دوره زمانی (ساعت) } (T = 0,25h) \text{ برای آنالیز ۱۵ دقیقه‌ای) را نشان می‌دهد.}$$

۴ نشان داده شده است. همچنین، تأخیر کنترل برای کل تقاطع (میدان) نیز به همین نحو با میانگین‌گیری وزنی از تأخیر رویکردهای مختلف میدان مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

میانگین تأخیر برای یک خط معین، به‌عنوان معیاری برای ارزیابی عملکرد ظرفیت خطوط و درجه‌ی اشباع آن در نظر گرفته می‌شود. تأخیر کنترل برای یک رویکرد با میانگین‌گیری وزنی از تأخیر هر خط در رویکرد محاسبه می‌شود که در رابطه

$$d_{\text{approach}} = \frac{d_{LL}v_{LL} + d_{RL}v_{RL} + d_{\text{bypass}}v_{\text{bypass}}}{v_{LL} + v_{RL} + v_{\text{bypass}}} \quad (4)$$

$$d_{\text{intersection}} = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i} \quad (5)$$

$$d_{\text{intersection}} = \text{کنترل تأخیر برای کل تقاطع (s/veh)}$$

$$d_i = \text{کنترل تأخیر برای رویکرد } i \text{ (s/veh)}$$

$$v_i = \text{نرخ جریان برای رویکرد } i \text{ (veh/h)}$$

است. سطح سرویس F نسبت نرخ حجم به ظرفیت مختص یک خط که بیش از ۱ بدون در نظر گرفتن تأخیر کنترل را بیان می‌کند. ارزیابی سطح سرویس در این روش فقط بر اساس کنترل تأخیر است که در جدول ۱ نشان داده شده است.

اهمیت محاسبه تأخیر در این است که سطح سرویس هر رویکرد بر مبنای آن محاسبه می‌شود. سطح سرویس برای میدان بر اساس مقادیر تأخیر کنترل صورت می‌گیرد. سطح سرویس (LOS) ملاکی برای روانی حرکت خودروها در میدان است که در جدول ۱ معیارهای آن نشان داده شده

جدول ۱. ارزیابی سطح سرویس برای رویکردها و میدان، بوسیله‌ی تأخیر کنترل (HCM 2010)

کنترل تأخیر (s/veh)	سطح سرویس بر اساس نرخ حجم به ظرفیت	
	$v/c \leq 1.0$	$v/c > 1.0$
0-10	A	F
>10-15	B	F
>15-25	C	F
>25-35	D	F
>35-50	E	F
>50	F	F

## ۴-۲- متغیرهای تصادفی و توزیع یکنواخت پیوسته

اختیار کند متغیر تصادفی گسسته نامیده می‌شود و متغیر تصادفی‌ای که مقادیر آن غیر قابل شمارش باشد متغیر تصادفی پیوسته نامیده می‌شود.

یک متغیر تصادفی تابعی حقیقی است بر روی فضای نمونه آزمایش،  $X: \Omega \rightarrow R$ ، با این ویژگی که برای هر  $t \in R$  بتوان احتمالی را برای پیشامد  $X < t$  در نظر گرفت. یک متغیر تصادفی که بتواند تعداد قابل شمارشی از مقادیر حقیقی را

متغیر تصادفی  $X$  دارای توزیع یکنواخت روی فاصله  $(\alpha, \beta)$  است، اگر تابع چگالی آن بصورت زیر باشد:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta-\alpha} & \alpha < x < \beta \\ 0 & \text{در سایر نقاط} \end{cases} \quad (6)$$

بدین ترتیب تابع توزیع تجمعی متغیر تصادفی  $X$  عبارت است از:

$$F_X(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \alpha \\ \frac{x-\alpha}{\beta-\alpha} & \alpha < x < \beta \\ 1 & x \geq \beta \end{cases} \quad (7)$$

میانگین و واریانس توزیع یکنواخت فوق به ترتیب عبارتند از:  $\frac{\beta+\alpha}{2}$  و  $\frac{(\beta-\alpha)^2}{12}$ . (Bedford, 2001)

#### ۴-۳- شبیه‌سازی مونت-کارلو

به عبارت دیگر، در مونت کارلو مقدار هر پارامتری که در آن عدم قطعیت داریم، بر اساس توزیع احتمالی آن پارامتر تولید می‌شود. (Bilal, 1998) در حقیقت، شبیه‌سازی مونت کارلو روشی است برای استخراج اعداد تصادفی از توزیع‌های احتمالی، که برای حل مسائل غیرقطعی‌ای که گذر زمان در این‌گونه مسائل نقش اساسی‌ای بازی نمی‌کند، استفاده می‌شود. به این ترتیب، شبیه‌سازی مونت-کارلو، عموماً مسائل ایستا را بررسی می‌کند نه آن مسائل که روند زمانی در آنها تأثیرگذار است (Momeni, 2004).

شبیه‌سازی مونت کارلو اولین بار در جنگ جهانی دوم و در پروسه ساخت بمب‌های اتمی، برای تحلیل مشکلات احتمالی ناشی از انتشار تصادفی نوترون در موارد شکست‌پذیری که هدف از آن ساخت جدار خارجی بمب هسته‌ای بود، به کار رفت. این واژه در سال‌های اخیر با شبیه‌سازی تصادفی مترادف شده است؛ ولی در واقع نمونه‌گیری مونت کارلو حوزه خیلی محدودتری نسبت به شبیه‌سازی داشته و تکنیکی برای انتخاب اعداد تصادفی بر اساس توزیع احتمال است، که از آن در هر تکرار آزمایش شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

به طور کلی، فرآیند شبیه‌سازی یک سیستم را می‌توان در چند مرحله خلاصه نمود که الگوریتم آن عبارت است از:

- ۱- مسأله را فرموله کنید.
- ۲- معیارهای کارکرد، قوانین تصمیم و پارامترهای بحرانی سیستم را مشخص کنید.
- ۳- مدل کامپیوتری بسازید.
- ۴- اعتبار مدل را تعیین کنید.
- ۵- شبیه‌سازی را اجرا کنید.
- ۶- نتایج آماری و اطلاعات حاصل از اجرای مدل شبیه‌سازی را جمع‌آوری کنید.
- ۷- اگر تعداد مراحل شبیه‌سازی کامل شده، به مرحله ۸، و در غیر این صورت به مرحله ۵ باز گردید.
- ۸- نتایج شبیه‌سازی را تجزیه و تحلیل کنید.

لم: فرض کنید  $F$  تابع توزیعی تجمعی پیوسته و معکوس‌پذیر، و  $U$  متغیر تصادفی پیوسته و یکنواخت روی بازه  $[0, 1]$  باشد. آنگاه متغیر تصادفی  $T = F^{-1}(U)$  تابع توزیع تجمعی  $F$  را خواهد داشت؛ زیرا، بنا بر تعریف توزیع تجمعی برای تمام  $t$ های حقیقی داریم (Ross, 2010):

در ادامه به چگونگی شبیه‌سازی مونت-کارلو، که یکی از فرآیندهای مهم شبیه‌سازی است و اخیراً در بسیاری از علوم به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، پرداخته می‌شود.

اساس تمام تکنیک‌های نمونه‌گیری در مونت-کارلو لم زیر است، که می‌توان از آن برای نمونه‌گیری از هر توزیع تک متغیره پیوسته معکوس‌پذیر استفاده کرد.

$$P(T \leq t) = P(F^{-1}(U) \leq t) = P(U \leq F(t)) = F(t)$$

تغییرپذیری تقاضا مد نظر بوده است، به راحتی می‌توان روش تبدیل معکوس را برای استخراج نمونه‌ها به کار گرفت. توضیحات بیشتر در باره نحوه بکارگیری شبیه‌سازی مونت-کارلو برای تحلیل میدان در بخش بعد ارائه می‌شود.

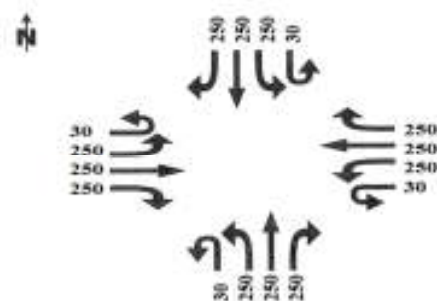
با توجه به لم بالا، برای استخراج عدد تصادفی از توزیع‌های پیوسته می‌توان از روش تبدیل معکوس<sup>۱</sup> و روش قبول و رد کردن<sup>۲</sup> (Winston and Goldberg, 2004) استفاده کرد. با توجه به این که در این مقاله تابع توزیع یکنواخت برای

## ۵- تحلیل و نتایج

### ۵-۱- توضیح داده‌ها و مقادیر پایه برای تحلیل

در این مقاله، ابتدا احجام تقاضاهای ورودی به میدان به صورت حجم ثابت فرضی در نظر گرفته شده است، به طوری که با احجام در نظر گرفته شده برای همه حرکات، پارامترهای عملکردی میدان (مانند ظرفیت، تأخیر و سطح سرویس) در سطح نرمالی قرار بگیرد. مقادیر اولیه در نظر گرفته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

منظور از میدان در این پژوهش، میدان دوخطه استاندارد مطابق با مشخصات عمومی و استاندارد ذکر شده در مرجع (FHWA, 2010) است. به‌طور کلی، در یک میدان، هر ورودی شامل چهار مسیر گردش (گردش به راست، گردش به چپ، مستقیم و واگرد) است و بنابراین یک میدان با چهار ورودی دارای شانزده مسیر ورودی گردش است.



شکل ۲. احجام ورودی اولیه بدون پراکندگی

### ۵-۲- تحلیل میدان با در نظر گرفتن پراکندگی تقاضاها

با توجه به حجم تقاضای اولیه در نظر گرفته شده، پراکندگی احجام تقاضا برای هر گردش ورودی به صورت صعودی اعمال شده است. بدین شکل که با اضافه و کم کردن  $\Delta$  (تغییرات پراکندگی حجم تقاضا) در بازه‌های ۲۰ تایی نسبت به حجم اولیه (شکل ۲) به صورت یک تابع توزیع پیوسته یکنواخت در نظر گرفته شده است، که متغیر  $(X)$  (حجم تقاضای تصادفی) دارای توزیع یکنواخت روی فاصله کمترین حجم ورودی و بیشترین حجم ورودی  $(v_l, v_u)$  است، هرگاه تابع چگالی آن به صورت (۸) باشد.

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{v_u - v_l} & v_l < x < v_u \\ 0 & \text{در سایر نقاط} \end{cases} \quad (8)$$

میدان بدون خط کناری گردش به راست و با درصد وسایل نقلیه سنگین برای هر حرکت برابر با ۲٪، ضریب ساعت اوج برابر با ۰٫۹۵ و ضریب عابر پیاده  $(f_{ped})$  برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. بر اساس این احجام ترافیکی و با بکارگیری روابط HCM 2010 تأخیری برابر با ۲۴ ثانیه بر وسیله نقلیه برای کل میدان بدست می‌آید، که سطح سرویس برای میدان (بر اساس مقادیر اولیه شده در جدول ۱) برابر با C به دست می‌آید.

در این صورت برای هر تکرار از شبیه‌سازی مونت-کارلو، برای هر گردش ورودی با توجه به بازه پراکندگی آن، یک عدد تصادفی استخراج شده و به عنوان حجم مربوط به آن اختصاص داده می‌شود. سپس با احجام بدست آمده برای همه حرکات، پارامترهای عملکردی میدان (مانند ظرفیت، تأخیر و سطح سرویس) با بکارگیری روابط HCM 2010 محاسبه گردیده است. فرآیند فوق برای تعداد تکرار مشخص شبیه‌سازی (در این جا ۱۰۰۰ بار) صورت می‌پذیرد.

با این عمل کلیه حالات و ترکیباتی که حجم‌های گردش می‌توانند با هم در ارتباط با یکدیگر داشته باشند شبیه‌سازی شده و سپس تأخیر میدان برای هر مقادیر پراکندگی احتمالاتی مشخص می‌شود. پس از آن، از مقادیر تأخیرهای بدست آمده برای تکرارهای مختلف میانگین حسابی گرفته شده و به عنوان میانگین تأخیر برای آن بازه پراکندگی به حساب می‌آید. برای انجام شبیه‌سازی‌های فوق از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. بر مبنای میانگین تأخیر به‌دست‌آمده از روش شبیه‌سازی می‌توان سطح سرویس میدان را برای هر بازه از پراکندگی احتمالاتی به‌دست آورد. پراکندگی احجام تقاضا برای گردش به راست‌ها، گردش به چپ‌ها و مسیرهای مستقیم اعمال شده است و گردش‌های واگرد به صورت احجام ثابت در نظر گرفته شده است. دلیل اینکه برای همه حرکات واگرد توزیع احتمال یکسانی در نظر گرفته شده است این است که در ادامه ذهن خواننده درگیر تأثیر میزان احجام گردش نشود و تنها بتوان تأثیر میزان پراکندگی تقاضا را نشان داد. داده‌های بدست آمده از تحلیل‌ها و محاسبات در جدول ۲ نمایش داده شده است. در این جدول، حجم تقاضای اولیه بدون تغییرات پراکندگی (نشان داده شده در شکل ۲) برابر با ۲۵۰ وسیله‌نقلیه بر ساعت است. تغییرات پراکندگی طبق  $\Delta$ های نشان داده شده افزایش پیدا کرده است که به‌صورت حجم تقاضا در بازه  $V_1$  (کمترین احجام ورودی احتمالاتی) و  $V_2$  (بیشترین احجام ورودی احتمالاتی) برای تمام گردش‌های ورودی، به غیر از گردش‌های واگرد، اعمال شده است. میانگین حسابی تأخیر از هر یک از دامنه‌های پراکندگی در جدول ۲ که هر دامنه نشان‌دهنده یک تابع پیوسته برای تقاضای احتمالاتی است - با استفاده از روش مونت-کارلو (با ۱۰۰۰ مرتبه استخراج نمونه) به دست آمده است. تأخیر

در میدان طبق جدول ۲ در شرایطی که بیشترین پراکندگی در احجام ورودی وجود دارد (۷۲۵)، ۴۸ ثانیه بر وسیله‌نقلیه را برای کل میدان به‌دست می‌دهد، که سطح سرویس برای میدان طبق جدول تعیین سطح سرویس (جدول ۱) برابر با E به دست می‌آید. بر این اساس، می‌توان گفت که با توجه به بخش ۶-۱ (زمانی که پراکندگی در احجام ورودی وجود ندارد) تأخیر وسایل‌نقلیه در میدان ۲۴ ثانیه بیشتر شده است و سطح سرویس دو درجه کاهش یافته است. اکنون با محاسبه سطح زیر منحنی از تأخیرهای به‌دست آمده از شبیه‌سازی، برای هر بازه از پراکندگی می‌توان احتمال عدم اطمینان به عملکرد میدان را تحت شرایط پراکندگی تقاضا (نسبت به حالتی که در احجام ورودی پراکندگی وجود ندارد و مقدار تأخیر ۲۴ ثانیه بر وسیله‌نقلیه است، مطابق با نتایج بخش ۶-۱) محاسبه کرد. این محاسبات برای تمام بازه‌های پراکندگی اعمال شده و در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه مقادیر این جدول، در بیشتر موارد عدم اطمینان مقداری بیش از ۰/۵۰ را به دست می‌دهد. به عبارت دیگر، میدان در بیش از ۵۰ درصد از موارد تأخیری بیشتر از تأخیر در زمانی که پراکندگی در احجام تقاضا وجود ندارد خواهد داشت.

### ۵-۳- تغییرات تأخیر با توجه به پراکندگی تقاضا

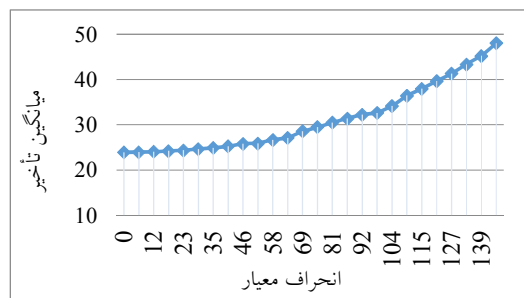
در این بخش، تأثیر میزان پراکندگی تقاضا بر تغییرپذیری تأخیر با استفاده از شاخص ضریب تغییرات بررسی می‌شود. ضریب تغییرات (ضریب پراکندگی) شاخصی است که برای اندازه‌گیری میزان پراکندگی داده‌های آماری به‌کار می‌رود و میزان پراکندگی را به ازای یک واحد از میانگین بیان می‌کند. آن گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، هرچه قدر انحراف معیار افزایش یابد شاخص تأخیر به ازای وسیله‌نقلیه در میدان افزایش پیدا می‌کند. در مواقعی که پراکندگی خیلی زیاد نشده و پراکندگی‌های کم (حدوداً تا بازه بین ۱۵۰ و ۳۵۰ وسیله‌نقلیه بر ساعت) تأخیر میدان وضعیت تقریباً مناسبی دارد و زمانی که پراکندگی احجام تقاضا در ورود به میدان از آن مقدار بالاتر می‌رود، تأخیر افزایش چشم‌گیری نشان می‌دهد.

با این عمل کلیه حالات و ترکیباتی که حجم‌های گردش می‌توانند با هم در ارتباط با یکدیگر داشته باشند شبیه‌سازی شده و سپس تأخیر میدان برای هر مقادیر پراکندگی احتمالاتی مشخص می‌شود. پس از آن، از مقادیر تأخیرهای بدست آمده برای تکرارهای مختلف میانگین حسابی گرفته شده و به عنوان میانگین تأخیر برای آن بازه پراکندگی به حساب می‌آید. برای انجام شبیه‌سازی‌های فوق از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. بر مبنای میانگین تأخیر به‌دست‌آمده از روش شبیه‌سازی می‌توان سطح سرویس میدان را برای هر بازه از پراکندگی احتمالاتی به‌دست آورد. پراکندگی احجام تقاضا برای گردش به راست‌ها، گردش به چپ‌ها و مسیرهای مستقیم اعمال شده است و گردش‌های واگرد به صورت احجام ثابت در نظر گرفته شده است. دلیل اینکه برای همه حرکات واگرد توزیع احتمال یکسانی در نظر گرفته شده است این است که در ادامه ذهن خواننده درگیر تأثیر میزان احجام گردش نشود و تنها بتوان تأثیر میزان پراکندگی تقاضا را نشان داد. داده‌های بدست آمده از تحلیل‌ها و محاسبات در جدول ۲ نمایش داده شده است. در این جدول، حجم تقاضای اولیه بدون تغییرات پراکندگی (نشان داده شده در شکل ۲) برابر با ۲۵۰ وسیله‌نقلیه بر ساعت است. تغییرات پراکندگی طبق  $\Delta$ های نشان داده شده افزایش پیدا کرده است که به‌صورت حجم تقاضا در بازه  $V_1$  (کمترین احجام ورودی احتمالاتی) و  $V_2$  (بیشترین احجام ورودی احتمالاتی) برای تمام گردش‌های ورودی، به غیر از گردش‌های واگرد، اعمال شده است. میانگین حسابی تأخیر از هر یک از دامنه‌های پراکندگی در جدول ۲ که هر دامنه نشان‌دهنده یک تابع پیوسته برای تقاضای احتمالاتی است - با استفاده از روش مونت-کارلو (با ۱۰۰۰ مرتبه استخراج نمونه) به دست آمده است. تأخیر



جدول ۲. تأثیر میزان پراکندگی احجام تقاضا بر تأخیر میدان در ۱۰۰۰ بار نمونه‌گیری به روش مونت-کارلو

پراکندگی	کم‌ترین حجم و رودی $V_1$	بیشترین حجم و رودی $V_{11}$	تغییرات تقاضا ( $\Delta$ )	انحراف معیار	میانگین حسابی تاخیر	تأخیر بیش از میانگین تاخیر بدون پراکندگی (%) (عدم اطمینان)
V <sub>0</sub>	۲۵۰	۲۵۰	$\Delta_0=0$	۰.۰	۲۳.۹۳	۰
V <sub>1</sub>	۲۴۰	۲۶۰	$\Delta_1=20$	۵.۸	۲۳.۹۴	۴۹.۹
V <sub>2</sub>	۲۳۰	۲۷۰	$\Delta_2=40$	۱۱.۵	۲۴.۰۵	۵۲.۱
V <sub>3</sub>	۲۲۰	۲۸۰	$\Delta_3=60$	۱۷.۳	۲۴.۲۲	۵۳.۵
V <sub>4</sub>	۲۱۰	۲۹۰	$\Delta_4=80$	۲۳.۱	۲۴.۳۴	۵۲.۹
V <sub>5</sub>	۲۰۰	۳۰۰	$\Delta_5=100$	۲۸.۹	۲۴.۶۶	۵۵.۹
V <sub>6</sub>	۱۹۰	۳۱۰	$\Delta_6=120$	۳۴.۶	۲۴.۹۱	۵۴.۴
V <sub>7</sub>	۱۸۰	۳۲۰	$\Delta_7=140$	۴۰.۴	۲۵.۲۵	۵۵.۳
V <sub>8</sub>	۱۷۰	۳۳۰	$\Delta_8=160$	۴۶.۲	۲۵.۸۱	۵۷.۳
V <sub>9</sub>	۱۶۰	۳۴۰	$\Delta_9=180$	۵۲.۰	۲۵.۸۹	۵۶.۱
V <sub>10</sub>	۱۵۰	۳۵۰	$\Delta_{10}=200$	۵۷.۷	۲۶.۶۸	۵۸.۶
V <sub>11</sub>	۱۴۰	۳۶۰	$\Delta_{11}=220$	۶۳.۵	۲۷.۱۱	۶۰.۹
V <sub>12</sub>	۱۳۰	۳۷۰	$\Delta_{12}=240$	۶۹.۳	۲۸.۵۸	۵۹.۹
V <sub>13</sub>	۱۲۰	۳۸۰	$\Delta_{13}=260$	۷۵.۱	۲۹.۵۲	۶۱.۵
V <sub>14</sub>	۱۱۰	۳۹۰	$\Delta_{14}=280$	۸۰.۸	۳۰.۵۰	۶۱.۱
V <sub>15</sub>	۱۰۰	۴۰۰	$\Delta_{15}=300$	۸۶.۶	۳۱.۳۹	۶۱.۸
V <sub>16</sub>	۹۰	۴۱۰	$\Delta_{16}=320$	۹۲.۴	۳۲.۲۷	۶۲.۹
V <sub>17</sub>	۸۰	۴۲۰	$\Delta_{17}=340$	۹۸.۱	۳۲.۶۴	۶۱.۷
V <sub>18</sub>	۷۰	۴۳۰	$\Delta_{18}=360$	۱۰۳.۹	۳۴.۱۷	۶۳.۱
V <sub>19</sub>	۶۰	۴۴۰	$\Delta_{19}=380$	۱۰۹.۷	۳۶.۴۵	۶۴.۴
V <sub>20</sub>	۵۰	۴۵۰	$\Delta_{20}=400$	۱۱۵.۵	۳۷.۹۹	۶۶
V <sub>21</sub>	۴۰	۴۶۰	$\Delta_{21}=420$	۱۲۱.۲	۳۹.۶۸	۶۲.۵
V <sub>22</sub>	۳۰	۴۷۰	$\Delta_{22}=440$	۱۲۷.۰	۴۱.۳۵	۶۳.۵
V <sub>23</sub>	۲۰	۴۸۰	$\Delta_{23}=460$	۱۳۲.۸	۴۳.۳۸	۶۷
V <sub>24</sub>	۱۰	۴۹۰	$\Delta_{24}=480$	۱۳۸.۶	۴۵.۲۱	۶۶.۲
V <sub>25</sub>	۰	۵۰۰	$\Delta_{25}=500$	۱۴۴.۳	۴۸.۰۶	۶۶.۳



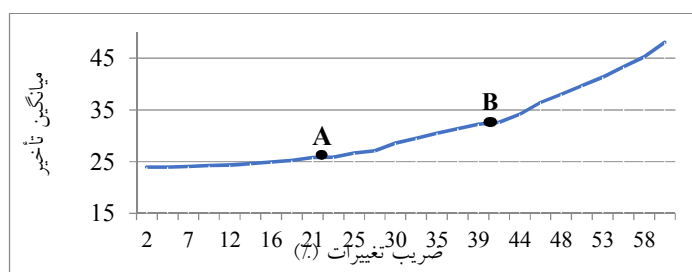
شکل ۳. تغییرات تأخیر با توجه به انحراف معیار

بررسی کرد. شکل ۵ نشان می‌دهد وقتی انحراف معیار در احجام ورودی کم است (پراکندگی در بازه بین ۲۴۰ تا ۲۶۰ وسیله نقلیه در ساعت)، تابع چگالی تأخیر بدست آمده به خوبی (در سطح معنی‌داری زیر ۰/۰۵ در آزمون آماری کلموگروف-اسمیرنوف) با تابع نرمال مطابقت خواهد داشت و میانگین آن تقریباً با مقدار تأخیر در حالتی که در احجام ورودی پراکندگی وجود ندارد و حالت میانگین برابر است. از سوی دیگر، شکل ۶ نشان می‌دهد زمانی که انحراف معیار احجام ورودی نسبت به میانگین به اوج خود می‌رسد (پراکندگی در بازه بین ۰ تا ۵۰۰ وسیله نقلیه در ساعت) تأخیر در میدان دچار تغییرات زیادی شده، به طوری که تأخیر میدان از ۱۰ تا ۱۰۰ ثانیه بر وسیله نقلیه، نوسان خواهد داشت، و در این حالت تابع توزیع تأخیر با تابع توزیع لوگ-نرمال سه‌بعدی (مجدداً در سطح معنی‌داری زیر ۰/۰۵ در آزمون آماری کلموگروف-اسمیرنوف) تطابق دارد.

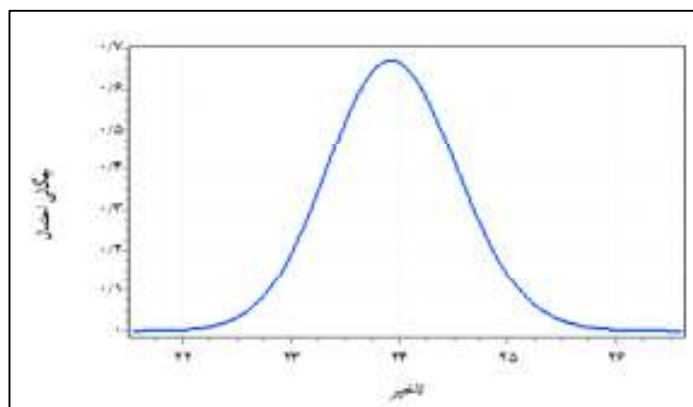
همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است ضریب پراکندگی برای هر بازه از پراکندگی احجام ورودی محاسبه شده است و با میانگین حسابی تأخیر در آن بازه آورده شده است. در شکل ۴ مقدار تأخیر با توجه به ضریب تغییرات نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ زمانی که ضریب تغییرات از ۰/۲ (نقطه A) بیشتر شود باعث ناپایداری میدان می‌شود (تغییرات جدی در سطح سرویس و تأخیر دیده خواهد شد) و هنگامی که ضریب تغییرات از ۰/۴ (نقطه B) بیشتر می‌شود نمودار تأخیر شیب بیشتری پیدا کرده است و میدان ناپایدارتر می‌شود. یکی از نتایج مهمی که در تحلیل قابلیت اطمینان به یک سیستم همواره مطرح است نوع توزیع احتمالی است که می‌توان به توزیع احتمالی شاخص عملکردی آن سیستم برازش داد، زیرا از طریق توزیع‌های به‌دست‌آمده می‌توان عملکرد سیستم را براحتی (تنها با داشتن پارامترهای توزیع، از قبیل میانگین، واریانس، ضریب چولگی و غیره)

جدول ۳. میزان ضریب تغییرات برای هر بازه از پراکندگی تقاضا

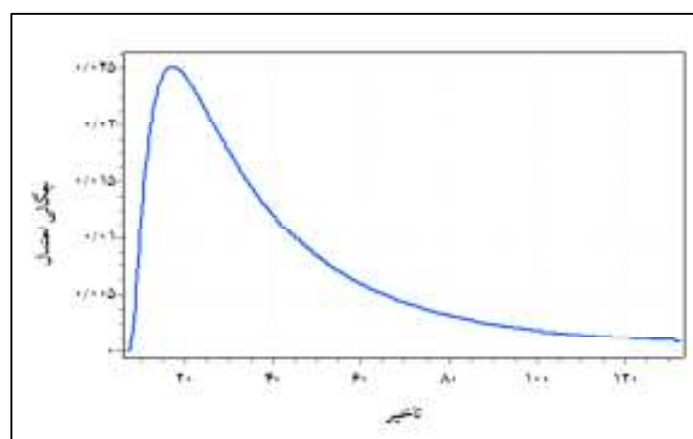
پراکندگی	میانگین حسابی تأخیر	ضریب تغییرات	پراکندگی	میانگین حسابی تأخیر	ضریب تغییرات
V ۰	۲۳.۹۳	۰.۰۰	V ۱۳	۲۹.۵۲	۳۰.۰۲
V ۱	۲۳.۹۴	۲.۳۱	V ۱۴	۳۰.۵۰	۳۲.۳۳
V ۲	۲۴.۰۵	۴.۶۲	V ۱۵	۳۱.۳۹	۳۴.۶۴
V ۳	۲۴.۲۲	۶.۹۳	V ۱۶	۳۲.۲۷	۳۶.۹۵
V ۴	۲۴.۳۴	۹.۲۴	V ۱۷	۳۲.۶۴	۳۹.۲۶
V ۵	۲۴.۶۶	۱۱.۵۵	V ۱۸	۳۴.۱۷	۴۱.۵۷
V ۶	۲۴.۹۱	۱۳.۸۶	V ۱۹	۳۶.۴۵	۴۳.۸۸
V ۷	۲۵.۲۵	۱۶.۱۷	V ۲۰	۳۷.۹۹	۴۶.۱۹
V ۸	۲۵.۸۱	۱۸.۴۸	V ۲۱	۳۹.۶۸	۴۸.۵۰
V ۹	۲۵.۸۹	۲۰.۷۸	V ۲۲	۴۱.۳۵	۵۰.۸۱
V ۱۰	۲۶.۶۸	۲۳.۰۹	V ۲۳	۴۳.۳۸	۵۳.۱۲
V ۱۱	۲۷.۱۱	۲۵.۴۰	V ۲۴	۴۵.۲۱	۵۵.۴۳
V ۱۲	۲۸.۵۸	۲۷.۷۱	V ۲۵	۴۸.۰۶	۵۷.۷۴



شکل ۴. تغییرات میانگین تأخیر با توجه به ضریب تغییرات تقاضا



شکل ۵. تابع چگالی تأخیر احجام تقاضا ورودی با کمترین انحراف معیار تقاضا (پراکندگی بین ۲۴۰ تا ۲۶۰ وسیله نقلیه بر ساعت)



شکل ۶. تابع چگالی تأخیر احجام تقاضا ورودی با بیشترین انحراف معیار تقاضا (پراکندگی بین ۰ تا ۵۰۰ وسیله نقلیه بر ساعت)

#### ۵-۴- تحلیل میدان با تحت شرایط تقاضای ثابت برای حرکات گردشی

شرایطی که حجم گردش به‌راست‌ها به میدان ثابت در نظر گرفته شود، به‌دست آمده است. با توجه به این که حجم گردش به راست‌ها ثابت است برای گردش‌های دیگر بازه‌های تغییرات تقاضاهای در نظر گرفته شده را اعمال کرده و تأخیر برای آن بازه مشخص محاسبه می‌شود. از این طریق می‌توان تأثیر تغییرات حجم ورودی گردش به‌راست‌ها را بر ظرفیت میدان به‌صورت واضح‌تری مشاهده کرد. تمام این مراحل برای گردش‌های مستقیم و گردش به‌چپ‌ها نیز اعمال شده است. به این شکل که یک بار گردش‌های مستقیم ثابت در نظر گرفته شده است و یک بار گردش‌های مستقیم و همانند مراحل گفته شده در حالتی که گردش به‌راست ثابت بود، فرآیند تکرار شده است. برای تمام بازه‌های تغییرات تقاضا در شرایطی که به ترتیب گردش به راست‌ها، گردش‌های مستقیم و گردش به‌چپ‌ها ثابت در نظر گرفته شوند، بررسی به‌روش

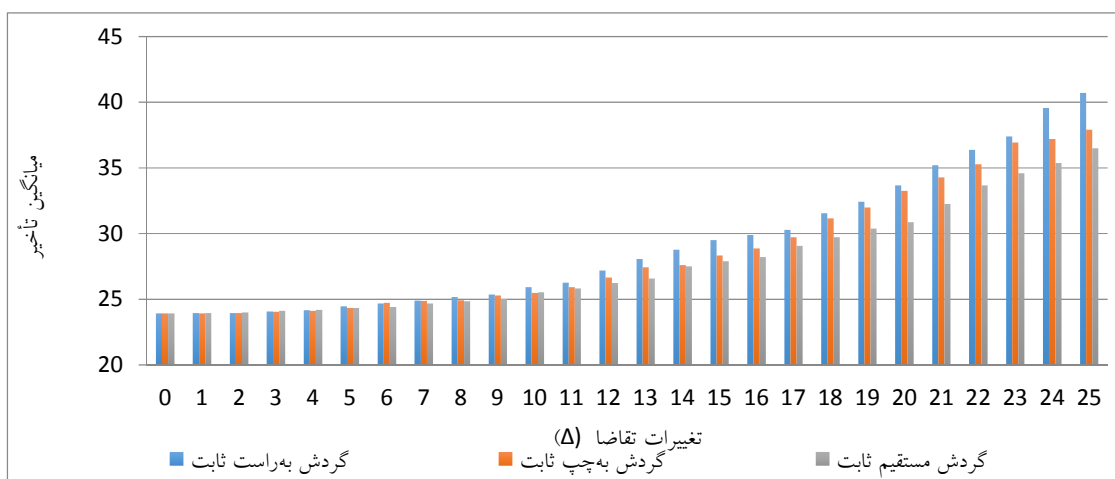
با توجه به تغییرات در نظر گرفته شده برای تقاضاهای ورودی، در این بخش تغییرات تقاضا برای هر کدام از گردش‌های ورودی ثابت در نظر گرفته می‌شود، تا از این طریق سهم هر حرکت گردشی در عملکرد میدان بر اثر تغییرپذیری تقاضا مشخص شود. برای مثال، برای تعیین سهم گردش به‌راست‌ها، ابتدا کل گردش به‌راست‌های ورودی بدون تغییرات تقاضا در نظر گرفته شده است (یعنی مقدار ثابت ۲۵۰ وسیله‌نقلیه در ساعت برای آن‌ها منظور شده است) و تغییرات تقاضای ورودی برای گردش‌های دیگر طبق بخش اعمال شده است. برای تحلیل عملکرد میدان، دقیقاً روش توضیح داده شده در بخش به کار گرفته شده است، یعنی روش مونت-کارلو برای هر دامنه از تغییرات تقاضا نمونه‌گیری انجام شده و از تأخیرهای بدست آمده از نمونه‌ها، میانگین حسابی گرفته شده است و به این شکل تأخیر برای آن بازه از تغییرات تقاضا در

گردش به چپ‌ها ثابت در نظر گرفته شوند تأخیر نسبتاً کمتری بدست آمده است و این به علت تأثیرگذاری کمتر گردش‌های مستقیم و گردش به راست‌ها بر ظرفیت میدان باز هم به دلیل تداخل کمتر در بدنه میدان است. در شکل ۷ میزان تأثیرگذاری تغییرات تقاضای گردش‌ها به طور مشخص تری نمایش داده شده است که با توجه به این شکل در پراکندگی‌های کم تأخیر برای تمام حالات در نظر گرفته شده یکسان است و زمانی که تغییرات تقاضا بالاتر می‌رود تأثیر تغییرات تقاضای گردش به‌راست‌ها با رشد بیشتری همراه است.

مونت-کارلو انجام شده و تأخیر برای هر بازه به دست آمده است. جدول ۴ مقادیر این تأخیرها را برای حالات مختلف ارائه می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، تأثیرپذیری تأخیر میدان در شرایطی که گردش به‌راست‌ها ثابت در نظر گرفته شوند بیشتر از دیگر حالت‌ها است. می‌توان گفت در این حالت تغییرات تقاضا در گردش‌های مستقیم و گردش به چپ‌ها باعث بروز این تأخیرها شده است، و در حقیقت گردش به راست کمترین تأثیر را بر عملکرد احتمالاتی میدان خواهد داشت. این موضوع در حالت غیراحتمالاتی نیز به دلیل کمترین میزان تداخل راستگردها بدیهی و واضح است. در حالتی که

جدول ۴: تأخیر میدان بدون خط گردش به‌راست در بازه‌های تغییرات تقاضا (در ۱۰۰۰ بار تکرار شبیه‌سازی)

تغییرات تقاضا ( $\Delta$ )	میانگین حسابی تأخیر در حالت گردش به‌راست ثابت	میانگین حسابی تأخیر در حالت گردش مستقیم ثابت	میانگین حسابی تأخیر در حالت گردش به‌چپ ثابت
۰	۲۳,۹۳	۲۳,۹۳	۲۳,۹۳
۲۰	۲۳,۹۶	۲۳,۹۴	۲۳,۹۴
۴۰	۲۳,۹۷	۲۳,۹۶	۲۴,۰۰
۶۰	۲۴,۰۸	۲۴,۰۶	۲۴,۱۴
۸۰	۲۴,۱۹	۲۴,۱۳	۲۴,۲
۱۰۰	۲۴,۴۷	۲۴,۳۵	۲۴,۳۵
۱۲۰	۲۴,۶۹	۲۴,۷۳	۲۴,۴۲
۱۴۰	۲۴,۹۲	۲۴,۸۸	۲۴,۶۸
۱۶۰	۲۵,۱۷	۲۴,۹۴	۲۴,۸۷
۱۸۰	۲۵,۳۷	۲۵,۳۰	۲۵,۰۳
۲۰۰	۲۵,۹۳	۲۵,۴۹	۲۵,۵۴
۲۲۰	۲۶,۲۷	۲۵,۹۳	۲۵,۸۴
۲۴۰	۲۷,۲	۲۶,۶۶	۲۶,۲۶
۲۶۰	۲۸,۰۷	۲۷,۴۳	۲۶,۵۸
۲۸۰	۲۸,۷۸	۲۷,۶۱	۲۷,۵۱
۳۰۰	۲۹,۵۲	۲۸,۳۴	۲۷,۹۱
۳۲۰	۲۹,۹	۲۸,۸۸	۲۸,۲۳
۳۴۰	۳۰,۲۸	۲۹,۷۳	۲۹,۰۸
۳۶۰	۳۱,۵۶	۳۱,۱۶	۲۹,۷۴
۳۸۰	۳۲,۴۳	۳۲	۳۰,۴
۴۰۰	۳۳,۶۸	۳۳,۲۷	۳۰,۸۸
۴۲۰	۳۵,۲	۳۴,۲۸	۳۲,۲۶
۴۴۰	۳۶,۳۸	۳۵,۲۸	۳۳,۶۷
۴۶۰	۳۷,۴۱	۳۶,۹۳	۳۴,۶۱
۴۸۰	۳۹,۵۷	۳۷,۲۱	۳۵,۳۷
۵۰۰	۴۰,۷۱	۳۷,۹۲	۳۶,۴۹



شکل ۷. مقایسه ظرفیت میدان با توجه به تغییرات تقاضا در حرکات گردشی مختلف

## ۶- نتیجه گیری

شود بیشتر است، که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر گردش به چپ‌ها بر ظرفیت میدان در شرایط احتمالاتی است (این موضوع در شرایط غیراحتمالاتی به دلیل حرکات بافتی و تداخلی بیشتر ایجاد شده توسط چپگردها و مستقیم‌روها واضح و بدیهی است). در پایان، موضوعاتی مانند تحلیل میدان‌های چندخطه، به‌کارگیری انواع توابع توزیع در محاسبات و تعیین تفاوت آنها، تعیین پایداری میدان تحت شرایط مختلف تغییرپذیری تقاضا، تأثیر جداسازی گردش به‌راست‌ها با خط کناری و حذف گردش‌های واگرد در میدان با ایجاد بریدگی قبل از مسیر ورودی، بر ظرفیت میدان و مسیر منتهی به آن، و همچنین کاربرد روش ارایه‌شده در این مقاله برای موارد واقعی، به‌عنوان موضوعات با اهمیت برای پژوهش‌های آتی توصیه می‌شود.

در این پژوهش ظرفیت میدان دوخطه استاندارد (مطابق با مراجع (HCM, 2010; FHWA, 2010) تحت شرایط تغییر پراکندگی احجام تقاضا مورد تحلیل قرار گرفت و ظرفیت میدان در حالتی که حجم‌های گردش‌ها به‌طور مجزا ثابت در نظر گرفته شود تحت بررسی قرار گرفت. برای محاسبه میانگین تأخیر و به دست آوردن تابع چگالی تأخیر برای هر بازه از پراکندگی تقاضا از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش پراکندگی احجام ورودی برای عبور از میدان، تأخیر وسایل نقلیه در میدان به‌طور فزاینده‌ای زیاد می‌شود به طوری که پراکندگی زیاد برای حجم‌های ورودی می‌تواند سطح سرویس میدان را نسبت به زمانی که پراکندگی در تقاضا ورود وجود ندارد (حالتی که مقدار حجم‌های ورودی به میدان نوسان زیادی نداشته باشد) دو درجه نامطلوب‌تر سازد. تحلیل‌ها نشان می‌دهد در طرح میدان، با توجه به عدم ثبات در تقاضای عبوری از این تسهیلات، می‌بایست نامطلوب شدن سطح خدمت و کاهش ظرفیت میدان مدنظر گرفته شود. ظرفیت میدان در شرایطی که حجم‌های ورودی راستگرد، ثابت در نظر گرفته شود نسبت به شرایطی که حرکات چپگرد و مستقیم ثابت در نظر گرفته

## ۷- پی‌نوشت‌ها

1. Monte-Carlo Simulation
2. Inverse Transformation Method (ITM)
3. Acceptance-Rejection Method (ARM)
4. Coefficient of Variation (COV)

## ۸- مراجع

- مومنی، م.، (۱۳۷۳)، "پژوهش عملیاتی (مدل‌های احتمالی)"، سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها.
- Ren, L., Qu, X., Guan, H., Easa, S., Oh, E., (2016), "Evolution of roundabout capacity models: an empirical case study", *Journal of Transportation Engineering*, 142 (12), pp.73- 89.
- Rodegerdts, M.B., E. Wemple, E. Myers, M. Kyte, M. Dixon, G. List, A. Flannery, R. Troutbeck, W. Brilon, N. Wu, B. Persaud, C. Lyon, D. Harkey, and Carter, D., (2010), "Roundabouts: an informational guide, NCHRP 672", *Transportation Research Board of the National Academies: Washington D.C.*
- Ross, S.M., (2010), "A first course in probability", Prentice Hall.
- Troutbeck, R.J., (1991), "Recent Australian unsignalized intersection research and practices", *Intersections without traffic signals II*. Springer-Verlag (Werner Brilon. Ed.), pp.238-257.
- Troutbeck, R.J., (1986), "Average delay at an unsignalized intersection with two major streams each having a dichotomized headway distribution, *Transportation Science*, 20(4), pp.272-286.
- Winston, W.L., and Goldberg, J.B., (2004), "Operations Research: Applications and Algorithms: Wadsworth", Inc.
- Will, R., Younshik, C., Jiyoung, P, and Lesley, W., (2004), "Considering Risk Taking Behavior in Travel Time Reliability", *Institute of Transportation Studies University of California*.
- "WSDOT Design Manual", (2017), "WSDOT Headquarters Development Division, Design Office Attn: Policy, Standards, and Research Section PO Box 47329", M 22-01.14.
- Zhaowei, QU. Yuzhou, D., (2014), "Review and Outlook of Roundabout Capacity", XING Yan College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China, Cite this article as: *J Transport Sys Eng. & IT*, 14(5), pp.15-22.
- Ziolkowski, R., (2014), "Roundabouts as an Effective Tool of Traffic Management, Bialystok University of Technology", Faculty of Civil and Environmental Engineering, Wiejska st. 45E, Bialystok, Poland, pp.315-351.
- Al-Madani, H.M.N., (2013), "Formulation of large roundabout capacity under high demand flows, Department of Civil Engineering and Architecture, College of Engineering, University of Bahrain, Bahrain, *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*", 66, pp. 83-96.
- Bargegol, I., Gilani, V. N. M., Ghasedi, M., & Ghorbanzadeh, M., (2016), "Delay Modeling of Un-signalized Roundabouts Using Neural Network and Regression", *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*, 2 (1).
- Bedford, T. and Cooke, R., (2001), "Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods", Cambridge U. P. Cambridge, UK.
- Behbahani, H., Ziari, H., Amini, A., Moghaddam Gilani, V. N., & Salehfard, R., (2016), "Investigation of Signalized Roundabouts Delay with Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System and Fuzzy Logic", *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*, 2 (4), pp.1-7.
- Bilal, A.M., (1998), "Uncertainty Modeling and Analysis in Civil Engineering", CRC Press.
- Giuffrè, O., Granà, A., Tumminello, M. L., (2017), "Exploring the uncertainty in capacity estimation at roundabouts", *European Journal of Transportation Research Review*, 9 (18), pp.1-13.
- HCM, (2010), "Highway Capacity Manual, Chapter 21 Roundabouts", *Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., US*.
- Lenters, M., (2010), "HCM Roundabout capacity methods and alternative capacity models", *Institute of Transportation Engineers (ITE Journal)*, 80 (7), pp.1-19.
- Mahesh, S., Ahmad, A., Rastogi, R., (2016), "An approach for the estimation of entry flows on roundabouts" *Transportation Research Procedia*. Vol. 17, pp. 52-62.
- Mohammad, M. H. M. A Bashar and Akhter S., (2008), "Travel Demand Management (TDM) For Improved Transportation". *Journal of Quality and Technology Management*. Vol. Iv., Issue ii.

# Measuring the Performance of Standard Two-Lane Roundabouts under Demand Uncertainty Using Monte Carlo Simulation Technique

*Mohsen Babaei, Assistant Professor, Civil Engineering Department,  
Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.  
Payam Sajadi, M.Sc., Grad., Engineering Faculty, University College of Omran  
and Tosseeh, Hamedan, Iran.*

*E-mail: m.babaei@basu.ac.ir*

Received: July 2022- Accepted: November 2022

## **ABSTRACT**

Roundabout capacity is one of the most important features influencing the position of the roundabouts as traffic facilities. Many of the roundabouts that have been designed and implemented in the past today are faced with capacity problems, so that in most cases they need to be redesigned. The appropriate operation of a transportation facility will be possible only when the demand and capacity are matched. In other words, in order to meet the exact demand, we need to create the appropriate capacity for facilities at certain levels of service. However, in real-world conditions, it is difficult to assume exact quantities of demand due to fluctuations over different periods of operation. In this research, the capacity of two-lane roundabouts has been analyzed with respect to demand variability. In order to consider the dispersion of demand, demand is considered as a uniform probability distribution function. The method of Highway Capacity Manual (HCM2010) has been used to determine the roundabout capacity. Monte Carlo simulation method is adopted to evaluate the control delay of the roundabout under demand variability. The results of this study show that, by increasing the variability of demand, the control delay will increase drastically, so that a high dispersion of entry volumes can make the level of service of the roundabout two times less compared with when the demand is constant.

**Keywords:** Demand Variability, Control Delay, Two-Lane Roundabouts, Monte Carlo Simulation