فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱٤، شماره ٤، تابستان ۱٤۰۲، ص. ۲۹۳۵-۲۹۱۷

مقاله علمی-پژوهشی

سنجش عدم‌قطعیت تقاضای سفر با شبیه‌سازی مونت‌کارلو و بررسی تاثیر مولدهای تصادفی‌گون

رضا جهانشاهی، کارشناس ارشد راه‌وترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

ایمان آقایان، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

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

E-mail: ahadchoupani@shahroodut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰٤/۰٤ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۲

چکیده

انجام نشدن مطالعات عدم قطعیت در برآورد تقاضای سفر، باعث روبرآورد شدن تقاضا و زیان‌ده شدن برخی پروژه‌های زیربنایی حمل‌ونقل شده است. سرمایه‌گذاری روی زیرساخت‌هایی با بازدهی اقتصادهی کمتر اما مطمئنتر (ریسک کمتر)، موردتوجه می‌باشد. شبیه‌سازی مونت کارلو، یکی از رایجترین روش‌ها برای بررسی عدم قطعیت و تحلیل حساسیت است. یکی از پایه‌های اصلی مونت کارلو، به کارگیری مولدهای تصادفی مناسب برای تولید اعداد تصادفی با یکنواختی بالا است. اما یکنواختی اعداد تصادفی تولیدشده توسط مولدهای شبه تصادفی، ممکن است گاهی خوب و گاهی ضعیف باشد. اما مولدهای تصادفی‌گون سعی در تولید دنباله اعداد تصادفی قطعی با یکنواختی بیشتر و در نتیجه پرکردن بهتر ابرمکعب واحد دارند. لذا ضرورت دارد عدم قطعیت مدل‌های تقاضای سفر و تاثیر مولدهای اعداد تصادفی بررسی شود. این مقاله به دنبال سه هدف اصلی است: ۱- میزان عدم قطعیت مدل‌های تقاضا (تولید و جذب) سفر را بسنجد؛ ۲- با استفاده از تحلیل حساسیت، متغیرهای ورودی که بیشترین نقش را در عدم قطعیت مدل‌ها دارند، رتبه‌بندی کند؛ و ۳- تاثیر مولدهای شبه تصادفی و تصادفی‌گون را بر عدم قطعیت بررسی کند. نتایج پژوهش نشان داد مدل تولید و جذب سفر عدم قطعیت ورودی‌ها را کاهش می دهد و عدم قطعیت مدل‌های جذب بیشتر از مدل‌های تولید است. مولد شبه تصادفی ابرمکعب لاتین و مولد تصادفی‌گون هالتون، پایداری بیشتری دارند.

واژگان کلیدی: عدم قطعیت، تحلیل حسایت، شبیه‌سازی مونت کارلو، تقاضای سفر، تولید و جذب، مولدهای تصادفی، دنباله هالتون

۱. مقدمه

مدل‌های پیش‌بینی تقاضای سفر، برای برآورد حجم تردد، و زمان، و هزینه‌های سفر در شبکه‌های حمل و نقل مکررا استفاده می‌شوند. همچنین این مدل‌ها برای عارضه سنجی پروژه‌های زیرساختی (نظیر احداث راه، سیستم‌های انبوه بر) یا سیاست-گذاری‌ها (نظیر قیمت‌گذاری) به‌کار می‌روند. علیرغم آنکه در کارهای تحقیقاتی و عملی، مدل های برآورد تقاضا بسیار مورد توجه بوده‌اند، این مدل‌ها از مشکلات ذیل رنج می‌برند:

۱. خروجی‌های نهایی این مدلها، تنها منجر و محدود به برآوردهای نقطه‌ای می‌شود؛ در حالی‌که برای تصمیم گیران، داشتن یک بازه از مقادیر محتمل خروجی، به‌همراه احتمال رخداد هریک، در مقایسه با داشتن تنها یک خروجی نقطه‌ای با بالاترین احتمال رخداد، از اهمیت بالاتری برخوردار است. تحلیل‌های ناشی از برآوردهای نقطه‌ای همواره نتایج غیر قابل اعتمادی را تولید می‌کند و تصمیماتی که بر اساس آن‌ها اتخاذ می‌شوند، پیامدهای غیرقابل انتظاری دارند [De Jong et al., 2007].

۲. پروژه‌های زیربنایی حمل‌ونقل در سرتاسر دنیا اجرا شده-اند. اما پس از ساخت، مشاهده‌شده که مقدار تقاضای واقعی به مقدار قابل توجهی کمتر از تقاضای برآوردی است و باعث زیان‌ده شدن این پروژه‌ها شده است [Flyvbjerg, 2017] . در این حوزه‌ها، سرمایه‌گذاری روی پروژه‌هایی که به طور میانگین بازدهی کمتر را داشته اما در عین حال ریسک و عدم قطعیت کمتری را شامل می‌شود، بیشتر مورد توجه می‌باشد. محاسبه‌ی عدم قطعیت مدل‌های تقاضای سفر، منجر به تصمیم‌گیری بهتر تصمیم‌گیران می‌شود.

برای کاهش عدم اعتماد به برآورد تقاضای سفر، بررسی عدم قطعیت این مدل‌ها، ضرورت دارد. به طور کلی عدم قطعیت به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌شود: ۱) عدم قطعیت تصادفی[۱] و ۲) عدم قطعیت شناختی[۲] [Helton, Brooks and Sallaberry, 2020]. عدم قطعیت تصادفی از آنجا ناشی می-شود که سیستم مورد بررسی، به اشکال گوناگونی رفتار می‌کند و تصادفی بودن، ویژگی ذاتی سیستم مورد مطالعه می‌باشد. در حالیکه عدم قطعیت شناختی از ناتوانی در تعیین مقدار دقیق متغیری که مقدار دقیق و مشخصی دارد، ناشی می‌شود.

برای درک بهتر موضوع عدم قطعیت، فرض کنید در دنیای واقعی بین متغیر (یا مجموعه متغیرهای) مستقل x و متغیر وابسته y رابطه‌ای به صورت $y=f(x)$ وجود دارد. هدف مدلساز به دست آوردن این رابطه و کاربرد آن برای پیش بینی آتی است. اما مدلساز از این رابطه واقعی، آگاهی و شناختی ندارد و به جای آن یک رابطه‌ای را به صورت $f'(x)$ با انجام برخی فرضیات ساده کننده تخمین می زند و برآورد می کند. چون به جای f واقعی از f' تخمینی استفاده شده، به جای مقدار y واقعی، مقدار y' که تخمینی و تقریبی هستند، به دست می‌آید. به این عدم قطعیت، عدم قطعیت مدل گفته می‌شود چرا که مقادیر y' ناشی از عدم اطمینان در f است. به عنوان مثال هنگام به دست آوردن f، شاید فرض شود این رابطه خطی است، اما ممکن است اندکی رابطه غیر خطی بین x و y موجود باشد.

از سویی دیگر، حتی مقادیر x یا ورودی‌های تابع f نیز دارای عدم قطعیت خواهند بود. به عنوان مثال، اگر هدف ساخت مدل تولید سفرهای کاری (y) در سال ۱۳۹۷ باشد و جمعیت نیز یکی از متغیرهای تاثیرگذار (یعنی x) باشد، از آنجاییکه سرشماری نفوس و مسکن هر ۵ سال یکبار انجام می شود، مقدار واقعی جمعیت درسال ۱۳۹۷ نیز مشخص نیست و از تخمین به دست می‌آید. لذا هنگام به دست آوردن رابطه f'، عدم قطعیت x، سبب بروز عدم اطمینان در f و نهایتا y خواهد شد.

پس دوعامل بر مقادیر y و عدم قطعیت آن تاثیر دارد: ۱) عدم قطعیت x یا ورودی های تابع[۳] که از آن به عدم قطعیت ورودی-های مدل یاد می‌شود. ۲) عدم قطعیت تابع f و مشخصات تابع که از آن به عدم قطعیت مدل[۴] یاد می شود و عبارت است از الف) خطای مشخصات مدل[۵] (فرضیات نامناسب درباره فرم تابع

یا توزیع‌های آماری برای پارامترهای تابع). ب) خطای ناشی از استفاده از پارامترهای تخمین زده شده به جای مقادیر حقیقی. [Verma, 2018]

مطالعات عدم قطعیت را می‌توان در سه مرحله پیش مدلسازی، مدلسازی، و پس مدل‌سازی انجام داد [Helton and Davis, 2002]. هدف از مطالعات عدم قطعیت در مرحله پیش مدلسازی که یک غربالگری اولیه است، کاهش ابعاد مساله از طریق کاهش تعداد متغیرهای x تاثیرگذار روی y است. در این مرحله از بین تعداد زیادی متغیر مستقل، متغیرهای x که تاثیری بر y ندارند حذف می‌شود. این اقدام، همان تحلیل حساسیت است و متغیرهای غیرحساس حذف می‌شوند. در مرحله مدلسازی، هدف، انتخاب یک f' مناسب از بین چندین f' است یا حذف متغیرهایی است که از نظر آماری بی اهمیت یا کم اهمیت هستند. عدم قطعیت پس از مدلسازی زمانی اهمیت پیدا می‌کند که محقق نیاز دارد موارد زیر را تعیین کند: ۱) کدام ورودی‌ها بیشترین تاثیر را در عدم قطعیت خروجی‌ها دارند؟ ۲)کدام متغیر نیاز به تحقیق بیشتر، برای تقویت دانش پایه و بالطبع کاهش عدم قطعیت دارد.

در ادبیات موضوع، تمرکز اصلی محققان بر روی عدم قطعیت ورودی مدل [De Jong et al., 2007]و پیشروی خطا[۶] [Rasouli and Timmerman, 2012]. بوده است. از جمله، طی تحقیقی که توسط دی جونگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ انجام شد ، مشخص شد تاثیر عدم قطعیت متغیرهای ورودی نظیر سرانه مالکیت خودرو و درآمد خانوار بر مدل همزمان انتخاب مقصد و وسیله سفر، تا حد زیادی از عدم قطعیت مدل و ضرایب آن بیشتر می‌باشد. در مدل‌های چهارمرحله‌ای برآورد تقاضای سفر، خروجی هر مرحله، ورودی مرحله بعد است. خروجی مرحله ایجاد، توزیع و تفکیک سفر، به ترتیب ورودی مراحل توزیع، تفکیک و تخصیص سفر است. لذا یکی از مسایلی که در عدم قطعیت مدل‌های ٤ مرحله‌ای مورد توجه قرار گرفته تاثیر توالی و پی‌آیند این مراحل بر پیش روی و انتشار خطا است. ژائو و کوکلمن دریافتند که عدم قطعیت در سه مرحله اول (یعنی ایجاد سفر، توزیع سفر و انتخاب وسیله) تشدید می‌شود و در مرحله پایانی (تخصیص سفر) کاهش می‌یابد. اما عدم قطعیت در انتهای ٤ مرحله کمتر از عدم قطعیت ابتدای چهار مرحله نخواهد بود [Zhao and Kockelman, 2002] و مدل‌های چهارمرحله‌ای در نهایت، عدم قطعیت ورودی‌ها را افزایش می‌دهند.

افندی زاده، غفاری و همکاران (۲۰۱۱) تاثیر عدم قطعیت جعبه‌ای تقاضا را بر مساله طراحی شبکه حمل و نقل با الگوریتم های زیستی بررسی کردند. این نوع مدلسازی عدم قطعیت برای ارزیابی نوسانات و درنظر گرفتن اثر خطا در برآوردهای ماتریس تقاضا قابل استفاده است.

مانزو و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، تاثیر ۱) روش تخصیص، و ۲) شلوغی شبکه ۳) نوع تابع چگالی احتمال متغیرها و پارامترها، را بر عدم قطعیت مدل‌های چهارمرحله‌ای تقاضای سفر بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند تخصیص تعادل کاربر تصادفی[۷] نسبت به تعادل کاربر[۸] تاثیر کمتری بر عدم قطعیت حجم کمان دارد. سطح شلوغی شبکه نیز تاثیر چندانی بر عدم قطعیت مدل‌های چهار مرحله‌ای و انتشار خطا ندارد؛ ولی به میزان اندکی باعث افزایش پراکنش حجم کمان‌های شلوغ می‌شود.

بسر هوگوسون (۲۰۰۵) به منظور برآورد پارامترهای مدل‌های انتخاب وسیله و مقصد سفر از روش بوت استرپ[۹] که یک روش بازنمونه‌گیری[۱۰] با جایگذاری از نمونه اصلی است، استفاده کرد. با توجه به اینکه تعداد نمونه اصلی برابر با n است در بوت استرپ می‌توان بی‌نهایت زیرنمونه با اندازه n (یا با هر اندازه دلخواه دیگر) ایجاد کرد و برای برآورد مجدد پارامترها از آن کمک گرفت. نتایج نشان داد هرچه ماتریس تقاضا و حجم تردد مسیر مورد نظر بزرگتر باشد، خطای استاندارد برآورد پارامترها هم بیشتر است.

رودیر و جانستون (۲۰۰۲) به ارزیابی تغییرات جمعیت، اشتغال، قیمت سوخت و درآمد ورودی‌های مدل بر مدل‌های تقاضای

سفر و انتشار آلاینده‌ی منطقه ساکرامنتو، ایالات متحده پرداختند. نتایج نشانگر آن بود که جمعیت و اشتغال، به طور قابل توجهی در پیش‌بینی تقاضای سفر و انتشار آلاینده موثرند. این در حالیست که درآمد خانوار و قیمت سوخت تاثیر چندانی نداشت.

آرموگام (۲۰۰۳) از روش جک‌نایف[11] برای ایجاد نمونه‌های متمایز و تخمین واریانس و بازه‌ی اطمینان فراوانی سفر و مسافت سفرروزانه استفاده کرد و عدم قطعیت ورودی را به وسیله‌ی سناریوهای مختلف جمعیتی بدست آورد. نتایج برای دوشهر مونترال، کانادا، و پاریس، فرانسه نشان داد که با طولانی شدن افق‌های زمانی، عدم قطعیت افزایش می‌یابد و مدل کمتر قابل اطمینان است. همچنین عدم قطعیت فراوانی سفر بیشتر از مسافت سفر بود.

روش‌های متعددی برای آنالیز عدم قطعیت مدل‌های ریاضی وجود دارد. اما روش‌های مبتنی بر نمونه‌گیری، که از میان آنها شبیه‌سازی مونت کارلو شناخته شده‌تر است، به خاطر مزایای ذیل روش بهتری برای بررسی عدم قطعیت هستند:

۱. مستقل بودن از نوع مدل و نحوه پرداخت آنها.

۲. استخراج نتایج تحلیل عدم قطعیت به طور مستقیم و بدون استفاده از مدل‌های جایگزین (نظیر سری تیلور) به عنوان تقریبی از مدل اصلی.

۳. سادگی مفهومی و سهولت اجرای آن (عدم نیاز به انتگرال گیری چندمتغیره یا حل معادلات دیفرانسیل).

٤. کارآیی این روش برای اعتبار سنجی. از طریق تناظر ورودی‌های غیر قطعی به نتایج مدل، ابزاری قدرتمند برای شناسایی خطاها و منشا آنها در ساختار مدل فراهم می‌آورد.

۵. بازتولید مقادیر تصادفی و غیرقطعی به صورت متراکم و فشرده با استفاده از مولدهای اعداد تصادفی. در این روش می توان مقادیر تصادفی زیادی برای هر متغیر تولید کرد و تاثیر آنرا بر عدم قطعیت ارزیابی کرد.

شبیه‌سازی مونت کارلو، یک ابزار معتبر برای ارزیابی عدم قطعیت خروجی‌های مدل‌های برآورد تقاضا است. عدم قطعیت به دنبال دو هدف اصلی است: ۱) با توجه به عدم قطعیت ورودی (x)، عدم قطعیت خروجی y(x) چه مقدار است؟ ۲) متغیرهایی که بیشترین تاثیر را بر عدم قطعیت خروجی دارد، اولویت‌بندی کند [Helton et al., 2006].

یکی از پایه‌های اصلی شبیه‌سازی مونت کارلو، به‌کارگیری مولدهای تصادفی کارا و مناسب برای تولید اعداد تصادفی با یکنواختی بالا است. چون برای تولید اعداد تصادفی از یک قاعده و قانون تبعیت می‌شود، نمی‌توان اعداد تولید شده را کاملا تصادفی دانست. لذا بیشتر مولدها، اعدادی شبیه به اعداد تصادفی تولید می‌کنند. به طور کلی دو نوع مولد اعداد تصادفی وجود دارد [Eskandari Chechegloo and Fathi Vajargah, 2013]:

۱) مولدهای شبه‌تصادفی (PRNG's) [12]

۲) مولدهای تصادفی‌گون (QRNG's) [13]

اعداد از نوع PRNG's اعدادی شبه‌تصادفی هستند که وابسته به مقدار اولیه‌ای تصادفی هستند که به عنوان هسته اولیه[14] برای تولید زنجیره اعداد تصادفی انتخاب می شوند. اعداد تصادفی که توسط این روش بازگشتی تولید می‌شود، با احتمال بسیار کمی ممکن است تکرار شوند. از این میان می‌توان به مولد همنهشتی خطی (LCG)[15] اشاره نمود. ولی اعداد از نوع QRNG's اعدادی هستند که بوسیله الگوریتم‌های قطعی تولید شده و زنجیره اعداد همواره ثابت هستند، به مقدار اولیه وابسته نیستند و احتمال تکرار این اعداد تصادفی وجود ندارد. دنباله اعداد هالتون و سوبول از این نوع مولدهای تصادفی هستند. در ادامه و در بخش روش تحقیق، توضیحات بیشتری در باره روش‌های شبه تصادفی و تصادفی گون ارائه خواهد شد.

کاوش در متون در زمینه مولدهای اعداد تصادفی در عدم قطعیت نشان داد:

۱) اگر چه تاثیر مولدهای اعداد تصادفی بر تخمین پارامترهای مدل ترکیبی لوجیت[۱۶] در انتخاب گسسته خودروهای دوست-دار محیط زیست در سفرها بررسی شده است [Hess, Train and Polak, 2006; Bhat, 2003]، اما تاثیر انواع مولدها بر عدم قطعیت تقاضای سفر پس از ساخت مدل بررسی نشده است [Rasouli and Timmerman, 2012]. لذا یکی از اهداف اصلی مقاله جاری، تخمین عدم قطعیت مدل‌های تولید و جذب سفر با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، پس از ساخته و پرداخته شدن آنها، است.

۲) در شبیه‌سازی مونت کارلو، معمولا مولدهای شبه تصادفی (PRNG's) به کاررفته‌اند. یکنواختی اعداد شبه تصادفی از نوع PRNG's از قبل معلوم نیست و ممکن است گاهی خوب و گاهی ضعیف باشد. اما مولدهای تصادفی‌گون (QRNG's) سعی در تولید دنباله اعداد تصادفی قطعی با یکنواختی بیشتر و در نتیجه پرکردن یکنواخت ابرمکعب واحد می‌باشد.

در توضیح ابرمکعب واحد باید گفت که برای تولید هر متغیر تصادفی از اعداد تصادفی یکنواخت در بازه (۱و۰) استفاده می-شود. اگر دو و سه متغیر تصادفی در عدم قطعیت استفاده شود، توزیع مشترک اعداد تصادفی به ترتیب تشکیل مربع و مکعبی هر کدام به ضلع واحد خواهد داد. برای گسترش این مفهوم برای مساله‌ای با متغیرها و ابعاد بیشتر، واژه ابرمکعب واحد به کار می‌رود. توزیع مشترک (چند بعدی) اعداد تصادفی، تشکیل مکعبی چند بعدی با ضلع واحد می دهد که از آن به عنوان ابرمکعب لاتین یاد می‌شود.

در شبیه‌سازی مونت کارلو، اساسی‌ترین مساله، پیدا کردن یک راه تولید اعداد تصادفی قابل اعتماد می‌باشد. اگر به این مساله در شبیه‌سازی مونت کارلو، توجه شود، مطمئنا می‌توان به نتایجی با دقت بالاتر دست یافت.

اهداف پژوهش جاری به صورت خلاصه عبارت است از:

۱- تخمین عدم قطعیت مدل‌های تولید و جذب سفر به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو و با لحاظ عدم قطعیت ورودی‌های مدل.

۲- بررسی تاثیر مولدهای اعداد تصادفی از نوع PRNG's و QRNG's بر عدم قطعیت.

۳- اولویت‌بندی متغیرهای مهم و تاثیرگذار بر عدم قطعیت تولید و جذب سفر و تحلیل حساسیت متغیرها.

٤- بررسی بسندگی داده‌های ساخت و پرداخت مدل برای تحلیل حساسیت.

در پژوهش کنونی، تحلیل حساسیت در دو مرحله انجام شد: ۱) در مرحله مدلسازی و با استفاده از داده‌های پایه مطالعات جامع حمل ونقل ۲) در مرحله پس مدلسازی و با استفاده از داده‌های به دست آمده در عدم قطعیت در مقاله جاری. هدف از این کار، پاسخ به این سوال است آیا نمی‌توان به تحلیل حساسیت در مرحله مدلسازی بسنده کرد. مدل‌های ساخته شده خود حاوی اطلاعات گرانبها و مفیدی در زمینه تحلیل حساسیت هستند و چنانچه نتایج تحلیل حسایت در مراحل مدلسازی و پس مدلسازی یکسان و یا نزدیک به هم باشد، نیازی به تحلیل حساسیت در پس مدلسازی نیست و می‌توان در هزینه و زمان انجام مطالعات صرفه‌جویی نمود.

۲. روش تحقیق

در این بخش ابتدا، مفهوم عدم قطعیت توابع ریاضی ارائه می-شود. سپس مولدهای تولید اعداد تصادفی تشریح می‌شود. در بخش سوم، مدل‌های ایجاد سفر شهر مورد مطالعه (مشهد)، معرفی می‌شود. بخش چهارم نیز به چگونگی شبیه‌سازی مونت کارلو می‌پردازد.

۲-۱ عدم قطعیت

فرض کنید تابع $y= y(x) =f(x)$ موجود باشد که در آن، $x=[x_1, x_2,\ldots, x_n]$ ورودی‌های تحلیل و خروجی ها $y=[y_1, y_2,\ldots, y_n]$ می‌باشد. در صورتی که مقادیر x به طور

دقیق مشخص باشد، مقدار $y(x)$ یک مقدار یکتا و مشخص خواهد بود. حال آنکه به علت مقادیر مختلف (و غیرقطعی) که x می‌تواند اختیار کند، عدم قطعیت $y(x)$ معنی پیدا می‌کند [Helton et al., 2006]. عدم قطعیت در x و اثرات آن بر $y(x)$ باعث بروز دو سوال می‌شود:

۱. با توجه به عدم قطعیت ورودی (x)، عدم قطعیت $y(x)$ چه مقدار است؟ (آنالیز عدم قطعیت)

۲. هر ورودی x به چه میزان در عدم قطعیت خروجی $y(x)$ موثر می‌باشد؟ (آنالیز حساسیت)

بدین منظور به هر عنصر x_i توزیع مشخص D اختصاص می‌یابد، $D=[D_1, D_2,\ldots, D_n]$. به کمک این توزیع، مقادیر تصادفی و غیرقطعی برای x به دست می آید که در نتیجه منجر به ایجاد یک توزیع برای y می‌شود. پس از تولید مقادیر تصادفی برای x با توزیع D، نمونه گیری از x ها انجام شده و هر نمونه با $x_k=[x_{k1}, x_{k2}, \ldots, x_{kn}]$ نشان داده می‌شود که در آن k اندیس نمونه و s نشان دهنده تعداد نمونه است $k=1,2,\ldots,s$. متناظر با هر نمونه k، مقادیر y به صورت خروجی $y(x_k)=[y_1(x_k), y_2(x_k), \ldots, y_n(x_k)]$ بدست می‌آید. زوج‌های $[x_k, y(x_k)]$ تشکیل نگاشتی از ورودی‌های غیرقطعی x_k به خروجی‌های غیرقطعی $y(x_k)$ فراهم می‌کند. توزیع بدست‌آمده برای مقادیر y، عدم قطعیت خروجی را نشان می‌دهد. تحلیل عدم قطعیت مقادیر پیش‌بینی شده $y(x)$ معمولا در قالب واریانس، ضریب تغییرات و بازه اطمینان ۹۵٪ و نظایر آن تعریف می‌شود.

۲-۲ مولدهای اعداد تصادفی

مولدهای مختلفی برای تولید اعداد شبه تصادفی معرفی شده‌اند. برخی از این مولدها، انواع ساده‌ای از مولد همنهشتی خطی (LCG) می‌باشد که کاربرد آسان تری نسبت به سایر مولدها دارند. فرم کلی این مولدهای PRNG به صورت زیر می‌باشد:

$$x_i=(ax_{i-1}+b) \bmod M, \quad 0\le x_i\le m \qquad (۱)$$

که در آن a و b اعداد ثابت و M پیمانه مولد است. در این مولد M باید به اندازه کافی بزرگ باشد. اغلب b در معادله بالا برابر صفر درنظر گرفته می‌شود و در اینصورت مولد بالا، مولد همنهشتی ضربی نامیده می‌شود. تولید اعداد در این مولد با مقدار دهی به هسته اولیه (x_0) در روندی بازگشتی شروع می‌شود و هر x_i تولید شده به وسیله رابطه زیر در بازه $[0,1]$ قرار می‌گیرد:

$$u_i= x_i/M \qquad (۲)$$

در اینجا مهم‌ترین مساله چگونگی انتخاب مقدار x_0 و ضریب ثابت a و مقدار پیمانه M است که یکنواختی و پراکندگی اعداد تصادفی به آنها بستگی دارد [Jahanshahi, 2019]. همانگونه که پیشتر بیان شد، در این روش تضمینی برای پر شدن یکنواخت بازه (۱و۰) وجود ندارد همچنین احتمال تکرار اعداد تصادفی وجود دارد.

نمونه‌گیری ابرمکعب لاتین (LHS)[۱۷]، یک مولد شبه‌تصادفی و نمونه‌برداری لایه‌ای با تضمین دستیابی به نمونه‌گیری بدون هم‌پوشانی می‌باشد. مولد LHS توزیع مربوط به هر متغیر تصادفی را به n بازه (لایه) بدون هم پوشانی با احتمال مساوی تقسیم می‌کند. یک مقدار تصادفی از هر بازه انتخاب می‌شود تا n عدد تصادفی به دست آید. این کار آنقدر برای هر متغیر تکرار می‌شود تا مقدارهایی تصادفی برای همه متغیرهای تصادفی نظیر $x_1,\ldots,x_n$ انتخاب شود. سپس، n مقدار به دست آمده برای هر x_i به صورت تصادفی با n مقدار به دست آمده برای $x_{j\neq i}$ ترکیب می‌شود. به عنوان مثال، اگر هدف تولید ۵ عدد تصادفی با این روش باشد، بازه (۱و۰) به ۵ زیربازه (لایه) $[0,0.2],[0.2,0.4],\ldots,[0.8,1]$ تفکیک و از هر زیربازه یک عدد تصادفی انتخاب خواهد شد. قانون‌مند بودن بازه‌های احتمال منجر به یکنواختی اعداد و پراکنش اندک در پاسخ می‌گردد. کم بودن تلاش محاسباتی[۱۸] و سادگی روش، و انعطاف پذیری اندازه نمونه از دیگر مزایای این مولد است [Shaianfar, Ghanooni Bagha, Jahani, 2015].

در روش هالتون که یک مولد QRNG's است، طبق تعریف، عدد صحیح n در پایه‌ی p به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$n=b_0+b_1p+b_2p^2+\ldots+b_mp^m \ , \ 0\leq b_m\leq p-1 \qquad (۳)$$

عدد تصادفی از تابع معکوس رادیکال $\varphi_p(n)$ در مبنای p به دست می‌آید:

$$\varphi_n(n)=\frac{b_0}{p}+\frac{b_1}{p^2}+\cdots+\frac{b_m}{p^{m+1}} \qquad (٤)$$

به عبارتی ساده، عدد تصادفی با معکوس کردن ترتیب ارقام عدد n در مبنای p و نوشتن آن پس از اعشار بدست می‌آید. یعنی:

$$\varphi_p(n)= 0.b_0b_1b_2\ldots b_m \qquad (٥)$$

مولد van der Corput در مبنای p، به شکل مجموعه نقاط یک بعدی $\{\varphi_n(n)\}_{n=0}^{\infty}$ تعریف شده است.

برای درک این روش، اعداد طبیعی [1,2,3,4,5,…] در مبنای ده را به صورت [1,10,11,100,101,..] در مبنای p=2 درنظر بگیرید. اگر این اعداد صحیح به اعداد کسری در مبنای ۲ تبدیل شوند، عبارت خواهند بود از [0.1,0.01,0.11,0.001,0.101,…] که از معکوس کردن ترتیب ارقام بعد از ممیز اعشار به دست می‌آیند. با تبدیل اعداد اعشاری از مبنای دو به مبنای ده به کمک رابطه (٤) به ترتیب اعداد $[\frac{1}{2},\frac{1}{4},\frac{3}{4},\frac{1}{8},\frac{3}{8},\frac{5}{8},\frac{7}{8},\ldots]$ حاصل می‌شوند. هالتون این تعریف را به مولد s بعدی $\{x_i\}$ گسترش داد. تعریف می‌شود:

$$x_n=\left(\varphi_{p_1}(n).\varphi_{p_1}(n).\cdots.\varphi_{p_s}(n)\right) \qquad (٦)$$
$$n=0,1,\cdots$$

که در آن، اعداد صحیح $p_1, p_2,\ldots,p_s$ دو به دو اول هستند. بیشتر اوقات در دنباله هالتون، s عدد اول انتخاب می‌شود. دنباله هالتون[۱۹] به وجود آمده از الگوریتم فوق را دنباله اصلی هالتون می‌نامند. مشکل دنباله‌های هالتون، همبستگی زیاد دنباله‌های اولیه آن می‌باشد که باعث توزیع غیریکنواخت و پوشش ضعیف به ویژه در فضای چند بعدی می‌شود. [Jahanshahi, 2019].

مولد هالتون درهم ریخته[۲۰] توسط [Morokoff and Caflish, 1994] معرفی شد. مهمترین مزیت هالتون درهم-ریخته این است که دنباله را فقط برای یک مبنا (نظیر p=2) می‌توان تولید و سپس با درهم‌ریختن آن به دفعات، اعداد تصادفی تولید کرد تا لیست های متفاوتی از یک دنباله معین ایجاد شود. در این روش، نیازی به تولید اعداد با استفاده از مبناهای بزرگ نیست و به راحتی می‌توان جوابگوی مسایل با ابعاد بزرگ بود. این کار همانند بر زدن کارت‌های ثابت بازی به شکل‌های مختلف است که منجر به تولید توالی و ترتیب متفاوتی از کارت های ثابت بازی می‌گردد.

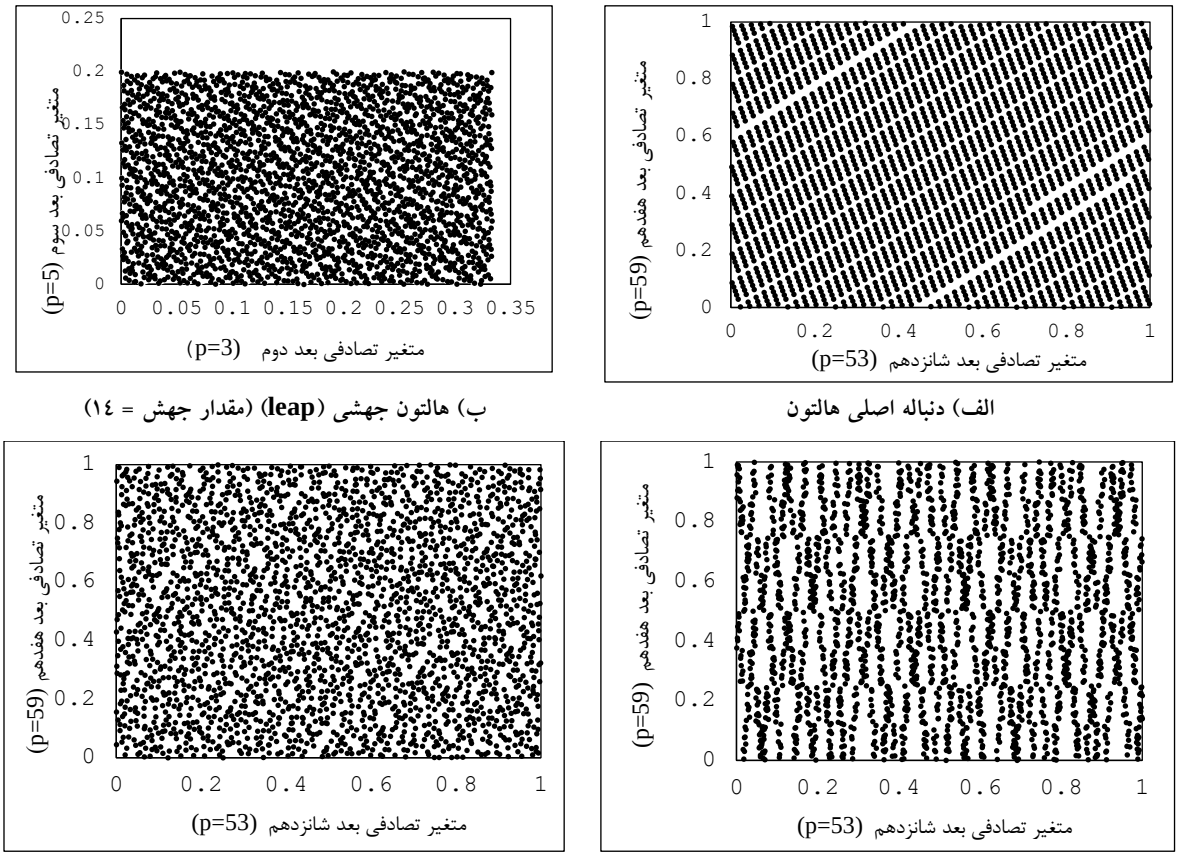
در مولد هالتون نامرتب[۲۱]، با استفاده از روش‌های جایگشتی[۲۲]، جای ارقام تغییر می‌یابد تا روند تصادفی بودن اعداد در مسائل با ابعاد بزرگ حفظ شود (به عنوان مثال، برای مبنای p=۵، به جای (۰،۱،۲،۳،٤)، جایگشت (۰،۳،۱،٤،۲) پیشنهاد شد [Braaten and Weller, 1979]. در ادبیات موضوع گزینه‌های مختلفی برای در هم ریختگی اعداد ارائه شده است.

دنباله‌ی Sobol نیز یکی دیگر از دنباله‌های شبه تصادفی است که به دلیل پیچیدگی مفهوم آن، مورد بحث قرار نمی‌گیرد و برای توضیحات بیشتر می‌توان به [Sobol, 2018] مراجعه کرد.

برای تولید اعداد تصادفی، روش‌های LCG، LHS، Halton و Sobol در MATLAB پیاده‌سازی شد. MATLAB برای تصادفی شدن اعداد، گزینه های چشم پوشی[۲۳]، جهش[۲٤]، نامرتب کردن، و درهم‌ریختن را ارائه می‌کند. چشم پوشی، تعدادی از اعداد تصادفی ابتدای دنباله را کاملا کنار می‌گذارد. جهش، سبب می‌شود هر n – امین عدد از دنباله اعداد انتخاب شود. برای نامرتب کردن دنباله هالتون و سوبول، به ترتیب از روش [Kocis and Whiten, 1997] و [Matousek, 1998] استفاده شد. علاوه بر نامرتب کردن، درهم ریختگی نیز برای مولدهای هالتون و سوبول انجام شد. مولدهای LCG و LHS خود دارای درهم‌ریختگی هستند.

بررسی کاربرد دنباله هالتون اصلی نشان داد کاربرد این گزینه مطلوب نیست (شکل ۱.الف) و اعداد تصادفی تشکیل نوارهایی ٤۵ درجه می‌دهند و حد فاصل این نوارها خالی مانده است. بهتر

است از یکی از گزینه های چشم پوشی، جهش، نامرتب کردن، یا درهم‌ریختن برای تصادفی سازی بیشتر بهره برده شود.



الف) دنباله اصلی هالتون

ب) هالتون جهشی (leap) (مقدار جهش = ١٤)

ج) هالتون نامرتب (scrambled)

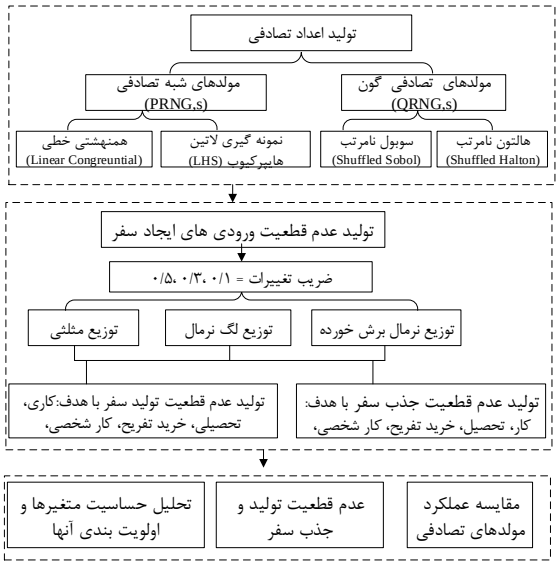
د) هالتون درهم ریخته (shuffled)

شکل ۱. پراکنش ۲۵۳۰ نقطه از اعداد تصادفی الف) دنباله اصلی هالتون و تصادفی‌سازی آن به صورت الف) جهشی ب) نامرتب ج) درهم ریخته

بررسی گزینه‌های چشم پوشی، جهش، نامرتب کردن، و درهم-ریختن نشان می‌دهد که جهش تاثیر منفی بر تولید اعداد تصادفی دارد (شکل ۱.ب) به نحوی که باعث شده اعداد تولید شده برای متغیر دوم و سوم به جای اینکه مربع واحد را پوشش دهند، به ترتیب در بازه [0,0.333] و [0,0.2] قرار گیرند و پوششی کاملا غیریکنواخت در بازه [0,1] حاصل شود. روش‌های نامرتب کردن و درهم ریختن، از این بین خوب جواب داده‌اند اگر چه درهم ریختن (شکل ۱.د) پوشش بهتری نسبت به نامرتب کردن (شکل ۱.ج) دارد. روش‌های چشم پوشی، جهش، و در مواردی معدودی روش نامرتب کردن، باعث از بین رفتن یکنواختی اعداد می‌شود و درهم ریختن، موفق‌تر از همه می‌باشد. لذا در تحقیق جاری تنها از روش درهم ریختن استفاده می‌شود.

در شکل ۱، ۲۵۳۰ نشان دهنده ۱۰ عدد شبیه‌سازی شده برای ۲۵۳ ناحیه ترافیکی مشهد است.

شکل ۲ به طور خلاصه و شماتیک، روش مطالعه جاری را نشان می‌دهد.



شکل ۲. روش تحقیق مقاله جاری

۲-۳ معرفی مورد مطالعه

در این مطالعه عدم قطعیت مدل‌های تولید و جذب سفر شهر مشهد که در سال ۱۳۸۷ در بهنگام‌سازی مطالعات جامع حمل و نقل و ترافیک مشهد توسعه یافته، بررسی شد. داده‌های به کاررفته در مقاله جاری، برای سال ۱۳۹۵ می باشد که افق کوتاه مدت مطالعات فوق است. شهر مشهد دارای ۲۵۳ ناحیه بوده و جمعیت آن در سال ۱۳۹۵ برابر ۳,۰۰۱,۱۸٤ می‌باشد. مدل‌های تولید و جذب سفر، مدل‌های همفزون خطی هستند. اهداف سفر در سفرهای خانه مبنا عبارتند از: ۱- شغلی، ۲- تحصیلی، ۳- خرید، ٤- تفریح، ۵- کار شخصی و ٦- زیارت حرم مطهر. عدم قطعیت سفرهای زیارتی (به دلیل تغییر پذیری کم آن نسبت به سایر اهداف در ایام عادی)، در مطالعه جاری بررسی نشد. بهتر است عدم قطعیت سفرهای زیارتی در ایام خاص بررسی گردد. بنابراین، تولید و جذب شش هدف سفر (پنج خانه مبنا و یک غیرخانه مبنا)، بررسی شد. این مدل‌ها، مجموعا ۱۷ متغیر مستقل و تعدادی متغیر ساختگی (دودویی) دارد. متغیرهای دودویی در مباحث عدم قطعیت، تحلیل نشدند. به دلیل حجم زیاد متغیرهای اقتصادی-اجتماعی مدل‌های تولید و جذب سفر نواحی ترافیکی و محدودیت صفحات مقاله، ارائه آنها در اینجا امری غیر ممکن-می‌باشد. خوانندگان علاقه‌مند برای مطالعه این و آشنایی با متغیرهای ورودی و پایگاه داده مدل، می‌توانند به گزارش شماره ۳۵-۳۰۰ بهنگام سازی مطالعات جامع حمل و نقل شهر مشهد [Tarh-e-Haftom, 2010]، مراجعه کنند.

۲-٤ شبیه سازی مونت کارلو

ابتدا، به کمک مولدها، اعداد تصادفی تولید و سپس این اعداد به متغیرهای تصادفی تبدیل می‌شوند. بردارهای متغیرهای ورودی مدل‌ها، توسط تابع توزیع تجمعی معکوس[۲۵] توزیع D، با ۱۰۰ درایه تولید شدند. برای ساخت توزیع D فرض شد متغیرهای ورودی، از سه توزیع نرمال برش خورده (با مقادیر نامنفی) ، لگ نرمال، و مثلثی، تبعیت می‌کنند. از مقادیر نقطه‌ای موجود برای هر متغیر به عنوان مقدار میانگین و از ضریب تغییرات[۲۶] رایج در ادبیات موضوع یعنی ۰/۱، ۰/۳، و ۰/۵ برای عدم قطعیت کم، متوسط، و زیاد و تعیین انحراف معیار، استفاده شد. پس انحراف معیار، از ۱۰ تا ۵۰ درصد میانگین متغیر است.

توزیع لگ نرمال دارای تکیه‌گاه مثبت است در نتیجه اگر متغیر تصادفی x دارای توزیع لگ نرمال باشد، اطمینان می‌رود که $x>0$ است. در صورتی که پارامترهای μ و σ یک توزیع نرمال در اختیار باشد، مقادیر میانگین و انحراف معیار توزیع لگ نرمال به ترتیب از روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌گردد [Vershynin, 2018].

$$\text{Mean} = \log(\mu^2/\sqrt{\sigma^2+\mu^2}) \quad (۷)$$

$$\text{St.Dev} = \sqrt{\log(\frac{\delta^2}{\mu^2}+1)} \quad (۸)$$

در این مطالعه با فرض یک توزیع مثلثی متقارن، مقادیر نقطه‌ای موجود در گزارشات شهر مشهد برای هر متغیر به عنوان میانگین و کران‌های توزیع در سه محدوده‌ی ٪۳۰± و ٪٦۰± و ٪۹۰± میانگین در نظر گرفته شدند. با در نظر گرفتن این سه محدوده برای کران‌های توزیع، مقادیر انحراف معیار هر بازه محاسبه شده و ضریب تغییرات متناظر با هر بازه به ترتیب ۰/۱۲۲، ۰/۲٤۵ و ۰/۳٦۷ بدست می‌آیند.

تعداد اجرای شبیه‌سازی برابر ۱۰۰ درنظر گرفته شد. چون مشهد دارای ۲۵۳ ناحیه است، برای هر متغیر تصادفی باید ۲۵۳۰۰ عدد

تصادفی توسط هر مولد تولید شود. سپس ۱۷ بار (به تعداد متغیرهای مدل تولید و جذب) زنجیره اعداد تصادفی درهم ریخته شوند تا ۱۷ لیست متفاوت از ۲۵۳۰۰ عدد تصادفی هر مولد، به دست آید.

۳. نتایج

قبل از شبیه‌سازی، یکنواختی اعداد تصادفی تولید شده، با آزمون کولموگروف-اسمیرنف[۲۷] بررسی شد. این آزمون بر روی هر ۱۰۰ عدد تصادفی تولید شده برای هر ناحیه و برای هریک از متغیرهای ورودی انجام شد (یعنی ۴۰۳۱=۲۵۳×۱۷ تست برای هر یک از چهار مولد نمونه گیری). نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد، از ۴۰۳۱ دنباله ۱۰۰ تایی تولید شده به روش هالتون، ۹۵/۵ درصد موارد دارای توزیع یکنواخت بودند و مابقی ۴/۵ درصددنباله‌ها (در سطح اطمینان پنج درصد)، یکنواخت نیستند. هالتون نسبت به سایر مولدها اعداد یکنواخت‌تری در فضای بین ۰ و ۱ تولید می‌کند. همانگونه که پیشتر بیان شد، یکنواختی اعداد شبه تصادفی از نوع PRNG's از قبل معلوم نیست و ممکن است گاهی خوب و گاهی ضعیف باشد. اما در مطالعه جاری، در ۹۴/۶ درصد مواقع (۹۴/۷)، اعداد تصادفی این مولد یکنواخت بوده و عملکردی در حد مولد هالتون دارد و نشان می دهد که مولدهای شبه تصادفی نیز قابل اطمینان است.

جدول ۱. نتایج آزمون فرضیه یکنواختی توزیع اعداد تصادفی

مولد عدد تصادفی	درصد یکنواختی(در ۴۰۳۱ ازمون فرضیه)
LCG	۹۴/۶ درصد
LHS	۹۴/۷ درصد
Halton	۹۵/۵ درصد
Sobol	۸۵/۱ درصد

۳-۱ عدم قطعیت

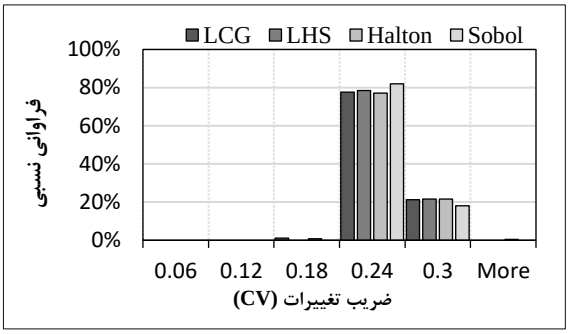
پس از شبیه‌سازی، بردار تشکیل شده برای هر متغیر به مدل‌های تولید و جذب سفر وارد شده و خروجی‌ها در قالب یک بردار ۱۰۰ تایی تولید و جذب برای هر ناحیه ترافیکی در اختیار قرار می‌گیرد. میانگین مقادیر تولید و جذب هر ناحیه ترافیکی در بردار خروجی، انحراف معیار و ضرایب تغییرات برای هر ناحیه به تفکیک اهداف مختلف سفر محاسبه می‌گردد. هیستوگرام ضریب تغییرات ۲۵۳ ناحیه شهری به ترتیب برای تولید و جذب سفر شهر مشهد در شکل ۳ ترسیم شد.

عدم قطعیت تولید سفر شغلی در شکل ۳ (و سایر اهداف خانه مبنا که شکل آنها در این مقاله برای اختصار، ارائه نشده) نشان می‌دهد اگر ضریب تغییر ورودی برابر ۰/۱، ۰/۳، و ۰/۵ باشد، ضریب تغییرات تولید سفرهای خانه مبنای ۸۰ درصد از نواحی به ترتیب در بازه ۰/۰۸ – ۰/۰۶، ۰/۲۴ – ۰/۱۸، و ۰/۴۰ – ۰/۳۰ قرار می‌گیرد که این بازه ها برابر ۸۰-۶۰ درصد ضریب تغییرات ورودی (یعنی ۰/۱، ۰/۳، و ۰/۵) هستند. پس می‌توان گفت پراکنش ضریب تغییرات خروجی‌ها، با نسبتی از ضریب تغییرات ورودی‌ها ارتباط دارد. در تولید سفر شغلی نزدیک به ۸۰٪ ضرایب تغییرات خروجی‌ها در بازه ۰/۶ تا ۰/۸ برابر ضریب تغییر ورودی‌ها تغییر می‌کند و تقریبا ۲۰٪ باقیمانده در بازه ۰/۸ تا ۱ برابر ضریب تغییر ورودی پراکنده شده‌اند. سفر غیرخانه مبنا، الگویی متفاوت از سایر اهداف سفر دارد و فراوانی ضریب تغییرات در بازه‌ی ۰/۶ تا ۰/۸ به حدود ۶۰-۶۵ درصد کاهش یافته و مابقی به صورت مساوی در بازه ۱-۰/۸ و ۰/۸-۰/۶ توزیع شده‌اند. ضریب تغییرات تولید سفر هیچ‌سرخانه نسبت به سفرهای خانه-مبنا پراکنش بیشتری دارد. اما علیرغم پراکنش بیشتر، میانگین ضریب تغییرات آنها کمتر است (جدول ۲).

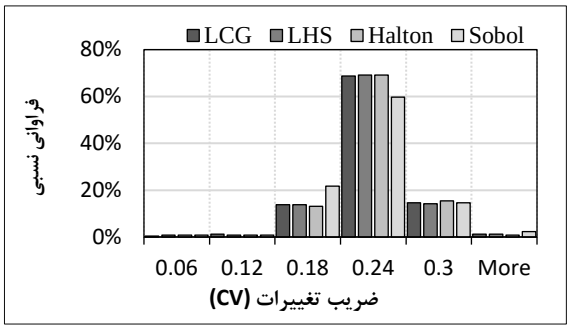
ضریب تغییرات جذب سفر پراکنده‌تر بوده و ضریب تغییرات بالاتری را نیز نمایش می‌دهند. در اهداف سفر کار شخصی (و تحصیلی و خرید) مشاهده می‌شود که در ۱۵ الی ۲۰ درصد نواحی، مقادیر ضریب تغییرات جذب سفر از ضریب تغییرات متغیرهای ورودی، حداکثر به میزان ۲۰ درصد تخطی می‌کند. در مدل‌های جذب سفر، پراکنش ضریب تغییرات سفرهای کار شخصی (و تحصیلی و خرید) نسبت به سایر اهداف بیشتر است.

در اینجا به موازات افزایش پراکنش (در شکل ۳)، میانگین ضریب تغییرات نیز افزایش می‌یابد (جدول ۲).

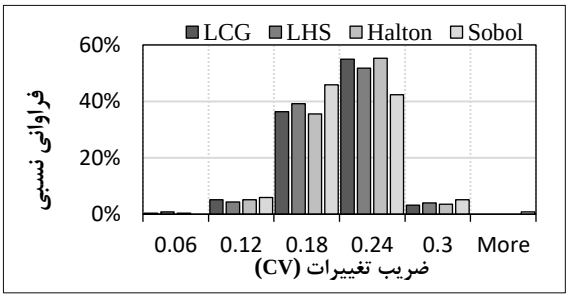
در تولید سفرها، ضریب تغییر خروجی به ندرت بیشتر از ضریب تغییر ورودی است. اما در مدل جذب، ضریب تغییر خروجی اهداف کار شخصی (تحصیلی و خرید) در ۲۰ درصد موارد، بیشتر از ضریب تغییر ورودی است. در نتیجه، عدم قطعیت مدل‌های جذب سفر نسبت به تولید سفر بیشتر است.



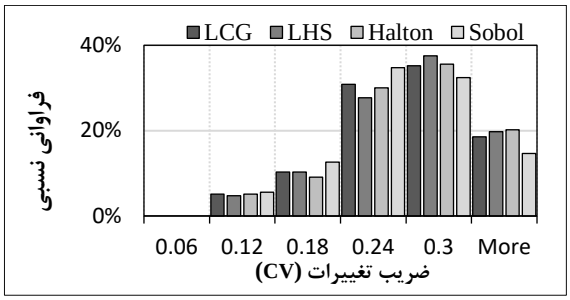
الف) تولید سفر شغلی (توزیع نرمال **CV=0.3**)



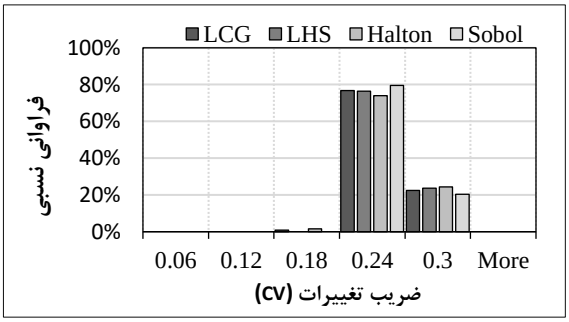
ب) تولید سفر هیچ سرخانه (توزیع نرمال **CV=0.3**)



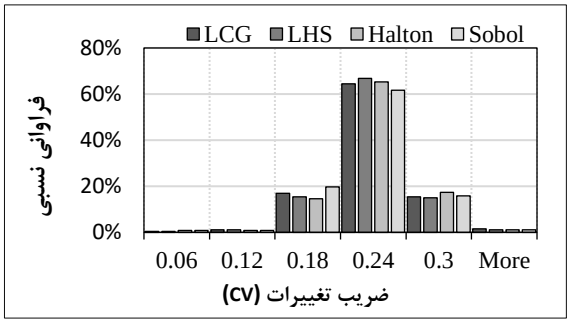
ج) جذب سفر شغلی (توزیع نرمال **CV=0.3**)



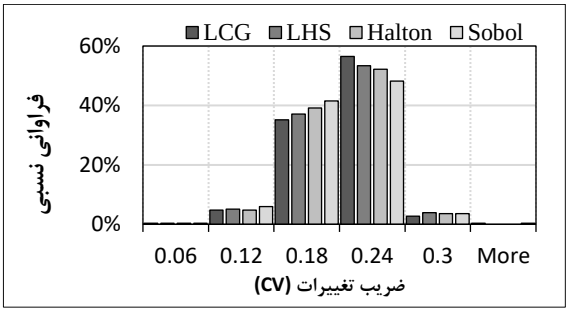
د) جذب سفر کار شخصی (توزیع نرمال **CV=0.3**)



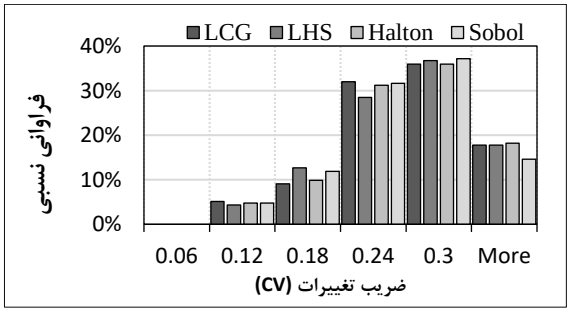
ه) تولید سفر شغلی (توزیع لگ نرمال **CV=0.3**)



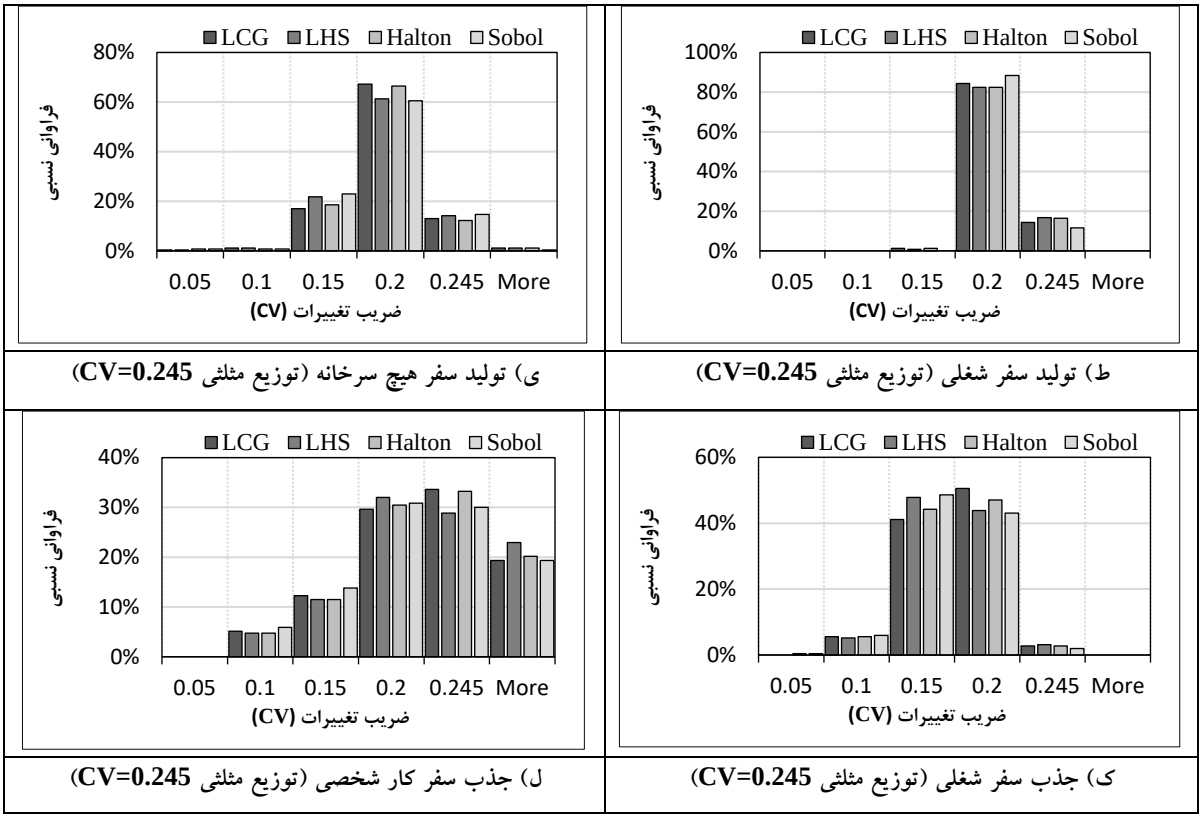
و) تولید سفر هیچ سرخانه (توزیع لگ نرمال **CV=0.3**)



ز) جذب سفر شغلی (توزیع لگ نرمال **CV=0.3**)



ح) جذب سفر کار شخصی (توزیع لگ نرمال **CV=0.3**)



ط) تولید سفر شغلی (توزیع مثلثی **CV=0.245**)

ی) تولید سفر هیچ سرخانه (توزیع مثلثی **CV=0.245**)

ک) جذب سفر شغلی (توزیع مثلثی **CV=0.245**)

ل) جذب سفر کار شخصی (توزیع مثلثی **CV=0.245**)

شکل ۳. هیستوگرام ضریب تغییرات تولید و جذب سفر نواحی ترافیکی

جدول ۲. میانگین ضریب تغییرات جذب سفر در نواحی ترافیکی در حالت عدم قطعیت متوسط

توزیع	نرمال (**CV=0.3**)				لگ نرمال (**CV=0.3**)				مثلثی (**CV=0.245**)			
هدف سفر	LCG	LHS	Halton	Sobol	LCG	LHS	Halton	Sobol	LCG	LHS	Halton	Sobol
تولید شغلی	۰/۲۲۷	۰/۲۲۵	۰/۲۲۶	۰/۲۲۷	۰/۲۲۶	۰/۲۲۶	۰/۲۲۶	۰/۲۲۸	۰/۱۸۶	۰/۱۸۵	۰/۱۸٤	۰/۱۸٦
تولید کار شخصی	۰/۲۲۵	۰/۲۲۵	۰/۲۲۵	۰/۲۲۵	۰/۲۲۵	۰/۲۲٤	۰/۲۲٤	۰/۲۲٦	۰/۱۸٤	۰/۱۸۵	۰/۱۸۵	۰/۱۸٤
تولید غیرخانه مبنا	۰/۲۰۸	۰/۲۰۸	۰/۲۰۹	۰/۲۰۷	۰/۲۰۸	۰/۲۰۹	۰/۲۱۰	۰/۲۰۷	۰/۱۷۰	۰/۱۷۱	۰/۱۷۱	۰/۱٦۹
جذب شغلی	۰/۱۸۳	۰/۱۸۲	۰/۱۸۲	۰/۱۸۱	۰/۱۸٤	۰/۱۸۳	۰/۱۸۳	۰/۱۸۱	۰/۱۵۰	۰/۱٤۹	۰/۱٤۹	۰/۱٤۸
جذب کار شخصی	۰/۲٤۲	۰/۲٤۵	۰/۲٤۵	۰/۲۳٦	۰/۲٤۳	۰/۲٤٤	۰/۲٤۳	۰/۲۳۸	۰/۱۹۹	۰/۱۹۹	۰/۲۰۰	۰/۱۹۷
جذب غیرخانه مبنا	۰/۲۰۱	۰/۲۰۱	۰/۲۰۱	۰/۲۰۱	۰/۲۰۲	۰/۲۰۲	۰/۲۰۳	۰/۲۰۰	۰/۱٦۵	۰/۱٦۵	۰/۱٦۵	۰/۱٦۳
تولید سفر کل	۰/۰۱٦	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۸	۰/۰۱٦	۰/۰۱۰	۰/۰۱۸	۰/۰۰۸	۰/۰۱۹	۰/۰۱۲	۰/۰۲۰	۰/۰۱۰
جذب سفر کل	۰/۰۱٦	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۰	۰/۰۱٦	۰/۰۱۱	۰/۰۱۷	۰/۰۱۰	۰/۰۱٤	۰/۰۰۹	۰/۰۱٤	۰/۰۰۹

این مساله ناشی از آن است که در آمارگیری مبدا–مقصد خانوار، پرسشگری از سفرها در خانه که محل تولید سفر است به عمل می‌آید و لذا داده‌های تولید سفر از قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به جذب سفر برخوردار هستند.

پایداری بالای دو مولد ابرمکعب لاتین و هالتون و عدم نوسان در خروجی‌های آن نسبت به مولدهای همنهشتی خطی و سوبول در این نمودارها نیز به چشم می‌خورد (به نمودارهای تولید سفر شغلی در شکل ۲ دقت کنید). یعنی، در مولدهای همنهشتی خطی و سوبول، بخشی از تغییرات خروجی‌ها ناشی از مولدهای

اعداد تصادفی است که برای تصادفی‌سازی به کاررفته‌اند. برای اینکه فرآیند تولید اعداد تصادفی در عدم قطعیت خروجی‌ها، مداخله نکند، پیشنهاد می‌شود مولدهای پایدارتر ابرمکعب لاتین و هالتون برای تصادفی‌سازی به کاررود.

۳-۲ تحلیل حساسیت

در بخش جاری، با استفاده از معیارهای حساسیت، بر اساس اینکه تولید و جذب سفر به کدام متغیر ورودی حساسیت بیشتری دارد، متغیرهای ورودی رتبه‌بندی می‌گردند.

معیارهای سنجشی که در تحقیق جاری برای آنالیز حساسیت زوج‌های $[x_k, y(x_k)]$ مورد بررسی قرار گرفت شامل رگرسیون گام به گام[۲۸]، ضرایب رگرسیون استاندارد شده (SRC)[۲۹]، ضریب همبستگی(CC)[۳۰]، و ضریب همبستگی نیمه جزئی (SPCC)[۳۱] می‌باشد [Helton and Davis, 2002].

استفاده از آنالیز رگرسیون گام به گام باعث می‌شود اهمیت هر متغیر بر اساس ترتیب ورود آنها به مدل، و تغییرات R^2 مورد بررسی قرار بگیرند. متغیرهایی که بیشترین نقش را در افزایش ضریب تعیین R^2 دارند، زودتر وارد مدل رگرسیونی می‌شوند. به دلیل خطی بودن مدل‌های مورد بررسی، رگرسیون گام به گام در نهایت منجر به تولید یک مدل رگرسیون با $R^2=1$ می‌شود؛ در واقع آخرین متغیری که به مدل رگرسیونی اضافه می‌شود، تاثیر خیلی کمی بر متغیر وابسته y دارد.

برای بررسی حساسیت می‌توان از ضرایب رگرسیون (RC) و همچنین ضرایب رگرسیون استاندارد شده (SRC) استفاده کرد. چون ضرایب رگرسیون استاندارد شده مقدار پراکنش هر متغیر را در نظر می‌گیرد و اثرات واحدهای متغیرها را حذف می‌کند، برای این منظور مناسب‌تر می‌باشد. ضریب همبستگی نیمه جزئی، نشان هنده همسبتگی خطی بین متغیر مستقل و وابسته، پس از حذف تاثیرات خطی سایر متغیرهای مستقل بر متغیر مستقل مورد مطالعه است. ضریب همبستگی نیز نشان‌دهنده همسبتگی بین متغیر مستقل و وابسته، بدون حذف تاثیرات خطی سایر متغیرهای مستقل بر متغیر مستقل مورد مطالعه و وابسته است. هر چقدر مقادیر مطلق SRC، CC، و SMCC بزرگتر باشد، نشان دهنده اهمیت متغیر است.

معیارهای مزبور برای مدل‌های پایه (مرحله مدلسازی) و عدم قطعیت (پس مدلسازی) به کمک نرم‌افزار SPSS استخراج شدند و در جداول ۳ و ٤ به ترتیب برای مدل تولید و جذب سفر نشان داده شدند. بررسی مقادیر این معیارها و همچنین رتبه بندی متغیرهایی که مدل‌های تولید و جذب به آنها حساس است، نشان می‌دهد:

۱. نتایج تحلیل حساسیت در مراحل مدلسازی و پس مدلسازی تفاوت آنچنانی باهم ندارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت نیازی به تحلیل حساسیت در مرحله پس مدل‌سازی وجود ندارد و و رتبه‌بندی بر اساس داده‌های مدل‌سازی نیز، ما را به هدفمان می‌رساند. لذا می‌توان به تحلیل حساسیت در مرحله مدل‌سازی بسنده و در تحلیل حساسیت صرفه جویی کرد.

۲. در اولویت بندی متغیرها، مولدهای اعداد تصادفی تاثیر یکسانی داشتند. در جداول ۳ و ٤ و در ستون پس مدلسازی، برای اختصار نتایج رتبه بندی متغیرها برای مولد هالتون ارائه شده است. اما نتایج تحلیل حساسیت سایر مولدها بسیار نزدیک به مولد هالتون بود.

۳. تولید سفر خانه مبنا، بیشترین حساسیت را به متغیرهای جمعیت شاغل در ناحیه i (E_i)، تعداد خودرو ناحیه (P_iCAR_i)، و جمعیت ناحیه (P_i) دارند این متغیرها بیشترین نقش را در عدم قطعیت تولید سفر دارند. همانگونه که در جدول ۳ و در ستون ضریب R^2 مشاهده میشود، ۹۸/۸٪ تغییرات تولید سفر کاری به وسیله متغیر جمعیت شاغل در ناحیه i (E_i) توصیف می‌شود. در سفرهای تحصیل، خرید، و کارشخصی نیز در حدود ۹۸٪ درصد تغییرات تولید سفر، توسط متغیر تعداد خودرو ناحیه (P_iCAR_i) توصیف می‌شود و این متغیر بیشترین نقش را در حساسیت تولید سفر دارد. در

تولید سفر هیچ سرخانه نیز، تعداد کارمندان ناحیه j (K_j) بیشترین تاثیر را بر عدم قطعیت دارد.

جدول ۳. نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای تولید سفر

هدف سفر	متغیر مدل	مرحله مدل‌سازی								مرحله پس مدلسازی (عدم قطعیت)							
		R^2		SRC		CC		SPCC		R^2		SRC		CC		SPCC	
		Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value
شغلی	Ei	۱	۰/۹۸۸	۱	۰/٦۹۷	۱	۰/۹۹٤	۱	۰/۲٤٦	۱	۰/۹۷۳	۱	۰/۷۱۰	۱	۰/۹۸٦	۱	۰/۳٦٤
	EiCARi	۲	۱/۰۰۰	۲	۰/۳۱۷	۲	۰/۹٦۹	۲	۰/۱۱۲	۲	۱/۰۰۰	۲	۰/۳۲۲	۲	۰/۹۳۱	۲	۰/۱٦٦
تحصیلی	PiCARi	۱	۰/۹۸۳	۱	۰/۵۹۹	۱	۰/۹۹۱	۱	۰/۱۸۹	۱	۰/۹۵۹	۱	۰/٦۰۸	۱	۰/۹۷۹	۱	۰/۲۹۱
	Sti	۲	۱/۰۰۰	۲	۰/٤۱٤	۲	۰/۹۸۲	۲	۰/۱۳۰	۲	۱/۰۰۰۰	۲	۰/٤۲۳	۲	۰/۹۵۷	۲	۰/۲۰۲
خرید	PiCARi	۱	۰/۹۷۲	۱	۰/۵۵۱	۱	۰/۹۸٦	۱	۰/۱۹۷	۱	۰/۹٤۲	۱	۰/۵۵۹	۱	۰/۹۷۱	۱	۰/۲۸۳
	Pi	۲	۱/۰۰۰	۲	۰/٤٦٦	۲	۰/۹۸۰	۲	۰/۱٦۷	۲	۱/۰۰۰	۲	۰/٤۷۷	۲	۰/۹۵۹	۲	۰/۲٤۱
تفریحی	Pi	۱	۰/۹٦۸	۱	۰/۵۱۹	۱	۰/۹۸٤	۱	۰/۱۸٦	۱	۰/۹۳۵	۱	۰/۵۳۰	۱	۰/۹٦۷	۱	۰/۲٦۸
	PiCARi	۲	۱/۰۰۰	۲	۰/٤۹۸	۲	۰/۹۸۳	۲	۰/۱۷۸	۲	۱/۰۰۰	۲	۰/۵۰٦	۲	۰/۹٦۳	۲	۰/۲۵٦
کار شخصی	PiCARi	۱	۰/۹۸٤	۱	۰/٦۵۹	۱	۰/۹۹۲	۱	۰/۲۳٦	۱	۰/۹٦٦	۱	۰/٦٦۸	۱	۰/۹۸۳	۱	۰/۳۳۸
	Pi	۲	۱/۰۰۰	۲	۰/۳۵۷	۲	۰/۹۷۲	۲	۰/۱۲۸	۲	۱/۰۰۰	۲	۰/۳٦۵	۲	۰/۹٤۱	۲	۰/۱۸٤
غیرخانه مبنا	Kj	۱	۰/۷۰۰	۲	۰/۳۹۱	۱	۰/۸۷۳	۲	۰/۲۷٤	۱	۰/٦۷۹	۲	۰/٤۰۳	۱	۰/۸۲٤	۲	۰/۳۰۰
	Pb1	۲	۰/۸٦۲	۱	۰/٤۷۱	٤	۰/۵۹۳	۱	۰/٤٤۹	۲	۰/۸٤۲	۱	۰/٤٦۵	۳	۰/۵۸۵	۱	۰/٤٤٦
	VKj	۳	۰/۹٦۳	۳	۰/۳۵۹	۲	۰/۷۳۳	۳	۰/۲٦٦	۳	۰/۹٦۱	۳	۰/۳۷۰	۲	۰./۷۲۳	۳	۰/۲۸۸
	USTjbst	٤	۰/۹۸٦	۵	۰/۱۵۵	۵	۰/۲۱۷	٤	۰/۱۵٤	٤	۰/۹۸۳	۵	۰/۱۵۳	۵	۰/۲۱۳	۵	۰/۱۵۲
	Hstj	۵	۱/۰۰۰	٤	۰/۱٦۱	۳	۰/٦۰۳	۵	۰/۱۲۰	۵	۱/۰۰۰	٤	۰/۱٦۵	٤	۰/۵۸۳	٤	۰/۱۳۰

R^2: Coefficient of Determination, SRC: Standardized Regression Coefficient, CC: Correlation Coefficient, SPCC: SemiPartial Correlation Coefficient

جدول ٤. نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای جذب سفر

هدف سفر	متغیر مدل	داده‌های مدل‌سازی								داده‌های عدم قطعیت							
		R^2				CC		SPCC		R^2		SRC		CC		SPCC	
		Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value
کاری	Kj	۱	۰/۷۹۰	۱	۰/٤٤۷	۱	۰/۸۸۹	۱	۰/۲۷۷	۱	۰/۷٦۹	۱	۰/٤٦۰	۱	۰/۸۷۷	۱	۰/۳۲٦
	VKj	۲	۰/۹٤۳	٤	۰/۲۵۹	۳	۰/۸۵٤	۳	۰/۱۰۵	۲	۰/۹۳۲	٤	۰/۲٦۷	۳	۰/۸۲۸	۳	۰/۱٤٦
	VKjbCBD	۳	۰/۹۹۱	۲	۰/۲۸۳	٤	۰/۵٤۰	۲	۰/۲۳۸	۳	۰/۹۸۲	۲	۰/۲۷۹	٤	۰/۵۳۱	۲	۰/۲۵۲
	Wj	٤	۱/۰۰۰	۳	۰/۲٦۵	۲	۰/۸٦۳	٤	۰/۰۹۲	٤	۱/۰۰۰	۳	۰/۲۷۲	۲	۰/۸۳۷	٤	۰/۱۳۵
تحصیلی	USTjbst	۱	۰/٦۹۹	۱	۰/۸۰۵	۱	۰/۸۳٦	۱	۰/۸۰۳	۱	۰/٦۸۷	۱	۰/۷۹۹	۱	۰/۸۲۹	۱	۰/۷۹٦
	HCj	۲	۰/۹۷۵	۲	۰/۳۸۲	۲	۰/۵۵٤	۲	۰/۲۸٤	۲	۰/۹٦۹	۲	۰/۲۹٦	۲	۰/۵۵۹	۲	۰/۳۱۳
	LCjCARj	۳	۱/۰۰۰	۳	۰/۲۱٤	۳	۰/۵۳٤	۳	۰/۱۵۹	۳	۱/۰۰۰	۳	۰/۲۲۲	۳	۰/۵۲۵	۳	۰/۱۷۵
خرید	VKjbsh5	۱	۰/۵٦۸	۱	۰/۵۳۲	۱	۰/۷۵٤	۱	۰/۳۵۹	۱	۰/۵۵٤	۱	۰/۵۲٦	۱	۰/۷٤۵	۱	۰/۳۵۵
	VKj	۲	۰/۹۱۳	۲	۰/۳۸۵	۲	۰/۷٤۰	۲	۰/۳۰۵	۲	۰/۹۰۱	۲	۰/۳۹۸	۲	۰/۷۳۳	۲	۰/۳۲۸
	VKjbsh4	۳	۰/۹۸٦	۳	۰/۳٤۱	٤	۰/۵٤٦	۳	۰/۲۸۳	۳	۰/۹۸٦	۳	۰/۳۵۲	٤	۰/۵٤٦	۳	۰/۳۰۳
	VKjbCBD	٤	۱/۰۰۰	٤	۰/۱۸٤	۳	۰/٦۹۳	٤	۰/۱۲۰	٤	۱/۰۰۰	٤	۰/۱۸۲	۳	۰/٦۸٤	٤	۰/۱۱۹
تفریحی	Pj	۱	۰/۹۰۱	۱	۰/۵٦۷	۱	۰/۹٤۹	۱	۰/۳۵٦	۱	۰/٦۰۷	۲	۰/٤۸٤	۱	۰/۷۷۹	۲	۰/۳۳٦
	Pbsr	۲	۰/۹۷۷	۲	۰/٤٤۰	۲	۰/۹۰٤	۲	۰/۲۸۲	۲	۰/۹۱٦	۱	۰/۵۲٦	۳	۰/۵۵٦	۱	۰/۵۱۳
	VKjCARj	۳	۱/۰۰۰	۳	۰/۱٦۰	۳	۰/٤۰۳	۳	۰/۱۵۳	۳	۰/۹۸٤	۳	۰/۳٦۵	۲	۰/۷۳۸	۳	۰/۲۵٦

هدف سفر	متغیر مدل	داده‌های مدل‌سازی								داده‌های عدم قطعیت							
		R^2				CC		SPCC		R^2		SRC		CC		SPCC	
		Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value	Rank	Value
	APARKj									٤	١/٠٠٠	٤	٠/١٣٦	٤	٠/٤٤٩	٤	٠/١٢٨
کار شخصی	Kj	١	٠/٧٢٥	٢	٠/٣٨٦	١	٠/٨٥٢	٢	٠/٢٨٢	١	٠/٦٩٨	٢	٠/٤٠٠	١	٠/٨٣٥	٢	٠/٣٠٦
	CLNCj	٢	٠/٨٩٥	١	٠/٤٤٠	٢	٠/٨٢٨	١	٠/٣٥٥	٢	٠/٨٩٠	١	٠/٤٤٩	٢	٠/٨١٥	١	٠/٣٧٤
	HBj	٣	٠/٩٦١	٣	٠/٢٨٣	٤	٠/٥٥٣	٣	٠/٢٦٧	٣	٠/٩٦٢	٤	٠/٢٨٨	٤	٠/٥٤٣	٣	٠/٢٧٤
	Wjbpb4	٤	١/٠٠٠	٤	٠/٢٣٣	٣	٠/٦٤٤	٤	٠/١٩٦	٤	١/٠٠٠	٣	٠/٢٢٨	٣	٠/٦٣٢	٤	٠/١٩٤
غیرخانه مبنا	Pb1	١	٠/٥٦٨	١	٠/٦٣٦	١	٠/٧٥٤	١	٠/٥٩٦	١	٠/٥٥٩	١	٠/٦٣١	١	٠/٧٤٧	١	٠/٥٩٤
	Kj	٢	٠/٩٠٥	٢	٠/٢٩٦	٢	٠/٧٤٦	٢	٠/٢٠٥	٢	٠/٨٩١	٢	٠/٣٠٦	٢	٠/٧٣٥	٢	٠/٢٢٦
	VKj	٣	٠/٩٧٣	٣	٠/٢٦١	٣	٠/٦١٨	٣	٠/١٨٩	٣	٠/٩٧٠	٣	٠/٢٧٠	٣	٠/٦٠٩	٣	٠/٢٠٧
	Hstj	٤	٠/٩٨٥	٤	٠/١٦١	٤	٠/٥٠٢	٤	٠/١٢٠	٤	٠/٩٨٥	٤	٠/١٦٦	٤	٠/٤٩١	٤	٠/١٣٠
	VKjbCBD	٥	٠/٩٩٣	٥	٠/١٠٥	٥	٠/٤٥٥	٥	٠/٠٩٦	٥	٠/٩٩٤	٥	٠/١٠٤	٥	٠/٤٥٠	٥	٠/٠٩٥
	USTjbst	٦	١/٠٠٠	٦	٠/٠٨١	٦	٠/١٢٨	٦	٠/٠٨١	٦	١/٠٠٠	٦	٠/٠٨١	٦	٠/١٢٧	٦	٠/٠٨٠

R^2: Coefficient of Determination, SRC: Standardized Regression Coefficient, CC: Correlation Coefficient, SPCC: SemiPartial Correlation Coefficient

٤. در مدل‌های جذب سفر نیز تعداد کارمندان (K_j) و تعداد واحد کسبی ناحیه j (VK_j) بیشترین تاثیر را بر عدم قطعیت دارد و جذب سفرها بیشترین حساسیت را به این متغیرها نشان داده‌اند. همانگونه که در جدول ٤ و در ستون ضریب R^2 مشاهده می‌شود، به ترتیب ٧٩٪ و ٧٢/٥٪ تغییرات جذب سفر کاری و کار شخصی به وسیله متغیر تعداد کارمندان (K_j) توصیف می‌شود. پس از تعداد کارمندان، واحد کسبی دارای اولویت دوم در ایجاد حساسیت در جذب سفرهای کاری و خرید است. واحد کسبی به صورت جداگانه و یا حاصلضرب آن در متغیرهای دیگر نظیر سرانه خودرو ناحیه (CAR_j) در مدل‌های جذب سفر ظاهر می‌شود.

٥. نتایج اولویت‌بندی متغیرها با استفاده از شاخص ضریب همبستگی جزیی تفاوت اندکی با شاخص ضریب همبستگی دارد. اما مقادیر ضریب همبستگی جزیی بسیار کمتر از ضرایب همبستگی است که نشان می‌دهد بین متغیرهای مستقل تاثیرات خطی شدیدی وجود دارد.

٤. کاربردهای مقاله و پیشنهادات برای مطالعات آتی

پژوهش جاری نشان داد که مدل‌های تولید سفر عدم قطعیت ورودی‌ها را کاهش می‌دهند و این امر، اعتمادپذیری به پیش-بینی‌های این مدل را بیشتر می‌کند. با توجه به اینکه نسبت ضریب تغییرات تولید سفر به متغیرهای وروی در مطالعه جاری؛ غالبا در حدود ٦٠ تا ٨٠ درصد بود، می‌توان گفت هر تغییر ١٠ درصدی در متغیرهای ورودی، سبب تغییری ٦ تا ٨ درصدی در تولید سفر خواهد شد. لذا با این ضریب، می‌توان درباره تصحیح یا عدم تصحیح تقاضای سفر در صورت تغییرات متغیرهای حساس ورودی تصمیم گیری کرد. به عنوان مثال، چنانچه به دلیل شدت گرفتن رشد مالیکت خودرو، تعداد خودرو نواحی (P_iCAR_i) به مقدار ١٠ درصد بیش از برآوردها شد، مقدار تولید سفر به میزان ٦ الی ٨ درصد بیش از برآوردها خواهد بود. حال مدل‌ساز می تواند تصمیم بگیرد به خاطر این عدم قطعیت، آیا مدل‌های تولید سفر را بروز رسانی کند یا خیر. اما اگر در همین مثال، هر تغییر ١٠ درصدی در متغیرهای ورودی، سبب تغییری ٢٠ درصدی در تولید سفرها می‌شد، به دلیل تغییرات زیاد تقاضا، مدل‌ساز ناگزیر بود تا مدل تولید سفر را مجددا اجرا و بهنگام‌سازی کند.

یکی از کاربردهای اصلی این مطالعات اولویت‌بندی متغیرهایی است که ایجاد سفر به آنها حساس است. در مدل‌های تولید سفر،

این متغیرها عبارت بودند از: جمعیت شاغل در ناحیه i (E_i)، تعداد خودرو ناحیه (P_iCAR_i)، و جمعیت ناحیه (P_i). در مدل جذب سفر متغیرهای حساس عبارت بودند از: تعداد کارمندان (K_j) و تعداد واحد کسبی ناحیه j (VK_j). لذا برای افزایش دقت و کاهش خطای برآورد، به جای تمرکز بر تعداد زیادی متغیر، مدلساز می‌تواند تنها بر این متغیرها تمرکز کند. این متغیرها، متغیرهای کلیدی هستند که سبب تغییرات در ایجاد سفر می‌شوند و سایر متغیرها از اولویت و اهمیت کمتری برخوردارند.

یکی از پیشنهادت برای مطالعات آتی، بررسی عدم قطعیت سایر مراحل مدل ٤ مرحله ای سفر، اعم از توزیع، تفکیک، و تخصیص سفر است. با توجه به اینکه متغیرهای جمعیت و اشتغال تاثیر بسزایی بر عدم قطعیت داشته می شوند، در صورت محدودیت هزینه و وقت، پیشنهاد می‌شود عدم قطعیت تفکیک سفر انجام شد. چرا که در مرحله تفکیک سفر نیز متغیرهای اقتصادی و اجتماعی نظیر جمعیت و اشتغال بر انتخاب وسیله سفر تاثیر دارند. اما توزیع و تخصیص سفر نسبت به مشخصات سفر نظیر زمان و مسافت سفر حساسیت دارد. همچنین، با توجه به اینکه مولد هالتون نامرتب و نمونه گیری لاتین هایپرکیوب عملکرد پایدارتری دارند، از این مولدها برای تصادفی‌سازی استفاده گردد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عدم قطعیت مدل‌های خطی تولید و جذب سفر با استفاده از مولدهای شبه‌تصادفی همنهشتی خطی و ابر مکعب لاتین و مولدهای تصادفی‌گون هالتون و سوبول درهم ریخته بررسی شد. ضریب تغییرات ورودی‌ها، ا ز ۰/۱ تا ۰/۵ متغیر بود. مطالعات پیشین نتیجه گیری کردند که در مدل‌های چهارمرحله-ای، سه مرحله اول (ایجاد، توزیع، و تفکیک سفر) باعث افزایش عدم قطعیت و مرحله چهارم (تخصیص) سبب کاهش عدم قطعیت می‌شود، اما در پژوهش جاری مدل‌های تولید و جذب سفر عدم قطعیت ورودی‌ها را کاهش می‌دهند. کاهش عدم قطعیت در مرحله ایجاد سفر، اعتمادپذیری به پیش‌بینی های این مدل را بیشتر می‌کند. کاهش عدم قطعیت، شاید ناشی از تفاوت ساختار مدل‌های تولید و جذب سفر باشد که در مطالعات جاری، مدل‌های ایجاد سفر از نوع رگرسیون خطی و در مطالعات پیشین، از نوع جدول متقاطع بودند. عامل دیگر می تواند همبستگی‌های میان متغیرهای مستقل است. متغیرهایی که در مطالعات بهنگام سازی مشهد به کار رفتند، همبستگی شدیدی با هم داشتند. البته تعیین تاثیرات دقیق این دو بر کاهش عدم قطعیت، نیازمند مطالعات بیشتر است.

در مطالعه جاری، در ۹٤/٦ درصد مواقع، اعداد تصادفی مولد های شبه تصادفی یکنواخت بوده و عملکردی در حد مولد هالتون دارد. به عبارتی دیگر، برتری مولدهای تصادفی‌گون به شبه‌تصادفی، برتری حاشیه‌ای و اندک است و نشان می‌دهد مولد-های شبه تصادفی نیز قابل اطمینان است.

دو مولد ابرمکعب لاتین و هالتون نسبت به مولدهای همنهشتی خطی و سوبول پایداری بالاتری دارند. یعنی، در مولدهای همنهشتی خطی و سوبول، بخشی از تغییرات خروجی‌ها ناشی از مولدهای اعداد تصادفی است که برای تصادفی‌سازی به کاررفته‌اند. برای اینکه فرآیند تولید اعداد تصادفی در عدم قطعیت خروجی‌ها، مداخله نکنند، پیشنهاد می‌شود مولدهای پایدارتری به کاررود. مولد شبه تصادفی ابرمکعب لاتین و مولد تصادفی‌گون هالتون، مولدهای پایدارتری بودند.

تحلیل حساسیت مدل تولید و جذب نشان داد که این مدل‌ها به متغیرهای ورودی حساسیت دارند و سپس بر اساس میزان حساسیت تولید و جذب به متغیرهای ورودی، رتبه‌بندی متغیرهای ورودی انجام شد. اغلب این متغیرها، متغیرهای جمعیتی سکونت و اشتغال هستند.

٦. پی‌نوشت‌ها

1. aleatory uncertainty
2. epistemic uncertainty
3. input uncertainty
4. model uncertainty
5. model specification error
6. error propagation
7. stochastic user equilibrium (SUE)

8. user equilibrium (UE)
9. bootstrap
10. resampling
11. Jacknife
12. pseudo-random number generator (PRNG's)
13. quasi-random number generator (QRNG's)
14. seed
15. linear congruential generator (LCG)
16. mixed logit
17. Latin hypercube sampling (LHS)
18. computational effort
19. Halton sampling
20. shuffled Halton
21. scrambled Halton
22. permutation
23. skip
24. leap
25. inverse cumulative distribution function
26. coefficient of variations (cv)
27. Kolmogorov-Smirnov test
28. stepwise regression
29. standardized regression coefficient (SRC)
30. correlation coefficient (CC)
31. semi partial correlation coefficient (SPCC)

۷. مراجع

– اسکندری چچگلو، اصغر و فتحی واجارگاه، بهروز (۱۳۹۲) "دنباله‌های کارا در شبیه‌سازی مونت کارلو برای محاسبه قابلیت اطمینان"، سیزدهمین کنفرانس هوافضای ایران، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳–۱۵ اسفند ۱۳۹۲.

– افندی زاده، شهریار، غفاری، احمدرضا و کلانتری، نوید (۱۳۹۰) "ارزیابی اثر عدم قطعیت جعبه‌ای تقاضا در طراحی شبکه پیوسته و گسسته حمل و نقل، با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و کلونی مورچگان"، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، سال دوم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۰، ص. ۲۰۵–۲۲۱.

– جهانشاهی، رضا (۱۳۹۸) "تحلیل حساسیت مدل های ایجاد سفر درون شهری: مطالعه موردی شهر مشهد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: ایمان آقایان، عبدالاحد چوپانی، شاهرود: دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

– شایانفر، محسنعلی، قانونی بقا، محمد، و جهانی، احسان (۱۳۹٤) "تئوری قابلیت اعتماد سازه‌ها"، تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

– مهندسین مشاور طرح هفتم، (۱۳۹۸) "ساخت، پرداخت، و اعتبارسنجی مدل‌های تولید و جذب سفر" بهنگام‌سازی مطالعات جامع حمل و نقل و ترافیک شهر مشهد، گزارش ۰۲–۳۵–۳۰۰.

– Armoogum, J., Madre, J.L. and Bussiere, Y. (2009). "Measuring uncertainty in long-term travel demand forecasting from demographic modelling: Case study of the Paris and Montreal metropolitan areas." IATSS research, 33(2), 9-20.

– Beser Hugosson, M. (2005) "Quantifying uncertainties in a national forecasting model", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 39, pp. 531-547.

– Bhat, C.R. (2003) "Simulation estimation of mixed discrete choice models using randomized and scrambled Halton sequences", Transportation Research Part B, Vol. 37, No. 9, pp. 837–855.

– Braaten, E. and Weller, G. (1979) "An improved low-discrepancy sequence for multidimensional quasi-Monte Carlo integration", Journal of Computational Physics, Vol. 33, No. 2, pp. 249-258.

– De Jong, G., Daly, A., Pieters, M., Miller, S., Plasmeijer, R. and Hofman, F. (2007) "Uncertainty in traffic forecasts: literature

A four-stage model case-study", Transport Policy, Vol. 38, pp. 64-72.

– Morokoff, W.J. and Caflisch, R.E. (1994) "Quasi-random sequences and their discrepancies", SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 15, No. 6, pp. 1251-1279.

– Matoušek, J. (1998) "On the L2-discrepancy for anchored boxes". Journal of Complexity", Vol. 14, No. 4, pp. 527-556.

– Rasouli, S. and Timmermans, H. (2012). "Uncertainty in travel demand forecasting models: Literature review and research agenda", Transportation Letters, Vol. 4, No. 1, pp. 55-73.

– Rodier, C. J. and Johnston, R.A. (2002). "Uncertain socioeconomic projections used in travel demand and emissions models :could plausible errors result in air quality nonconformity?" Transportation Research Part A: Policy and Practice, 36(7), 613-631.

– Sobol, M.I. (2018) "A primer for the Monte Carlo Method", CRC Press.

– Verma, J. P. and Abdel-Salam, A.S.G. (2019) "Testing statistical assumptions in research", John Wiley & Sons.

– Vershynin, R. (2018) "High-dimensional probability: An introduction with applications in data science", Vol. 47, Cambridge university press.

– Zhao, Y. and Kockelman, K. M. (2002). "The propagation of uncertainty through travel demand models: an exploratory analysis", The Annals of regional science, Vol. 36, No. 1, pp. 145-163.

review and new results for The Netherlands", Transportation, Vol. 34, No. 4, pp. 375-395.

– Flyvbjerg, B. (2017) "The Oxford handbook of megaproject management", Oxford University Press.

– Helton, J.C. and Davis, F. (2002) "Illustration of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis", Risk analysis, Vol. 22, No. 3, pp. 591-622.

– Helton, J.C., Johnson, J.D., Sallaberry, C.J. and Storlie, C.B. (2006) "Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 91, No. 10-11, pp. 1175-1209.

– Helton, J.C., Brooks, D.M. and Sallaberry, C. J. (2020) "Property values associated with the failure of individual links in a system with multiple weak and strong links", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 195, 106642.

– Hess, S., Train, K. E. and Polak, J. W. (2006) "On the use of a modified Latin hypercube sampling (MLHS) method in the estimation of a mixed logit model for vehicle choice", Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 40, No. 2, pp. 147-163.

– Kocis, L. and Whiten, W.J. (1997) "Computational investigations of low-discrepancy sequences", ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), Vol. 23, No. 2, pp. 266-294.

– Manzo, S., Nielsen, O.A. and Prato, C.G. (2015) "How uncertainty in input and parameters influences transport model: output

رضا جهانشاهی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران – عمران را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه بیرجند و درجه کارشناسی ارشد در رشته راه و ترابری در سال ۱۳۹۸ را از دانشگاه صنعتی شاهرود اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی تقاضا، عدم قطعیت تقاضای سفر، و مهندسی ترافیک می‌باشد..

ایمان آقایان، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران – عمران را در سال ۸٤ از دانشگاه صنعتی شاهرود و درجه کارشناسی ارشد در رشته راه وترابری در سال ۸۷ را از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی اخذ نمود. در سال ۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته راه و ترابری از دانشگاه مدیترانه شرقی کشور قبرس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ایمنی ترافیک، سیستم‌های هوشمند حمل و نقل، شبیه سازی ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی شاهرود است.

عبدالاحد چوپانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران – عمران را در سال ۸۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در سال ۸۵ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۹٤ موفق به کسب درجه دکتری در رشته راه و ترابری از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی ترافیک، برنامه ریزی حمل و نقل، و ایمنی ترافیک بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه صنعتی شاهرود است.