بررسی تأثیر ساختار شبکه‌ی معابر درون‌شهری بر ایمنی تردد با استفاده از تئوری چیدمان فضا (مطالعه موردی: شهر مشهد)

علمی – پژوهشی

علی توکلی کاشانی*، دانشیار، گروه حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محمد حمیدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: alitavakoli@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۷– پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵
صفحه ۱۰۸-۸۷

چکیده

فارغ از ویژگی‌های پیوندها و تقاطعات، ساختار شبکه معابر و نحوه‌ی آرایش آن‌ها بر ایمنی تردد مؤثر است و این موضوعی است که در حوزه ایمنی ترافیک، کمتر به آن پرداخته‌شده است. در این مطالعه برای اولین بار در کشور با تعریف یک شاخص کمی از وضعیت شبکه، اثر آن روی ریسک تصادفات ۱۷۸ ناحیه‌ی ترافیکی شهر مشهد دیده‌شده است. به این منظور با استفاده از داده‌های تصادفات سال‌های ۸۵، ۸۶ و ۸۷، شاخص‌های همپیوندی، اتصال، انتخاب، آنتروپی، خوانایی و سایر متغیرهای توصیفی ازجمله متوسط مالکیت خودرو، کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده، تعداد تقاطعات و تراکم شبکه معابر، به برازش مدل‌های پیش‌بینی تصادفات به روش بیزی پرداخته شد. به‌منظور بررسی و مقایسه توانایی شاخص‌های چیدمان فضا در بهبود مدل‌های پیش‌بینی تصادفات از مدل پواسون لگ-نرمال و برای در نظر گرفتن اثر همبستگی‌های فضایی از مدل BYM با توزیع پیشین خود همبسته‌ی شرطی استفاده شد. درنهایت با استفاده از مدل نهایی انتخاب‌شده ریسک وقوع تصادفات نواحی ترافیکی برآورد گردید. نتایج حاصل نشان داد که به‌کارگیری متغیرهای توصیف‌کننده‌ی الگوی شبکه معابر منجر به بهبود مدل‌های پیش‌بینی تصادفات می‌گردند. عملکرد شاخص اتصال نسبت به سایر متغیرهای کمی ساز الگوی شبکه معابر بهتر بود و در نظر گرفتن همبستگی فضایی نواحی ترافیکی، قدرت پیش‌بینی مدل را بهبود بخشید. نتایج حاکی از آن است که شاخص‌های همپیوندی، اتصال و خوانایی با ریسک تصادفات رابطه‌ی مستقیم و آنتروپی و انتخاب رابطه‌ی معکوس دارند. بدین معنی که هر چه الگوی شبکه معابر از حالت درختی (نامنظم) خارج‌شده و شطرنجی‌تر (منظم‌تر) می‌گردد ایمنی تردد در آن کاهش می‌یابد. از این دستاورد می‌توان در طراحی شبکه معابر جدید بهره جست و از ابتدا با چیدمانی مناسب‌تر برای معابر، شبکه‌ای ایمن‌تر ساخت.

واژه‌های کلیدی: الگوی شبکه معابر، چیدمان فضا، ریسک تصادفات درون‌شهری، مدل‌های بیزی، Space Syntax

۱-مقدمه

برای شناسایی هر پدیده، باید علت‌های مؤثر در آن موردمطالعه قرار گیرد. بروز تصادف درراه‌های درون‌شهری به سبب وجود زنجیره‌ای از علت‌هاست که این زنجیره شامل علل و عوامل جاده‌ای و انسانی، وسیله نقلیه و محیط اطراف است که هر یک از آن‌ها نیز مشتمل بر اجزای متعمد دیگر هستند (آیتی و واحدی، ۱۳۸۶). در طول دهه گذشته، مطالعات متعددی برای شناسایی اثر عوامل مؤثر در وقوع تصادفات، مانند ویژگی‌های وسیله نقلیه، ویژگی‌های راننده و عابر پیاده (به‌عنوان‌مثال سن و جنسیت)، ویژگی‌های هندسی جاده (مانند عرض جاده، علائم افقی و عمودی)، ویژگی‌های ترافیکی (به‌عنوان‌مثال حجم

ترافیک و سرعت سفر، کاربری زمین و دسترسی به حمل‌ونقل عمومی) و عوامل دیگر (به‌عنوان‌مثال، آب‌وهوا، زمان و نورپردازی و روشنایی)، صورت گرفته است (Guo, Xu, Pei, Wong, & Yao, 2017). علاوه بر عوامل پیشین، ساختار شبکه راه‌ها به‌عنوان عامل مهمی در ایمنی تردد، تعیین گردیده است (Marshall & Garrick, 2010). ساختار شبکه‌ی راه‌ها ایمنی تردد را از طریق تأثیر بر ویژگی‌های اساسی حجم ترافیک و الگوهای سفر برای هر وسیله نقلیه و عابر پیاده تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zhang, Bigham, Ragland, & Chen, 2015). الگوهای شبکه‌ی راه‌ها هم‌چنین بر فعالیت‌های سفر، سرعت خودرو و رفتار راننده تأثیر می‌گذارند و از این طریق منجر به افزایش یا کاهش ایمنی تردد درراه‌ها می‌گردد(Mohammed A Quddus, 2008). با توجه به مطالب گذشته و اهمیت موضوع، هدف این مطالعه که در سطح ناحیه‌ای انجام‌شده است، بررسی رابطه‌ی بین الگوی شبکه معابر بر ایمنی تردد می‌باشد. بدین منظور در ابتدا الگوی شبکه‌ی معابر نواحی مختلف ترافیکی شهر مشهد شناسایی‌شده و در سه الگوی شطرنجی[1]، شطرنجی تغییر شکل یافته[2] و نامنظم[3] تقسیم‌بندی می‌گردند. سپس ریسک تصادفات مربوط به هر ناحیه‌ی ترافیکی محاسبه می‌شود. در گام اول این مطالعه به بررسی رابطه‌ی ریسک تصادفات و الگوهای مختلف شبکه معابر پرداخته و در گام بعدی به‌منظور رفع مشکلات وارد بر روش مورداستفاده در گام نخست، در ابتدا به‌منظور کمی سازی الگوی شبکه معابر، از تکنیک چیدمان فضا بهره گرفته و شاخص‌های فضایی تئوری چیدمان فضا از قبیل همپیوندی، اتصال، انتخاب، آنتروپی و خوانایی برای هر ناحیه ترافیکی محاسبه می‌گردد و درنهایت برای اولین بار در کشورمان، رابطه‌ی شاخص‌های چیدمان فضا و ریسک تصادفات باهدف ارایه‌ی الگویی بومی، در قالب مدل‌های بیزی بررسی می‌گردد.

۲-پیشینه تحقیق

۲-۱- مطالعات کیفی در رابطه با ساختار شبکه معابر و ایمنی تردد

تجزیه‌وتحلیل ایمنی در سطح ناحیه‌ای از مطالعات اولیه در مورد توزیع فضایی تصادفات است. در سال ۱۹۹۵، لوین و همکاران از داده‌های تصادفات وسایل نقلیه‌ی موتوری مربوط به هونولولو برای بررسی الگوهای توزیع فضایی تصادفات استفاده کردند و یک مدل فضایی برای بررسی ارتباط بین تصادفات وسایل نقلیه موتوری برای گروه بلاک‌های سرشماری و فعالیت‌های تولید سفر ایجاد کردند(Levine, Kim, & Nitz, 1995).

در سال ۱۹۹۶، سوورث و بن جوزپه نرخ تصادفات را در دو الگوی شبکه‌ای منظم و الگوی دارای خطوط منحنی موردبررسی قراردادند و به این نتیجه رسیدند که الگوی منظم دارای نرخ تصادفات بسیار بیشتری نسبت به الگوی با دسترسی محدود می‌باشد (Southworth & Ben-Joseph, 1996). در سال ۲۰۰۶، لاوگرو و ساید از مدلی کلان نگر برای پیش‌بینی ایمنی برای شناسایی امن‌ترین الگوهای شبکه راه‌ها استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که دو الگوی افست سه‌طرفه و الگوی ایمنی خیابان پایدار، امن‌تر از الگوی منظم و الگوی دارای کوچه‌های بن‌بست است (Gordon R Lovegrove & Sayed, 2006).

در سال ۲۰۰۹، ریفات و تی اثر الگوهای خیابان را بر شدت برخورد نشان دادند و دریافتند که الگوهای درختی همراه با حلقه از الگوهای شبکه‌ای منظم امن‌تر هستند(Rifaat & Tay, 2009).

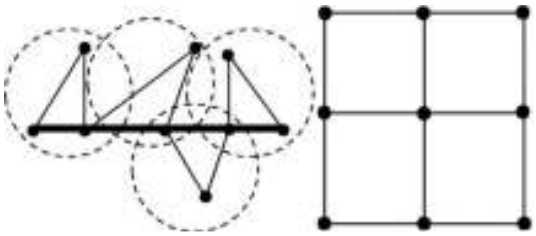
در سال ۲۰۱۰، سان و لاوگرو اثرات الگوهای خیابان‌ها بر ایمنی را در سطح جامعه بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که الگوی منظم درهم‌آمیخته و الگوی افست سه‌طرفه، از الگوی شبکه منظم، الگوی دارای کوچه‌های بن‌بست و الگوی ایمنی خیابان پایدار، امن‌تر هستند (Gordon Richard Lovegrove & Sun, 2010).

طبق مطالعات ریفات و همکاران در سال ۲۰۱۲، چنین استدلال می‌شود که الگوی دارای کوچه‌های بن‌بست، با تصادفات شدیدتری برای عابران پیاده و دوچرخه‌سواران مرتبط است به این دلیل که حضور منحنی‌ها و حلقه‌های مکرر، می‌تواند فاصله دید رانندگان را محدود کند. به‌نوبه خود، این امر می‌تواند منجر به کاهش سطح ادراک و کاهش زمان عکس‌العمل و کاهش توانایی رانندگان برای کاهش سرعت خودرو گردد و لذا می‌تواند شدت آسیب‌های عابر پیاده در صورت برخورد را افزایش دهد. علاوه بر این، وجود خمیدگی و منحنی‌های راه ممکن است حفظ ثبات خودرو و قابلیت مانور را برای رانندگان سخت کند که درنتیجه توانایی رانندگان

برای کاهش سرعت خودرو در شرایط بحرانی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ممکن است خیابان‌های با دسترسی محدود باعث شوند تا بعضی از عابران پیاده در هنگام استفاده از جاده‌ها کمتر احتیاط کنند، زیرا آن‌ها این خیابان‌ها را امن‌تر می‌دانند (Rifaat, Tay, & de Barros, 2012).

۲-۲- مطالعات کمی در رابطه با ساختار شبکه معابر و ایمنی تردد

محدودیت اصلی مطالعات پیشین این است که روش‌های طبقه‌بندی شبکه راه‌ها در آن‌ها عمدتاً بر اساس بازرسی‌های بصری است و ازاین‌رو ممکن است مستعد ابتلا به قضاوت‌های شخصی و عدم اطمینان به دلیل عدم دسترسی به شاخص‌های کمی شبکه باشد. علاوه بر این، این روش‌های طبقه‌بندی دستی، وقت‌گیر است، لذا تعمیم آن‌ها به مناطق موردمطالعه بزرگ محدود می‌گردد (Guo et al., 2017). با شناخت این مشکل، بعضی از مطالعات تلاش می‌کنند که ساختار شبکه را به‌صورت کمی بر اساس رابطه گره-لینک مربوط به شبکه، توصیف کنند. برنامه ریزان شهری مفهوم اتصال را برای توصیف چگونگی قرارگیری لینک‌ها در شبکه‌ی راه‌ها با استفاده از شاخص‌هایی مانند نسبت گره متصل، شاخص گارما و نسبت لینک-گره[4]، تعریف کرده‌اند (Dill, 2004). بااین‌حال، این شاخص‌ها تنها مقیاس شبکه یا تعداد گره‌ها و پیوندها را نشان می‌دهند و نمی‌توانند بین انواع الگوهای مختلف تمایز قائل شوند. به‌عنوان‌مثال، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده‌شده است، دو شبکه دارای طول پیوندهای جاده‌ای یکسان و همچنین تعداد تقاطعات (۱۲ پیوند و ۹ گره) یکسان هستند، به این معنی که آن‌ها نسبت لینک / گره یکسانی دارند. کمی سازی این شبکه‌ها با استفاده از نسبت لینک / گره نشان می‌دهد که آن‌ها یکسان هستند درصورتی‌که، آن‌ها دارای الگوهای پیکربندی مختلفی هستند. شبکه سمت چپ در شکل (۱) یک الگوی "درختی همراه با حلقه" را نشان می‌دهد، درحالی‌که شبکه سمت راست یک الگوی "شبکه منظم" را نشان می‌دهد. نه تعداد گره‌ها و پیوندها بلکه ویژگی‌های پیکربندی هستند که الگوهای شبکه جاده را از یکدیگر متفاوت می‌کنند (Zhang et al., 2015).



شکل۱. دو شبکه با تعداد گره‌ها و لینک‌های برابر

به همین دلیل، برخی از محققان تلاش کرده‌اند تا ساختارهای شبکه‌های راه‌ها را به‌صورت کمی بر اساس اندازه‌گیری‌های توپولوژیکی استخراج کنند. در مطالعه‌ای که توسط وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ انجام شد، از مدل‌های ایمنی کل‌نگر برای یافتن رابطه‌ی بین وقوع تصادفات و متغیرهای جمعیت‌شناسی، کاربری زمین و شبکه راه‌ها استفاده گردید. در این مطالعه، شاخص‌های مختلفی (ضریب شبکه‌بندی، مرکزیت میانی و مرکزیت تراکم) از شبکه برای بررسی تأثیر ساختار شبکه بر ایمنی (در سطح محلی) تعیین گردید. آن‌ها با استفاده از چندین مدل بیزین خود همبسته شرطی به بررسی روابط فضایی بین نواحی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تصادفاتی که بر روی راه‌های نگهداری نشده توسط دولت اتفاق می‌افتد ارتباط نزدیکی با ساختار شبکه‌ی محلی و ویژگی‌های جمعیت شناختی درون ناحیه دارد. در مقابل تصادفاتی که درراه‌های شریانی نگهداری شده توسط دولت واقع می‌شوند ارتباط نزدیکی با ترافیک و مشخصه‌های جاده دارد. از میان شاخص‌های محاسبه‌شده در این مطالعه، ضریب شبکه‌بندی بهترین عملکرد را در نشان دادن ساختار شبکه از خود نشان داد(Xuesong Wang, Jin, Abdel-Aty, Tremont, & Chen, 2012).

در سال ۲۰۱۲، ژانگ و همکاران، ارتباط بین ساختار شبکه راه‌ها و تصادفات مربوط به عابران پیاده ودوچرخه‌سواران را مورد بررسی قراردادند. برای این کار به محاسبه‌ی سه شاخص میانگین فاصله هندسی، مرکزیت میانی شبکه و ضریب خوشه‌بندی کلی در استان المدا در ایالت کالیفرنیا پرداختند. مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد هنگامی‌که شبکه بیشتر بر راه‌های اصلی متمرکز باشد، تصادفات غیر موتوری کمتر خواهد بود، شبکه‌ای که دارای متوسط تعداد تقاطعات بیشتری بین هر زوج جاده است، دارای تصادفات مربوط به عابران پیاده و دوچرخه‌سواران کمتری است و شبکه‌ای که به چندین زیر شبکه خوشه‌بندی

می‌گردد دارای تصادفات غیر موتوری کمتری خواهد بود (Zhang, Bigham, Li, Ragland, & Chen, 2012).

مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۳ توسط وانگ و همکاران به‌منظور مقایسه‌ی کارایی سه شاخص ضریب شبکه‌بندی، مرکزیت میانی و مرکزیت تراکم در تعیین ساختار شبکه با استفاده از داده‌های مربوط به استان‌های ارنگ و هیلزبروگ ایالت کالیفرنیا انجام شد نتایج این مطالعه نیز حاکی از آن بود که شاخص ضریب شبکه‌بندی توصیف بهتری از ساختار شبکه ارایه می‌دهد (X. Wang, Wu, Abdel-Aty, & Tremont, 2013).

مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۱۵ توسط ژانگ و همکاران برای یافتن تأثیر ساختار شبکه راه‌ها بر تصادفات مربوط به عابران پیاده و دوچرخه‌سواران در استان المدا در ایالت کالیفرنیا انجام گرفت. سه مدل آماری با استفاده از تکنیک (GWR) برای سه شاخص میانگین فاصله هندسی، مرکزیت میانی شبکه و ضریب خوشه‌بندی کلی و با در نظر گرفتن سایر عوامل مثل رفتار ترافیکی، کاربری زمین، تسهیلات حمل‌ونقل و مشخصات جمعیت‌شناسی ایجاد گردید. نتایج نشان می‌داد که میانگین فاصله‌ی هندسی طولانی‌تر، مرکزیت میانی شبکه بیشتر و ضریب خوشه‌بندی کلی بزرگ‌تر با تصادفات غیر موتوری کمتر در ارتباط است (Zhang et al., 2015).

در سال ۲۰۱۷ کیان گو و همکاران به بررسی تأثیر الگو شبکه راه‌ها بر ایمنی عابران پیاده در ۱۳۱ ناحیه ترافیکی در هنگ‌کنگ پرداختند. آن‌ها در مطالعه‌ی خود از یک روش جایگزین نوآورانه که به‌عنوان چیدمان فضا شناخته می‌شود، به‌منظور تعیین ویژگی‌های الگوهای مختلف شبکه، استفاده کردند. در این مطالعه مدل‌های بیزین پواسون–لگ نرمال همراه با خودهمبستگی شرطی با سه ساختار مجاورت مختلف: هم‌جواری، فاصله‌ی مرکز هندسی، اتصال شبکه راه توسعه داده شد. سپس این مدل‌ها با مدل پواسون لگ–نرمال همتای خود بدون در نظر گرفتن تأثیر همبستگی فضایی، مقایسه گردید. نتایج نشان داد که همپیوندی بالاتر با تعداد تصادفات عابران پیاده‌ی بیشتر در ارتباط است. الگوی نامنظم ایمن‌ترین و الگوی منظم ناایمن‌ترین الگو شناخته شد. برازش خوب مدل بیزین خود همبسته شرطی با ساختار مجاورت مبتنی بر اتصال شبکه راه، نشان‌دهنده‌ی اهمیت داشتن محاسبه‌ی دقیق برای روابط فضایی است هنگامی‌که به مدل‌سازی داده‌های تصادفات متراکم شده به‌صورت فضایی می‌پردازیم (Guo et al., 2017).

۳–داده‌ها و روش مطالعه

۳–۱–داده‌های تصادفات و سایر متغیرهای توصیفی

داده‌های استفاده‌شده در این مطالعه از قبیل مجموع سفرهای تولید و جذب‌شده، متوسط مالکیت خودرو، کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده، تعداد تقاطعات، تراکم شبکه معابر و داده‌های مربوط به‌کل تصادفات واقع‌شده در معابر فرعی طی سال‌های ۸۵، ۸۶ و ۸۷ در شهر مشهد می‌باشد که از پایگاه اطلاعات جغرافیایی (GIS) که توسط سازمان حمل‌ونقل و ترافیک شهر مشهد تهیه‌شده است، به‌دست‌آمده است.

لازم به ذکر است علت استفاده از تصادفات معابر فرعی به‌جای کل تصادفات واقع‌شده در همه‌ی معابر اعم از معابر فرعی و معابر اصلی این است که نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد (Xuesong Wang et al., 2012)، که تعداد تصادفات معابر فرعی (غیر اصلی) ارتباط نزدیکی با شاخص‌های ساختار شبکه و جمعیت نواحی ترافیکی دارد این در حالی است که تصادفات معابر اصلی ارتباط نزدیکی با خصوصیات خیابان‌ها و ترافیک معابر اصلی دارد. ازآنجاکه هدف مطالعه حاضر بررسی رابطه‌ی بین الگوهای مختلف شبکه‌ی معابر و ایمنی تردد (ریسک تصادفات) می‌باشد. لذا استفاده از تصادفات معابر فرعی می‌تواند نتایج نزدیک‌تری به واقعیت ارایه نماید.

۳–۲–مواجهه

دو روش عمده برای جمع‌آوری داده‌های مواجهه وجود دارد که عبارت‌اند از سرشماری و آمارگیری از سفر کننده‌ها و نیز آمارگیری‌های میدانی ترافیکی. برخی از شاخص‌های مواجهه‌ی همفزون از قبیل جمعیت، تعداد وسایل نقلیه‌ی دارای پلاک، تعداد رانندگان دارای گواهینامه رانندگی، مصرف سوخت و تعداد سفرهای تولید و جذب‌شده‌ی هر ناحیه‌ی ترافیکی (Naderan & Babaei, 2011; Shariat Mohaymany, Shahri, Mirbagheri, & Matkan, 2014)، مواردی هستند که درروش اول مطرح می‌گردند. درروش دوم که آمارگیری ترافیک می‌باشد، داده‌های حجم ترافیک معابر، وسیله نقلیه – مسافت پیموده شده یا VKT، به‌عنوان مواجهه مورداستفاده قرار می‌گیرد (Wundersitz & Hutchinson, 2008).

۳-۳-شناسایی الگوهای شبکه معابر

به‌منظور بررسی تأثیر الگوی شبکه‌ی معابر بر ایمنی تردد در اولین گام می‌بایست الگوهای نواحی مختلف شهر مشهد شناسایی‌شده و ارتباط آن‌ها با ایمنی تردد (ریسک تصادفات) موردبررسی قرار گیرد. در این مطالعه با توجه به عدم شکل‌گیری شبکه معابر در برخی از نواحی ۲۵۳ گانه مشهد، الگوی شبکه‌ی معابر ۱۷۸ ناحیه‌ی ترافیکی شهر مشهد موردمطالعه و شناسایی قرار می‌گیرد. در ابتدا شبکه معابر این نواحی به‌صورت بصری و با توجه به شکل ظاهری و مطالعات گذشته (Guo et al., 2017)، به سه الگوی شطرنجی، شطرنجی تغییر شکل یافته و نامنظم تقسیم‌بندی می‌شود.

۳-٤-روش کمی سازی شبکه معابر

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد روش‌های متکی به بازرسی بصری مستعد ابتلا به قضاوت‌های شخصی و عدم اطمینان به دلیل عدم دسترسی به شاخص‌های کمی شبکه می‌باشد. علاوه بر این، این روش‌های طبقه‌بندی دستی، وقت‌گیر هستند، لذا تعمیم آن‌ها به مناطق موردمطالعه بزرگ محدود می‌گردد. لذا در گام بعدی این مطالعه به کمی سازی شبکه‌ی معابر با استفاده از تئوری چیدمان فضا خواهیم پرداخت. در ادامه به بررسی اجمالی این تئوری و شاخص‌های آن پرداخته می‌شود.

۳-٤-۱-معرفی تئوری چیدمان فضا

روش چیدمان فضا که در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ توسط بیل هیلیر در دانشگاه لندن معرفی گردید، یک نگرش و یک ابزار تحلیلی در معماری و شهرسازی است که در طول دهه‌های ۸۰ و ۹۰ توسعه یافت. در ابتدا واژه‌ی چیدمان (نحو و ترتیب) برای تحلیل روابط و قوانین اولیه‌ی ساختار فضایی توسط هیلیر و همکارانش در سال ۱۹۷٤ و ۱۹۷٦ مورداستفاده قرار گرفت. روشی برای چگونگی تحلیل اجزای تشکیل‌دهنده‌ی فضا توسط هیلیر و همکارانش در سال ۱۹۹۸، ارایه شد طوری که این روش مورد توجه معماران و طرّاحان برجسته‌ای همچون، نورمن فاستر و ریچارد راجرز قرار گرفت (Bill Hillier, 1999). بررسی و تحقیق درباره نحوه‌ی ارتباط فرم‌های فضایی و اجتماعی، اساس و مبنای نظریه چیدمان فضاست. این نظریه فضا را به‌عنوان هسته‌ی اولیه و اصلی در چگونگی پدیده‌های اجتماعی و فرهنگی می‌داند. هرچند خود فضا نیز در طی فرایندهای اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی شکل می‌گیرد، خود به‌عنوان بستری برای انجام فعالیت‌های اجتماعی و فرهنگی در نظر گرفته می‌شود. تا حدی که معمولاً به‌صورت نامرئی فرض شده و فرم آن معمولاً موردتوجه قرار نمی‌گیرد. (Makri & Folkesson, 1999). طبق این نظریه عامل اصلی گسترش فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی نظیر الگوی گسترش کاربری‌های تجاری، الگوی گسترش قومیت‌های مختلف و الگوی گسترش حرکت در سطح شهر، نحوه‌ی ترکیب فضاهای شهری و به عبارتی پیکره‌بندی فضایی است(Bill Hillier & Vaughan, 2007). روش چیدمان فضا کمک می‌کند تا پیامد تغییرات فرم کالبدی شهرها، خصوصاً شبکه راه‌ها بر ذهنیت و درنتیجه بر رفتار شهروندان شناخته شود. برای این امر با استفاده از روش چیدمان فضا، نحوه چیده شدن کلیه فضاهای شهری موجود به دنبال هم (ساختار ترتیبی فضاها) تجزیه‌وتحلیل می‌گردد.

چیدمان فضا، مشخصات ترتیب (پیکره‌بندی) ساختار شهر را به‌وسیله اندازه‌گیری رابطه بین هر جز در سیستم شهری با همه اجزای دیگر بررسی می‌کند. در این روش تلاش می‌شود که ساختارهای فضایی را با ویژگی‌های رفتاری و اجتماعی سیستم شهری مرتبط کنند (شکرانی، ۱۳۹۲).

۳-٤-۲-مفاهیم مورداستفاده در روش چیدمان فضا

فضا

به عقیده‌ی هیلیر باید تعریفی مستقل از فضا ارایه داد. تعریفی که درباره‌ی کاربرد فضا و یا تصور فضا نباشد و یا آن را در یک دیدگاه دکارتی به پس‌زمینه‌ی انتزاعی انسان و اشیاء تقلیل ندهد. فضا است که روابط را تعریف می‌کند و الگوهای هم‌بودگی و یا عدم هم‌بودگی را معین می‌کند. این تعریف فضا را معادل پیکره‌بندی یا ساختار می‌انگارد. پیکربندی اشاره به درک کلیت یک ساختار دارد. ساختاری که از مجموعه از روابط وابسته به یکدیگر برآمده است که هر جزء وابسته به دیگران تعریف می‌گردد؛ اما شناخت فضا به‌صورت کلیت یکپارچه مشکل است چراکه همواره با بخشی از فضا مواجهیم و درک کلیت آن در یک‌زمان ممکن نیست. نکته قابل‌توجه دیگر این است که فعالیت انسان‌ها در فضا مثل زندگی کردن، ارتباط و عدم آن در قالب گروه انسان‌ها معنی‌دار است و نه افراد به‌صورت مستقل یعنی رابطه میان فضا و هستی اجتماعی

رابطه‌ای میان ساختار گروه انسان‌ها و ساختار فضا است. مفهوم فضا در این نگرش فضاهای باز است. فضاهایی مانند خیابان‌ها، میدان‌ها، بازارها، بزرگراه‌ها، خطوط مترو، اتاق‌ها، راهروها، سالن‌ها و... . این فضاها معمولاً توسط دیوارها، حصارها و سایر موانع که جلو میدان دید و عبور و مرور را می‌گیرند از هم افراز شده‌اند. در این نظریه ما با دو نوع فضا سروکار داریم:

- فضای کوچک‌مقیاس
- فضای بزرگ‌مقیاس

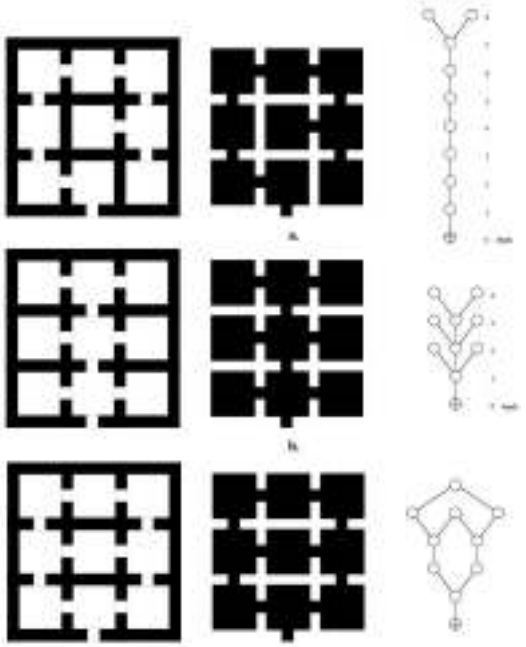
ساختمان‌ها فضا را سازمان‌دهی می‌کنند و روابط و فعالیت‌های اجتماعی را در بیرون و درون خود تعریف می‌کنند. پس ساختمان حامل تعاریف و ارزش‌های اجتماعی است(نورانی، ۱۳۹۱).

ترتیب فضایی

به‌طور خیلی ساده، پیکره‌بندی فضایی در علوم شهری همان مفهومی را دارد که هیئت فلکی در علم نجوم؛ بدین ترتیب که هیئت فلکی خارج از خصوصیات هریک از ستارگان، ارتباط بین آن‌ها را مورد رصد قرار می‌دهد. پیکره‌بندی فضایی در مطالعات معماری و شهرسازی نیز فارغ از ارزیابی خصوصیات فضاها به‌صورت انفرادی، ارتباط بین آن‌ها را موردمطالعه قرار می‌دهد؛ اما به زبانی حرفه‌ای‌تر هیلیر در یک تصویر منظور از پیکره‌بندی فضایی که در آن ارتباط بین فضاها اهمیت پیدا می‌کند را به تصویر می‌کشد (شکل۲).

در این تصویر سه خانه حیاط مرکزی‌شان داده‌شده‌اند که فضاهای مختلف حول فضای مرکز خانه چیده شده‌اند. این سه خانه ازنظر شکل ریز فضاها، مواد و مصالح و کنار هم قرارگیری آن‌ها در کل پلان شباهات زیادی با یکدیگر دارا می‌باشند. تنها تفاوتی که در این سه بنا دیده می‌شود، نحوه قرارگیری بازشوها و ارتباط بین فضاها می‌باشد؛ اما همین تفاوت کافی است تا این سه خانه ازنظر ترکیب فضاها و پیکره‌بندی آن‌ها تفاوت‌های اساسی باهم پیدا کنند. این تفاوت اساسی وقتی مشهود می‌شود که تأثیر آن را در نحوه تجربه کردن فضا از طرف مخاطب موردبررسی قرار دهیم. الگوی فضای هر خانه و نحوه ترکیب ریز فضاها در هریک از آن‌ها توسط یک گراف در مقابل آن‌ها نشان داده‌شده است به‌طوری‌که هر گره معرف یک فضا و هر یال از گراف معرف ارتباط بین دو فضا می‌باشد. این گراف‌ها در اصل نحوه ارتباط بین فضاهای هریک از این خانه‌ها را نشان می‌دهد و معرف الگویی است که مخاطب می‌تواند هر خانه را تجربه کند. در این مثال ساده هیلیر نشان می‌دهد که قبل از هر خصیصه دیگر از فضا مانند فرم، شکل، رنگ، بافت و غیره که خصیصه‌های فردی هر فضا می‌باشند، آنچه بر روی نحوه تجربه کردن هر یک از این خانه‌ها تأثیر می‌گذارد، نحوه ارتباط بین فضاها با یکدیگر می‌باشد که از آن به‌عنوان پیکره‌بندی فضایی یاد می‌شود. در ادامه توضیح می‌دهد که این نحوه نگرش به فضا شناخت رفتارهای اجتماعی را که معمولاً به‌صورت کیفی هستند، به‌صورت کمی امکان‌پذیر می‌کند.

او بیان می‌دارد که پیکره‌بندی فضاها را در یک بنا و یا یک شهر می‌توان به‌صورت گراف موردبررسی قرارداد و از این طریق برای شناخت آن از تحلیل‌های گراف ریاضی استفاده کرده و به‌این‌ترتیب یک پدیده کیفی را به‌صورت کمی مورد تحلیل‌های بیشتر قرارداد (ریسمانچیان و بل، ۱۳۸۹).



شکل۲. مثالی در درک پیکره‌بندی فضایی

(Bill Hillier & Vaughan, 2007)

مفهوم ترتیب فضایی به این دلیل اهمیت دارد که نمایش‌دهنده اهمیت چگونگی ارتباطات فضایی در کل سیستم است. هر تغییر در نحوه چیدمان فضاها تغییراتی را در سطح کل ترتیب فضایی ایجاد خواهد کرد. به‌عبارت‌دیگر، در سطح شهر هرگونه تغییر در نقشه شهر (اضافه یا کم شدن فضا مانند خیابان، فضای باز و غیر آن) تغییراتی را در روابط ترتیب

فضایی کل شهر ایجاد خواهد کرد. چنین تغییراتی می‌تواند احتمال وقوع فعالیت‌ها و حوادث را دگرگون سازد. تحقیقات متعدد نشان داده است که هر تغییر در چیدمان فضا، میزان و نحوه فعالیت‌ها را در فضاها تغییر داده است (عباس‌زادگان، ۱۳۸۱).

۳-٤-۳-پارامترهای تحلیل فضایی در روش چیدمان فضا همپیوندی

همپیوندی یکی از متغیرهای اندازه‌گیری کیفیت فضا در مقیاس کلان است و در بسیاری از مطالعات نشان‌دهنده قابلیت دسترسی به یک فضای شهری است(Charalambous & Mavridou, 2012). یعنی فضایی که از بیشترین میزان همپیوندی برخوردار است نسبت به دیگر فضاها بیشترین میزان دسترسی را نیز داراست. این‌گونه فضاها بیشتر شامل فضاهای تجاری و دسترسی‌های اصلی شهر می‌شود (یزدانفر، موسوی، و زرگردقیق، ۱۳۸۷).

همپیوندی میانگین عمق فضا به همه فضاهای سیستم است(Klarqvist, 1993). همپیوندی اصلی‌ترین مفهوم چیدمان فضاست .ارزش میزان همپیوندی هر خط (فضا) میانگین تعداد خطوط (فضاها) واسطی است که بتوان از آن به تمام فضاهای شهر رسید .بنابراین، همپیوندی در روش چیدمان فضا مفهومی توپولوژیکی دارد و نه مفهومی فاصله‌ای و متریک(عباس‌زادگان، ۱۳۸۱).

از دیدگاه چیدمان فضا، همپیوندی یک مفهوم اساسی در تحلیل‌های فضایی است و همبستگی بالایی با میزان تردد و الگوی حرکت فرد در فضا دارد (Teklenburg, Timmermans, & Van Wagenberg, 1993). پژوهش‌های انجام‌شده حاکی از آن است که چگونگی پراکندگی ارزش همپیوندی در سطح شهر با چگونگی حرکت عابران پیاده در آن همبستگی قوی دارد (Turner, 2007).

درواقع همپیوندی یک فضای شهری، میزان یکپارچگی آن را با کل شهر نشان می‌دهد (Turner, 2007). به‌عبارت‌دیگر همپیوندی مطابق با مفهوم انسجام فضایی است. هر چه میزان همپیوندی بیشتر باشد به معنای آن است که یکپارچگی بیشتری بین فضای موردبررسی و دیگر فضاها و تحت مجموعه، کلیت فضایی وجود دارد (یزدانفر et al., 1387). همپیوندی متغیری است که رابطه عکس با عمق فضا دارد. در تحلیل‌های محوری، بیشترین میزان همپیوندی به خطی اطلاق می‌شود که از آن می‌توان به بیشترین تعداد فضا دست‌یافت. ازاین‌رو در فضاهای شهری، فضای همپیوند به فضایی اطلاق می‌شود که با کمترین چرخش یا تغییر مسیر به بیشترین تعداد فضا دست می‌یابد (سلطانی فرد و صابری کاریزی، ۱۳۹۷)، ازاین‌رو مسیرهایی که بیشترین شکستگی یا تغییر جهت را دارند، از متوسط همپیوندی پایینی برخوردارند. همپیوندی می‌تواند از طریق عدم تقارن نسبی و یا عدم تقارن نسبی حقیقی اندازه‌گیری شود. این شاخص‌ها بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$RA_i = \frac{2(MD_i - j)}{n-2} \quad (۱)$$

$$RRA_i = \frac{RA_i}{D_n} \quad (۲)$$

که در آن D_n برابر است با:

$$D_n = 2\{n(log_i^{a_n-2a_{n-1}} + 1\}[(n-1)(n-2)] \quad (۳)$$

ارزش D است که ارزش استاندارد را برای اندازه‌گیری همپیوندی فراهم می‌آورد. این شاخص‌ها می‌توانند برای توصیف مختصات محلی و فراگیر پیکره‌بندی فضایی در ارتباط با همپیوندی و یا جدا افتادگی مورداستفاده قرار گیرند (سلطانی فرد و صابری کاریزی، ۱۳۹۷).

در روش چیدمان فضا همپیوندی شاخصه‌ای است که به هرگونه تغییر در نقشه‌ی شهر حساس است و این تغییرات را به‌صورت ریاضی و گرافیکی منعکس می‌سازد؛ بنابراین نقشه همپیوندی ابزاری تحلیلی و عینی برای ارزیابی یک طرح به لحاظ چگونگی جای‌گیری توسعه‌ی جدید در ساختار موجود هر منطقه است. با توجه به حساسیت پارامتر همپیوندی به تغییرات کالبدی شهر، می‌توان در فرایند طراحی شهری-به خصوص در مرحله‌ی ارزیابی طرح‌های مختلف- از آن بهره جست و تأثیر هرگونه دخالت در بافت شهر را به‌صورت گرافیکی مشاهده کرد (عباس‌زادگان، ۱۳۸۱).

اتصال (پیوستگی)

"اتصال" واضح‌ترین مفهوم در میان پارامترهای تحلیل فضایی چیدمان فضا است. مفهوم عینی اتصال به معنی ارتباط فضایی می‌باشد. بدین معنا که هر چه مقدار اتصال بیشتر باشد تعداد ارتباطات موردنظر و دیگر فضاها بیشتر است. می‌توان مفهوم کاربری آن را دسترسی بیان نمود. مقدار عددی اتصال

بیان‌کننده تعداد دسترسی‌های منتهی به فضای موردنظر است (یزدانفر et al., 1387). به‌عبارت‌دیگر اتصال عبارت است از تعداد گره‌هایی که با یک گره ارتباط مستقیم دارند و یا به‌عبارت‌دیگر فاصله آن‌ها از یکدیگر معادل یک گام فضایی می‌باشد (ریسمانچیان و بل، ۱۳۸۹).

به‌بیان‌دیگر اتصال متغیری است که تعداد خطوطی که مستقیماً به یک فضا متصل شده‌اند را محاسبه می‌کند (Jiang & Claramunt, 2002). ازنظر فضایی، پیوستگی یک متغیر فضایی در مقیاس محلی است و در یک سیستم پیوسته، اندازه آن بیانگر میزان نفوذپذیری[۵] است. بر این اساس رابطه ریاضی عبارت است از:

$$C_i = k \qquad (٤)$$

که در آن k عبارت است از تعداد گره‌هایی که به‌طور مستقیم ارتباط داده‌شده است(Asami, Kubat, Kitagawa, & Iida, 2003).

انتخاب

مقدار دیگری که در روش چیدمان فضا به دست می‌آید مقدار انتخاب می‌باشد. مقدار انتخاب برای یک گره هنگامی زیاد می‌باشد که کوتاه‌ترین مسیرهای موجود بین هر دو گره در سیستم از گره موردنظر عبور کند. به‌عبارت‌دیگر اگر احتمال استفاده از فضایی در طی کردن کوتاه‌ترین مسیرهای موجود بین هر دو فضای احتمالی در کل سیستم شهری زیاد باشد، آنگاه مقدار انتخاب این فضا بیشتر می‌باشد. فضاهایی که میزان انتخاب در آن‌ها بالا می‌باشند معمولاً فضاهایی را نشان می‌دهند که برای رسیدن به همپیوندترین فضاها احتمال دارد بیشتر مورداستفاده قرار گیرند. مطالعات مختلفی از وجود همبستگی بین مقدار انتخاب و حرکت عابر پیاده و یا مکان‌یابی کاربری‌های تجاری خبر می‌دهد (ریسمانچیان و بل، ۱۳۸۹).

آنتروپی

آنتروپی توزیع فضایی کلی مکان‌ها را از هر گره در فضای قابل‌عبور، توصیف می‌کند و به چگونگی نظم و ترتیب محیط فضایی ارتباط دارد. علاوه بر این، هرچه فضاهای متقارن بیشتری در ارتباط با هر فضای دیگری وجود داشته باشد، مقدار آنتروپی پایین‌تر است(Rybarczyk & Wu, 2014).

خوانایی

روش چیدمان فضا قابلیت‌هایی نیز در زمینه سنجش میزان خوانایی یا وضوح یک فضا دارد.(Penn, 2003). شاخص "وضوح" شاخصی است که همبستگی میان شاخص‌های "اتصال" و "همپیوندی" را نشان می‌دهد و بیان‌گر این است که تا چه حد "عمق" یک فضا نسبت به‌کل طرح را می‌توان از تعداد "اتصالات" مستقیم آن استنباط کرد. به‌بیان‌دیگر یعنی بتوان ازآنچه درون یک فضا مشاهده می‌شود، یعنی از شاخص "اتصال"، میزان "همپیوندی" فضای مزبور را با کل مجموعه به‌درستی حدس زد (پیمانی و ذوالقدر، ۱۳۹۰).

۳-۵-تحلیل آماری

داده‌های تصادفات داده‌هایی غیرخطی، گسسته و غیر منفی هستند که تقریباً از توزیع پواسون پیروی می‌کنند. یک فرض اساسی در مورد مدل پواسون این است که میانگین داده‌ها باید با واریانس آن‌ها برابر باشد؛ یعنی E(yi) =Var(yi). اگر این برابری وجود نداشته باشد، گفته می‌شود که داده‌ها کم پراکنده (E(yi)>Var(yi)) یا بیش پراکنده (E(yi)<Var (yi)) هستند. در صورت عدم توجه به این مسئله، بردار ضرایب دارای بایاس٦ خواهد شد. در اکثر موارد عملی، واریانس داده‌های تصادف از میانگین آن‌ها بیشتر است، بنابراین داده‌ها به‌صورت بیش پراکنده در نظر گرفته می‌شوند.

بیش پراکندگی با فرض توزیع دوجمله‌ای منفی و یا توزیع پواسون لگ-نرمال برای داده‌های تصادفات، قابل‌حل است. اگرچه مدل NB به‌طور گسترده در تجزیه‌وتحلیل ایمنی راه مورداستفاده قرارگرفته است، لرد و میراندا-مورنو (۲۰۰۸) اخیراً دریافتند که مدل PLN می‌تواند جایگزین بهتری در موارد دارای اندازه نمونه کوچک و مقادیر کم میانگین باشد. درنتیجه، توزیع PLN نسبت به سایر توزیع‌های ترکیبی پواسون از طریق در نظر گرفتن توزیع لگ-نرمال برای خطاها، ارجحیت دارد (Guo et al., 2017). مدل PLN که یکی از مهم‌ترین مدل‌ها در چهارچوب بیز تجربی (EB) می‌باشد قادر به در نظر گرفتن بیش پراکندگی ساختار نیافته یا ناهمگنی مشاهده نشده به علت متغیرهای حذف‌شده می‌باشد. بااین‌حال، این مدل مسئله وابستگی مکانی در میان ناحیه‌های ترافیکی را نادیده می‌گیرد. برای در نظر گرفتن همبستگی فضایی میان ناحیه‌های ترافیکی نزدیک به هم، مدل‌های بیزی فضایی ازجمله

مدل بیز کامل (BYM) با توزیع پیشین خود همبسته‌ی شرطی (CAR)، در مطالعات تجزیه‌وتحلیل ایمنی بسیاری مورداستفاده قرارگرفته است (Jonathan Aguero-Valverde, 2013; Jonathan Aguero-Valverde & Jovanis, 2008, 2010; Mohammed A Quddus, 2008; Xuesong Wang et al., 2012; X. Wang et al., 2013).

۳-۵-۱-مدل پواسون لگ- نرمال

ساختار مدل پواسون لگ-نرمال برازش داده‌شده به داده‌ها به شرح زیر است:

$$y_i|\lambda_i \sim Poisson(\lambda_i) \quad (۵)$$

$$\lambda_i = \exp(\beta_0 + \ln((Prod + Attr)_i) + \beta_1 * SS_i + \beta_2 * VKT_i + \beta_3 * Junction_i + \beta_4 * Dens - Link_i + \beta_5 * ACO_i + \theta_i) \quad (۶)$$

$$\theta_i \sim Normal\ (0, \tau_\theta^2) \quad (۷)$$

که در آن y_i تعداد تصادفات فرعی هر ناحیه ترافیکی، λ_i تعداد تصادفات مورد انتظار برای هر ناحیه ترافیکی، $(Prod + Attr)_i$ مقدار مواجهه برای هر ناحیه ترافیکی، SS_i شاخص‌های چیدمان فضا توصیف‌کننده الگوی شبکه معابر و θ_i خطای ناهمگنی مشاهده نشده (برای مثال ناهمبسته) مدل است (توضیح سایر متغیرها در جدول (۱) آورده شده است). τ_θ^2 پارامتر دقت (معکوس واریانس) با توزیع پیشین $gamma(0.5,0.0005)$ است که توسط ویکفیلد و همکاران (Wakefield, Best, & Waller, 2000) ارایه گردید و توسط آگرو و همکاران (Jonathan Aguero-Valverde & Jovanis, 2008, 2010) به کار گرفته‌شده است.

۳-۵-۲-مدل BYM

برای در نظر گرفتن ناهمگنی به وجود آمده به خاطر همبستگی‌های فضایی، دومین جز تأثیرات رندمی ϕ_i به مدل اضافه می‌شود. ساختار مدل BYM برازش داده‌شده به شرح رابطه ۸ می‌باشد.

$$y_i|\lambda_i \sim Poisson(\lambda_i) \quad (۸)$$

$$\lambda_i = \exp(\beta_0 + \ln(Prod + Attr_i) + \beta_1 * SS_i + \beta_2 * VKT_i + \beta_3 * Junction_i + \beta_4 * Dens - Link_i + \beta_5 * ACO_i + \theta_i + \phi_i) \quad (۹)$$

$$\theta_i \sim Normal\ (0, \tau_\theta^2) \quad (۱۰)$$

که در آن ϕ_i خطای همبستگی فضایی است. تأثیر همبستگی فضایی، ϕ_i، از طریق مدل خود بازگشتی شرطی پیشنهادشده توسط بیسک و همکاران (Besag, York, & Mollié, 1991)، لحاظ می‌شود که عبارت است از:

$$[\phi_i|\phi_j, i \neq j, \tau_\phi^2] \sim N(\bar{\phi}_i, \tau_i^2) \quad (۱۱)$$

$$\bar{\phi}_i = \frac{\sum_{i \neq j} \omega_{ij}\phi_i}{\sum_{i \neq j} \omega_{ij}} \quad و \quad \tau_i^2 = \frac{\tau_\phi^2}{\sum_{i \neq j} \omega_{ij}} \quad (۱۲)$$

که ω_{ij} نشانگر مجاورت برای دو ناحیه‌ی ترافیکی i و j در ماتریس مجاورت W است. برای τ_ϕ^2 نیز توزیع پیشین $gamma(0.5,0.0005)$ طبق پیشنهاد (*Wakefield et al., 2000*) در نظر گرفته می‌شود. اگر ناحیه‌های ترافیکی i و j نزدیک به هم باشند $\omega_{ij} = 1$ و در غیر این صورت $\omega_{ij} = 0$ می‌باشد.

۳-۵-۳-مقایسه مدل‌ها

اشپیگل هالتر و همکاران، معیار اطلاع انحراف را برای مقایسه بیزی مدل‌ها معرفی کردند. این معیار هر دو جنبه برازش و پیچیدگی مدل را دربرداشته و مشکلات تکنیکی مربوط به پیشین‌های ناآگاهی بخش را نداشته و به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$DIC = \overline{D(\theta)} + P_D \quad (۱۳)$$

که در آن $\overline{D(\theta)}$ میانگین پسین انحراف بوده و میزان برازش را نشان می‌دهد. P_D که تعداد پارامترهای مؤثر تعریف می‌شود، میزان پیچیدگی مدل را نشان می‌دهد و برابر با تفاضل بین میانگین پسین انحراف و میزان انحراف در نقطه میانگین پسین پارامترهای مدل بوده و به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

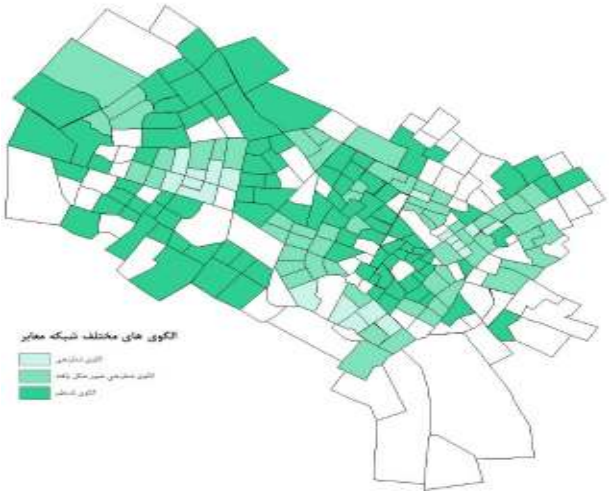
$$P_D = \overline{D(\theta)} - D(\bar{\theta}) \quad (۱۴)$$

بر اساس این معیار مدلی که دارای کمترین مقدار DIC باشد به‌عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود. این معیار برای هراندازه نمونه قابل‌استفاده بوده و به‌آسانی توسط روش‌های زنجیر مارکوف مونت‌کارلو قابل‌محاسبه است (رحمتی، ۱۳۹۲).

٤-نتایج

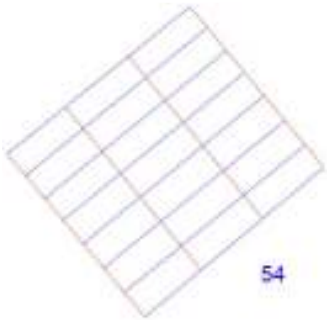
٤-۱-شناسایی الگوهای شبکه معابر نواحی ترافیکی شهر مشهد

در این مطالعه از ۱۷۸ ناحیه موردمطالعه ۱۹ ناحیه با الگوی شطرنجی، ٦۰ ناحیه با الگوی شطرنجی تغییر شکل یافته و ۹۹ ناحیه با الگوی نامنظم شناسایی گردیدند. در شکل (۳) الگوی شبکه‌ی معابر ۱۷۸ ناحیه موردمطالعه مشخص‌شده‌اند.

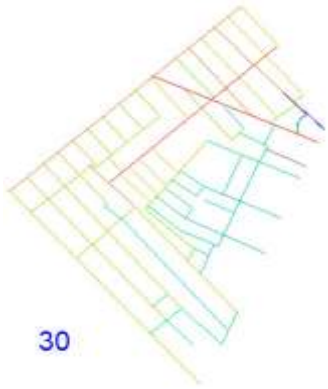


شکل۳. توزیع مکانی الگوهای مختلف شبکه‌ی معابر

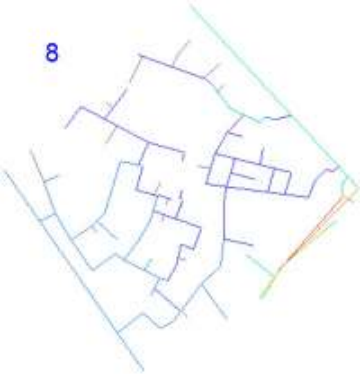
در شکل‌های (٤)، (٥) و (٦) نمونه‌هایی نواحی ترافیکی شهر مشهد با الگوهای شطرنجی، شطرنجی تغییر شکل یافته و نامنظم نمایش داده‌شده‌اند.



شکل٤. ناحیه ترافیکی شماره ٥٤ نمونه‌ای از الگوی شطرنجی



شکل٥. ناحیه ترافیکی شماره ۳۰ نمونه‌ای از الگوی شطرنجی تغییر شکل یافته

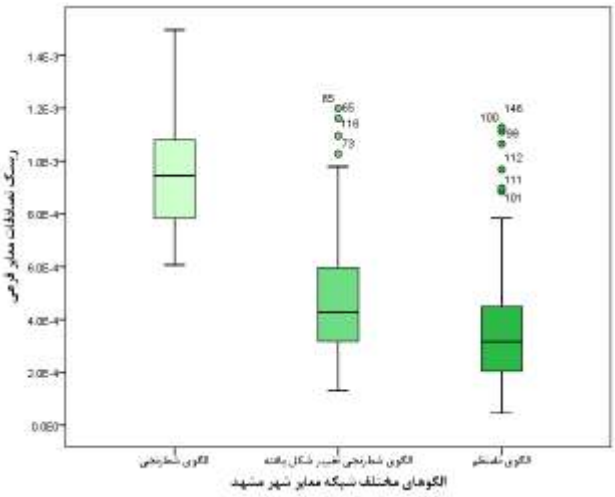


شکل٦. ناحیه ترافیکی شماره ۸ نمونه‌ای الگوی نامنظم

٤-۲-بررسی توصیفی رابطه‌ی الگوی شبکه معابر با ریسک تصادفات

پس از شناسایی الگوهای مختلف شبکه معابر هر ناحیه‌ی ترافیکی و تقسیم‌بندی آن‌ها در سه گروه شطرنجی، شطرنجی تغییر شکل یافته و نامنظم، ریسک تصادفات مربوط به هر ناحیه‌ی ترافیکی محاسبه می‌گردد. سپس به بررسی کیفی رابطه‌ی بین ریسک تصادفات و الگوی شبکه‌ی معابر از طریق آمار توصیفی و نمودار جعبه‌ای پرداخته می‌شود. همان‌طور که در نمودار شکل (۷) مشاهده می‌شود با تغییر شکل شبکه از شطرنجی به نامنظم ریسک تصادفات کاهش می‌یابد. به این معنا که شبکه معابر با الگوی شطرنجی از شبکه‌های معابر با دو الگوی شطرنجی تغییر شکل یافته و نامنظم ناایمن‌تر است و هر چه به سمت نامنظم و درختی‌تر شدن شبکه‌ی معابر پیش می‌رویم بر ایمنی تردد افزوده می‌شود؛ که این نتیجه با نتایج مطالعات پیشین سازگار است (Guo et al., 2017; Southworth & Ben-Joseph, 1996; X. Wang et

al., 2013). الگوهای منظم تغییر شکل یافته و نامنظم دارای اتصالات و تقاطعات کمتری هستند. این در حالی است که پتانسیل وجود نقاط تداخل در شبکه‌ی معابر شطرنجی به علت وجود تعداد تقاطعات بالاتر در این الگو بیشتر است (Guo et al., 2017). به‌علاوه اینکه به علت مستقیم بودن خیابان‌ها در الگوی شبکه معابر شطرنجی، احساس ایمنی در رانندگان افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به خستگی و کم‌توجه‌ی راننده به محیط پیرامونی گردد (Rifaat, Tay, & De Barros, 2011; Rifaat et al., 2012). این در حالی است که به علت وجود منحنی‌ها و حلقه‌های مکرر و کاهش محدوده‌ی دید، در دو الگوی نامنظم و منظم تغییر شکل یافته، رانندگی در آن‌ها با توجه و احتیاط بیشتری انجام می‌شود (Guo et al., 2017; Hedlund, 2000; LEVYM & Miller, 2000). از طرفی منظم‌تر شدن الگوی شبکه معابر می‌تواند منجر به افزایش سرعت تردد در شبکه‌ی معابر گردد که این امر می‌تواند در کاهش سطح ایمنی شبکه‌ی معابر مؤثر باشد.

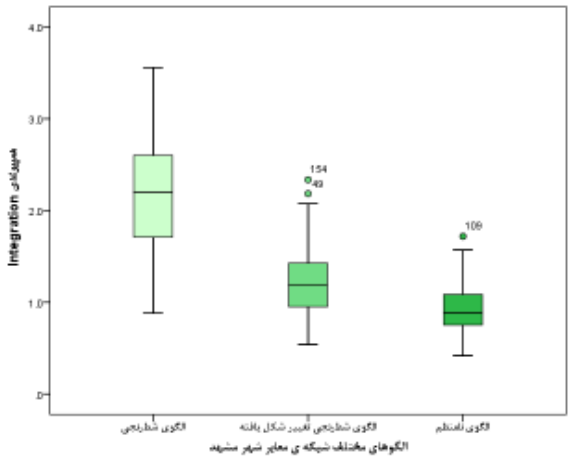


شکل۷. رابطه الگوهای مختلف شبکه معابر شهر مشهد و ریسک تصادفات

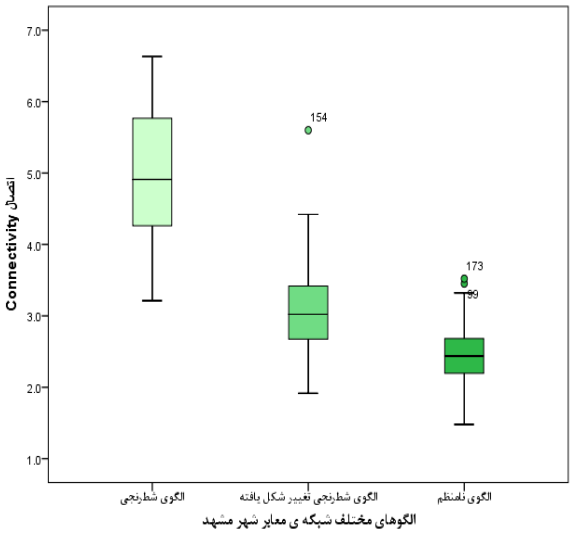
٤-۳-بررسی توصیفی رابطه‌ی الگوی شبکه‌ی معابر و شاخص‌های فضایی تئوری چیدمان فضا

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد برای کمی سازی شبکه‌ی معابر از شاخص‌های فضایی چیدمان فضا استفاده خواهد شد. به این منظور در ابتدا نقشه‌ی محوری مربوط به شبکه‌ی معابر هر ناحیه ترافیکی در نرم‌افزار AutoCAD ترسیم‌شده و با فرمت .dxf ذخیره می‌گردد.

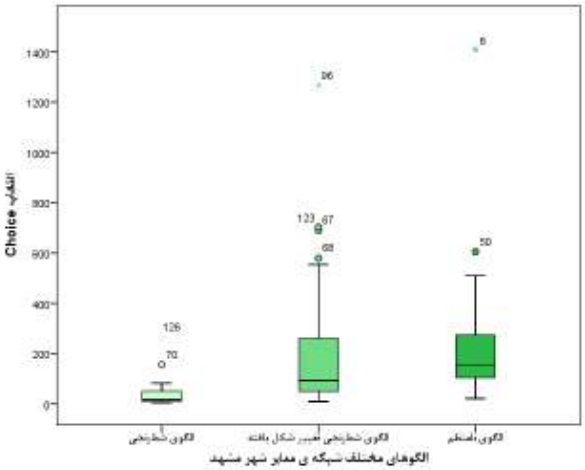
سپس نقشه‌های محوری تهیه‌شده برای انجام تحلیل‌های چیدمان فضا وارد نرم‌افزار UCL Depthmap می‌گردند و شاخص‌های همپیوندی، اتصال، انتخاب، آنتروپی و خوانایی مربوط به هر ناحیه محاسبه می‌شود. در این قسمت باید به این سؤال پاسخ داده شود که آیا شاخص‌های چیدمان فضا می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای توصیف الگوی شبکه‌ی معابر به‌کارگیرند؟ به این منظور با استفاده از آمار توصیفی و نمودار جعبه‌ای رابطه بین الگوهای مختلف شبکه معابر و شاخص‌های روش چیدمان فضا بررسی می‌گردد.



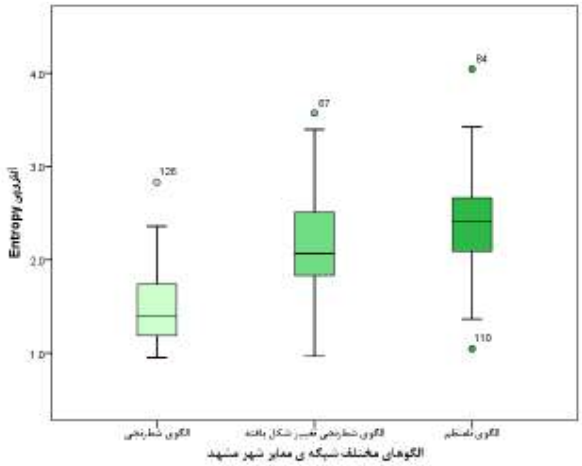
شکل۸. رابطه بین شاخص همپیوندی و الگوهای شبکه معابر نواحی ترافیکی شهر مشهد



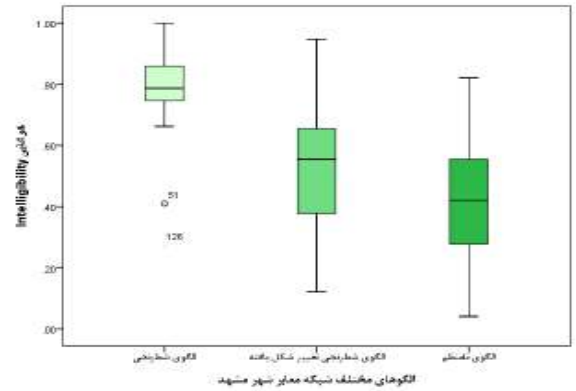
شکل۹. رابطه بین شاخص اتصال و الگوهای شبکه معابر نواحی ترافیکی شهر مشهد



شکل۱۰. رابطه بین شاخص انتخاب و الگوهای شبکه معابر نواحی ترافیکی شهر مشهد



شکل۱۱. رابطه‌ی بین شاخص آنتروپی و الگوهای شبکه معابر نواحی ترافیکی شهر مشهد



شکل۱۲. رابطه‌ی بین شاخص خوانایی و الگوهای شبکه معابر نواحی ترافیکی شهر مشهد

همان‌طور که در شکل‌های (۸) تا (۱۲) مشاهده می‌شود با تغییر شکل شبکه از شطرنجی به نامنظم مقادیر شاخص‌های همپیوندی، اتصال و خوانایی کاهش و مقادیر مربوط به شاخص‌های انتخاب و آنتروپی افزایش می‌یابد؛ بنابراین همپیوندی، اتصال، انتخاب، آنتروپی و خوانایی شاخص‌هایی هستند که نسبت به تغییرات الگوی شبکه معابر حساس بوده و می‌توانند پارامترهایی برای توصیف الگوی شبکه‌ی معابر باشند.

٤-٤-بررسی رابطه‌ی ریسک تصادفات با شاخص‌های فضایی چیدمان فضا

با توجه به عملکرد موفق شاخص‌های چیدمان فضا در توصیف شکل شبکه‌ی معابر، در ادامه برای بررسی رابطه‌ی الگوی شبکه‌ی معابر و ایمنی تردد به‌جای بررسی کیفی رابطه‌ی ریسک و خود الگوها، رابطه‌ی ریسک تصادفات و شاخص‌های چیدمان فضایی هر ناحیه ترافیکی در قالب مدل‌های آماری بیزی بررسی می‌شود. اگر بتوان نشان داد که بین شاخص‌های چیدمان فضا و ریسک تصادفات رابطه‌ی معناداری وجود دارد. ازاین‌پس می‌توان برای به‌حساب آوردن اثر الگوی شبکه معابر بر ایمنی تردد، شاخص‌های مذکور را برای آن ناحیه محاسبه کرده و با به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌های پیش‌بینی تصادفات به برآوردهای دقیق‌تری از تصادفات واقع در هر ناحیه ترافیکی دست‌یافت.

٤-٤-١-استفاده از روش بیز تجربی به‌منظور بررسی و مقایسه توانایی شاخص‌های متفاوت چیدمان فضا در بهبود مدل‌های پیش‌بینی تصادفات درون‌شهری

به این منظور، شش مدل پواسن-لگ نرمال به کمک نرم‌افزار WinBUGS1.4 و با استفاده از یک زنجیره‌ی مارکوف مونت‌کارلو با ۵۰۰۰۰ تکرار به داده‌های موردنظر برازش داده می‌شود، ۵۰۰۰ نمونه اول به‌عنوان مقادیر دورریز در نظر گرفته می‌شوند. جدول (۱) آماره‌های توصیفی متغیرهای مستقل و وابسته را نشان می‌دهد.

جدول۱. آماره‌های توصیفی متغیرها

متغیر	توضیحات	میانگین	انحراف معیار	ماکزیمم	مینیمم
Y	تصادفات معابر فرعی تعداد کل	۱۶/۰۳	۱۳/۰۸	۷۳	۱
Prod+Attr	مجموع تولید و جذب سفر هر ناحیه	۳۵۳۱۵/۴۶	۱۶۱۳۸/۷۳	۱۱۲۶۹۷	۵۷۴۱
IntegrationHH	همپیوندی (شاخصی از الگوی شبکه‌ی معابر یک ناحیه)	۱/۱۴۵۲۵	۰/۵۲۷۷۵	۳/۵۵۶۸۶	۰/۰۴۱۷۸۷
Connectivity	اتصال (شاخصی از الگوی شبکه‌ی معابر یک ناحیه)	۲/۹۵۸۷۸	۰/۹۵۱۷۸	۶/۶۳۱۵۷	۱/۴۸
Choice	انتخاب (شاخصی از الگوی شبکه‌ی معابر یک ناحیه)	۱۸۳/۸۲۴۹	۱۹۳/۳۱۷۴	۱۴۰۹/۷۵۶	۴/۲
Entropy	آنتروپی (شاخصی از الگوی شبکه‌ی معابر یک ناحیه)	۲/۲۳۰۶۳	۰/۵۸۷۹۱۲	۴/۰۴۳۰۶	۰/۹۵۱۲۷
Intelligibility	خوانایی (شاخصی از الگوی شبکه‌ی معابر یک ناحیه)	۰/۴۸۶۵۱	۰/۲۱۰۶۵	۱	۰/۰۴۱۱۸
VKT	کیلومتر_وسیله نقلیه طی شده در هر ناحیه	۶۳۳۵۱/۰۲	۵۵۳۲۰/۵۳	۲۹۶۶۱۸	۷۶۰
Junction	تعداد تقاطعات هر ناحیه	۳۲/۷۸	۱۹/۵۹	۹۶	۴
Dens-Link	تراکم شبکه‌ی معابرهرناحیه ($\frac{\text{طول خیابان + عرض خیابان}}{\text{مساحت ناحیه ترافیکی}}$)	۰/۰۲۴۹۲	۰/۰۱۳۴۸	۰/۰۵۷۱	۰/۰۰۰۰۵
ACO	متوسط مالکیت خودروی هر ناحیه	۰/۱۹۴۲۸	۰/۰۵۹۸۴	۰/۰۳۱۲۹	۰/۰۴۹۴۷

جدول۲. نتایج مدل غیر فضایی بدون در نظر گرفتن شاخص‌های چیدمان فضا (مدل پایه)

متغیر	میانگین	انحراف معیار	میانه	فاصله اطمینان	
				حد پایین	حد بالا
مقدار ثابت	-۷/۸۵۲	۰/۰۴۷۵۸	-۷/۸۵۲	-۷/۹۴۶	-۷/۷۵۹
متوسط مالکیت خودرو	۰/۲۰۸۹	۰/۰۵۱۶۴	۰/۲۰۹	۰/۱۰۶۸	۰/۳۱۰۸
کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده	۰/۰۳۲۷۷	۰/۰۶۳۹۳	۰/۰۳۲۴۷	-۰/۰۹۳۱	۰/۱۵۸۹
تعداد تقاطعات	۰/۰۳۱۳۶	۰/۰۶۷۴۹	۰/۰۳۲۳۶	-۰/۱۰۵۶	۰/۱۵۹۷
تراکم شبکه معابر	۰/۰۴۹۸۵	۰/۰۵۴۸۵	۰/۰۵۰۲۱	-۰/۰۵۷۷	۰/۱۵۸۶
DIC			۱۰۸۸/۸۴		

جدول۳. نتایج مدل غیر فضایی با اضافه کردن همپیوندی به مدل پایه

متغیر	میانگین	انحراف معیار	میانه	فاصله اطمینان	
				حد پایین	حد بالا
مقدار ثابت	-۷/۸۵۵	۰/۰۴۰۶۵	-۷/۸۵۵	-۷/۹۳۶	-۷/۷۷۶
همپیوندی	۰/۳۱۸	۰/۰۴۰۶۱	۰/۳۱۸۲	۰/۲۳۷۲	۰/۳۹۶۵
متوسط مالکیت خودرو	۰/۱۷۷۴	۰/۰۴۳۹۸	۰/۱۷۷۱	۰/۰۹۱۳۲	۰/۲۶۳۵
کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده	۰/۱۲۸۹	۰/۰۵۵۲	۰/۱۲۸۷	۰/۰۱۸۴۵	۰/۲۳۶۷
تعداد تقاطعات	۰/۰۱۴۴۸	۰/۰۵۷۶۹	۰/۰۱۴۲۲	-۰/۰۹۷۵	۰/۱۲۹۳
تراکم شبکه معابر	-۰/۰۱۶۴	۰/۰۴۸۶۲	-۰/۰۱۵۹۷	-۰/۱۱۲۸	۰/۰۷۶۸۸
DIC			۱۰۷۵/۶۵		

جدول٤. مدل غیر فضایی با اضافه کردن متغیر اتصال به مدل پایه

متغیر	میانگین	انحراف معیار	میانه	فاصله اطمینان	
				حد پایین	حد بالا
مقدار ثابت	-۷/۸۵۷	۰/۰۳۹۳۱	-۷/۸۵۷	-۷/۹۳٦	-۷/۷۸۱
اتصال	۰/۳۳۸٤	۰/۰۳۷٦٦	۰/۳۳۸۳	۰/۲٦٤۱	۰/٤۱۱۸
متوسط مالکیت خودرو	۰/۱۹۳۵	۰/۰٤۱٦۵	۰/۱۹۳۲	۰/۱۱۲٦	۰/۲۷۵۳
کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده	۰/۱۲۵	۰/۰۵۲۰۹	۰/۱۲۵۳	۰/۰۲۲۲۸	۰/۲۲٦۸
تعداد تقاطعات	-۰/۰۲۳۰۷	۰/۰۵٤٦۵	-۰/۰۲۳٤۳	-۰/۱۲۸	۰/۰۸٤۵۱
تراکم شبکه معابر	-۰/۰۲۰۱۷	۰/۰٤٦۲۳	-۰/۰۲۰۷٤	-۰/۱۰۹۲	۰/۰۷۰۷٤
DIC			۱۰۷۳/۹۹		

جدول۵. مدل غیر فضایی با اضافه کردن متغیر انتخاب به مدل پایه

متغیر	میانگین	انحراف معیار	میانه	فاصله اطمینان	
				حد پایین	حد بالا
مقدار ثابت	-۷/۸٤۹	۰/۰٤۵٦۹	-۷/۸٤۸	-۷/۹۳۹	-۷/۷٦
انتخاب	-۰/۱۸۳۸	۰/۰٤۸٦	-۰/۱۸۳۹	-۰/۲۷۹۲	-۰/۰۸۸۹۳
متوسط مالکیت خودرو	۰/۱٦۹۱	۰/۰٤۹۵٤	۰/۱٦۸۸	۰/۰۷۲۹۲	۰/۲٦۷۱
کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده	۰/۰٤۷۲۷	۰/۰٦۱۵٤	۰/۰٤۷٦٤	-۰/۰۷٤۲۵	۰/۱٦۷۳
تعداد تقاطعات	۰/۰۸۲۹۱	۰/۰٦۵٤٤	۰/۰۸۲۲۳	-۰/۰٤٤۰۹	۰/۲۱۱۵
تراکم شبکه معابر	۰/۰۲٤۸	۰/۰۵۲۹۵	۰/۰۲٤٤٦	-۰/۰۷۹٦٦	۰/۱۲۹۱
DIC			۱۰۸٦/۰۲		

جدول٦. مدل غیر فضایی با اضافه کردن متغیر آنتروپی به مدل پایه

متغیر	میانگین	انحراف معیار	میانه	فاصله اطمینان	
				حد پایین	حد بالا
مقدار ثابت	-۷/۸۵۱	۰/۰٤٤٤۲	-۷/۸۵	-۷/۹۳۹	-۷/۷٦٤
آنتروپی	-۰/۲۲۵	۰/۰٤۵۷٤	-۰/۲۲۵۳	-۰/۳۱۵	-۰/۱۳۵۵
متوسط مالکیت خودرو	۰/۱۵۸٤	۰/۰٤۸۵۱	۰/۱۵۸	۰/۰٦٤۱۳	۰/۲۵٤۸
کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده	۰/۰۷۷٤٦	۰/۰٦۰۹٤	۰/۰۷۷٦۳	-۰/۰٤۳٦۱	۰/۱۹٦
تعداد تقاطعات	۰/۰۵٤۱	۰/۰٦۳۳	۰/۰۵٤۵۲	-۰/۰۷۱۸۹	۰/۱۷۷۵
تراکم شبکه معابر	۰/۰۱۷۵۷	۰/۰۵۲۲۹	۰/۰۱۷۷۷	-۰/۰۸۵۱۳	۰/۱۲۰۵
DIC			۱۰۸۳/۱۹		

جدول۷. مدل غیر فضایی با اضافه کردن متغیر خوانایی به مدل پایه

متغیر	میانگین	انحراف معیار	میانه	فاصله اطمینان	
				حد پایین	حد بالا
مقدار ثابت	-۷/۸۴۹	۰/۰۴۲۹۶	-۷/۸۴۹	-۷/۹۳۵	-۷/۷۶۶
خوانایی	۰/۲۸۵۵	۰/۰۴۳۶۶	۰/۲۸۵۵	۰/۱۹۹۷	۰/۳۷۰۷
متوسط مالکیت خودرو	۰/۱۴۷۹	۰/۰۴۵۷	۰/۱۴۸۲	۰/۰۵۷۲۸	۰/۲۳۶۶
کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده	۰/۱۱۶۲	۰/۰۵۶۶۴	۰/۱۱۶۲	۰/۰۰۴۱۶۱	۰/۲۲۸
تعداد تقاطعات	۰/۰۴۴۷۹	۰/۰۵۹۹۱	۰/۰۴۴۲۹	-۰/۰۷۱۳۷	۰/۱۶۵۲
تراکم شبکه معابر	-۰/۰۰۹۲۶۶	۰/۰۴۹۸۹	-۰/۰۰۹۳۴۵	-۰/۱۰۶۵	۰/۰۹۱۲۷
DIC			۱۰۸۰/۹۴		

در این مطالعه پنج شاخص چیدمان فضا از قبیل همپیوندی، اتصال، انتخاب، آنتروپی و خوانایی برای کمی سازی الگوی شبکه‌ی معابر نواحی ترافیکی شهر مشهد موردبررسی و ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور مدلی غیر فضایی به روش بیز تجربی (مدل پواسون-لگ نرمال) بدون در نظر گرفتن شاخص‌های کمی سازی شبکه تحت عنوان مدل پایه به داده‌ها برازانده شد. به‌منظور بررسی تأثیر در نظر گرفتن اثر الگوی شبکه‌ی معابر در بهبود مدل‌های پیش‌بینی تصادفات و انتخاب بهترین شاخص توصیف‌کننده چیدمان فضا شاخص‌های فوق‌الذکر به‌صورت مجزا وارد مدل شدند (جداول ۲ تا ۷). خلاصه نتایج به شرح زیر است.

جدول۸. خلاصه نتایج مدل‌های غیر فضایی

مدل	شرح مدل	DIC
۱	مدل پواسون لگ-نرمال پایه (بدون متغیرهای چیدمان فضا)	۱۰۸۸/۸۴
۲	مدل پواسون لگ-نرمال (همراه با در نظر گرفتن متغیر همپیوندی)	۱۰۷۵/۶۵
۳	مدل پواسون لگ-نرمال (همراه با در نظر گرفتن متغیر اتصال)	۱۰۷۳/۹۹
۴	مدل پواسون لگ-نرمال (همراه با در نظر گرفتن متغیر انتخاب)	۱۰۸۶/۰۲
۵	مدل پواسون لگ-نرمال (همراه با در نظر گرفتن متغیر آنتروپی)	۱۰۸۳/۱۹
۶	مدل پواسون لگ-نرمال (همراه با در نظر گرفتن متغیر خوانایی)	۱۰۸۰/۹۴

همان‌طور که در جدول (۸) مشاهده می‌شود. با واردکردن شاخص‌های مختلف چیدمان فضا به مدل مقدار DIC مدل کاهش‌یافته است به‌عبارتی‌دیگر در نظر گرفتن تأثیر الگوی شبکه‌ی معابر در مدل‌های پیش‌بینی تصادفات می‌تواند منجر به بهبود مدل‌های پیش‌بینی تصادفات گردد.

نتایج حاکی از آن است که با افزایش مقادیر شاخص‌های همپیوندی [میانگین=۰,۳۱۸ و فاصله اطمینان۹۵٪ (۰,۳۹۶۵_۰,۲۳۷۲)]، اتصال [میانگین=۰,۳۳۸۴ و فاصله اطمینان۹۵٪ (۰,۴۱۱۸_۰,۲۶۴۱)] و خوانایی [میانگین=۰,۲۸۵۵ و فاصله اطمینان۹۵٪ (۰,۳۷۰۷_۰,۱۹۹۷)] ریسک وقوع تصادفات افزایش می‌یابد. این نتایج دور از انتظار نیست. همان‌طور که طبق شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۲) مشاهده گردید، مقادیر شاخص‌های فوق با تغییر الگوی شبکه‌ی معابر از نامنظم (درختی) به منظم (شطرنجی)، افزایش می‌یابد از طرفی طبق آمار توصیفی (شکل (۷)) مشاهده گردید که هر چه الگوی شبکه‌ی معابر یک ناحیه شطرنجی‌تر می‌گردد ریسک تصادفات آن ناحیه افزایش می‌یابد. هم‌چنین طبق نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود افزایش شاخص‌های انتخاب [میانگین= ۰,۱۸۳۸- و فاصله اطمینان۹۵٪ (۰,۰۸۸۹۳-_۰,۲۷۹۲-)] و آنتروپی [میانگین= ۰,۲۲۵- و فاصله اطمینان۹۵٪ (۰,۱۳۵۵-_۰,۳۱۵-)] که خود مبین درختی‌تر شدن الگوی شبکه‌ی معابر است، منجر به کاهش ریسک تصادفات می‌گردد.

علاوه بر این طبق نتایج به‌دست‌آمده و حداقل بودن DIC مدل سوم، شاخص اتصال به‌عنوان بهترین شاخص توصیف‌کننده‌ی الگوی شبکه‌ی معابر شهر مشهد شناسایی می‌گردد. در گام بعدی به دنبال پاسخ به این سؤال هستیم که آیا در نظر گرفتن همبستگی فضایی بین ناحیه‌های ترافیکی می‌تواند در بهبود مدل‌های پیش‌بینی تصادفات درون‌شهری نقش داشته باشد؟ بدین منظور مدل‌های فضایی با استفاده از روش بیز کامل و مدل BYM به داده‌ها برازش داده می‌شود.

۴-۴-۲-استفاده از روش بیز کامل (مدل BYM) به‌منظور بهبود مدل‌های پیش‌بینی تصادفات درون‌شهری از طریق در نظر گرفتن همبستگی‌های فضایی

به این منظور از دو مدل فضایی با ماتریس‌های مجاورت متفاوت (بر اساس مرز مشترک نواحی و بر اساس فاصله‌ی مراکز هندسی) استفاده می‌شود. به علت پیچیدگی مدل‌ها و برای اطمینان از همگرایی، از دو زنجیر مارکوف مونت‌کارلو با مقادیر اولیه متفاوت با ۵۰۰۰۰ تکرار که ۵۰۰۰ تای اول از هر زنجیر به‌عنوان مقادیر دورریز در نظر گرفته‌شده است، استفاده می‌کنیم. نتایج در جداول (۹) و (۱۰) آورده شده است.

جدول ۹. مدل فضایی با ماتریس مجاورت بر اساس مرز مشترک نواحی ترافیکی به همراه شاخص اتصال

متغیر	میانگین	انحراف معیار	میانه	فاصله اطمینان	
				حد پایین	حد بالا
مقدار ثابت	-۷/۸۷۱	۰/۰۲۶۰۳	-۷/۸۷۱	-۷/۹۲۳	-۷/۸۲
اتصال	۰/۲۷۴۴	۰/۰۳۹۷۷	۰/۲۷۴۴	۰/۱۹۶۶	۰/۳۵۳
متوسط مالکیت خودرو	۰/۲۰۱۱	۰/۰۷۰۱۵	۰/۲۰۰۷	۰/۰۶۳۹	۰/۳۳۹۶
کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده	۰/۰۴۴۶۶	۰/۰۴۸۹۹	۰/۰۴۴۷۷	-۰/۰۵۱۵۹	۰/۱۴۰۴
تعداد تقاطعات	-۰/۰۱۸۱۴	۰/۰۵۱۱۵	-۰/۰۱۸۰۲	-۰/۱۱۸۵	۰/۰۸۲۲۷
تراکم شبکه معابر	-۰/۰۰۳۷۹	۰/۰۴۲۹۹	-۰/۰۰۳۸۷۱	-۰/۰۸۸۵۶	۰/۰۸۰۰۷
DIC			۱۰۵۳/۴۲		

جدول ۱۰. مدل فضایی با ماتریس مجاورت بر اساس فاصله‌ی مراکز هندسی نواحی ترافیکی به همراه شاخص اتصال

متغیر	میانگین	انحراف معیار	میانه	فاصله اطمینان	
				حد پایین	حد بالا
مقدار ثابت	-۷/۸۶۱	۰/۰۳۱۰۷	-۷/۸۶۱	-۷/۹۲۲	-۷/۸
اتصال	۰/۳۳۴۹	۰/۰۳۷۰۴	۰/۳۳۴۸	۰/۲۶۲۴	۰/۴۰۸
متوسط مالکیت خودرو	۰/۱۳۴۹	۰/۰۶۲۷۸	۰/۱۳۵۸	۰/۰۰۸۷۸	۰/۲۵۵۶
کیلومتر وسیله‌ی نقلیه‌ی طی شده	۰/۰۷۸۰۳	۰/۰۵۴۹	۰/۰۷۷۹۷	-۰/۰۲۹۵۵	۰/۱۸۵
تعداد تقاطعات	-۰/۰۱۲۶	۰/۰۵۵۸۹	-۰/۰۱۲۷۱	-۰/۱۲۲۱	۰/۰۹۷۵۷
تراکم شبکه معابر	-۰/۰۰۸۶۳۷	۰/۰۴۵۹۹	-۰/۰۰۸۴۴۸	-۰/۰۹۹۱۹	۰/۰۸۱۵
DIC			۱۰۷۲/۰۶		

۴-۴-۳-انتخاب مدل نهایی

برای انتخاب مدل نهایی برازش داده‌شده به تصادفات درون‌شهری شهر مشهد، مدل غیر فضایی بیز تجربی (پواسون لگ-نرمال) و دو مدل فضایی بیز کامل (BYM) با دو ساختار مجاورت بر اساس مرز مشترک و فاصله‌ی مراکز هندسی نواحی مورد مقایسه قرار می‌گیرد، نتایج به شرح ادامه است.

جدول۱۱. مقایسه مدل‌های فضایی و غیر فضایی

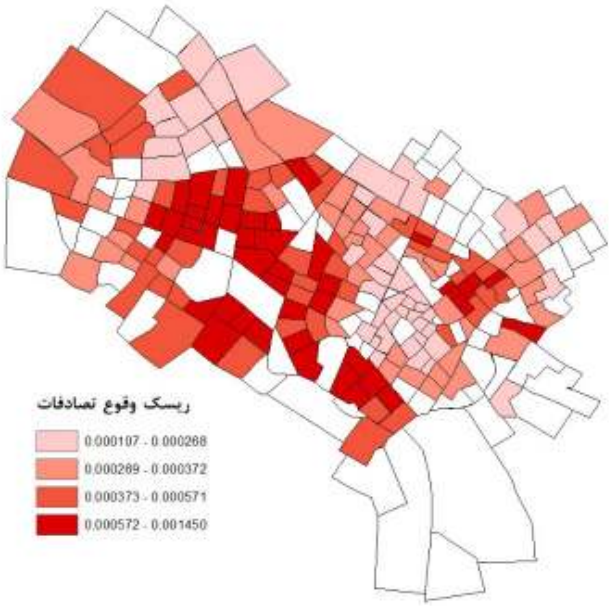
مدل	شرح مدل	DIC
۳	مدل پواسون لگ-نرمال (همراه با در نظر گرفتن متغیر اتصال)	۱۰۷۳/۹۹
۷	مدل BYM (با ماتریس مجاورت بر اساس مرز مشترک نواحی)	۱۰۵۳/۴۲
۸	مدل BYM (با ماتریس مجاورت بر اساس فاصله‌ی مرکز هندسی نواحی)	۱۰۷۲/۰۶

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن همبستگی‌های فضایی نواحی مختلف ترافیکی منجر به بهبود مدل پیش‌بینی تصادفات درون‌شهری مشهد می‌گردد. کمترین DIC متعلق به مدل BYM (با ماتریس مجاورت بر اساس مرز مشترک نواحی) است. لذا این مدل که شامل متغیر توصیفی اتصال که شاخصی کمی برای توصیف الگوی شبکه معابر است و به‌علاوه اثر همبستگی فضایی بین نواحی را نیز در محاسبات وارد می‌نماید به‌عنوان مدل نهایی انتخاب می‌گردد. مطابق بامطالعه‌ی انجام‌شده توسط شریعت مهیمنی و شهری(Shariat-Mohaymany & Shahri, 2017)، نتایج مدل نهایی حاکی از آن است که افزایش مقادیر متوسط مالکیت خودرو منجر به افزایش وقوع تصادفات درون‌شهری شهر مشهد در سطح معناداری ۹۵٪ می‌گردد [میانگین=۰,۲۰۱۱ و فاصله اطمینان۹۵٪ (۰,۰۶۳۹_۰,۳۳۹۶)]. به‌علاوه مشاهده می‌شود با افزایش مقادیر اتصال ریسک وقوع تصادفات افزایش می‌یابد. [میانگین=۰,۳۳۴۹ و فاصله اطمینان۹۵٪ (۰,۴۰۸_۰,۲۶۲۴)]. مقادیر شاخص اتصال بیشتر، نشان‌دهنده‌ی شبکه‌ی معابری هستند که دارای ارتباط فضایی و دسترسی بیشتری به سایر فضاها هستند. به عبارتی نشان‌دهنده‌ی شبکه‌ای از معابر هستند که با تعداد خیابان‌ها و معبرهای زیادی مرتبط هستند. لذا، میزان مورداستفاده قرار گرفتن این شبکه‌ها نسبت به شبکه‌های با اتصال کمتر بیشتر است. از طرفی با افزایش دسترسی و ارتباط یک خیابان با سایر معابر، تعداد تقاطعات و به تعبیری تعداد نقاط دارای تداخل ترافیکی افزایش می‌یابد که این امر احتمال وقوع تصادف را افزایش می‌دهد.

۴-۴-۴-نقشه بندی و نمایش خطر نسبی (ریسک تصادفات) بر اساس مدل نهایی

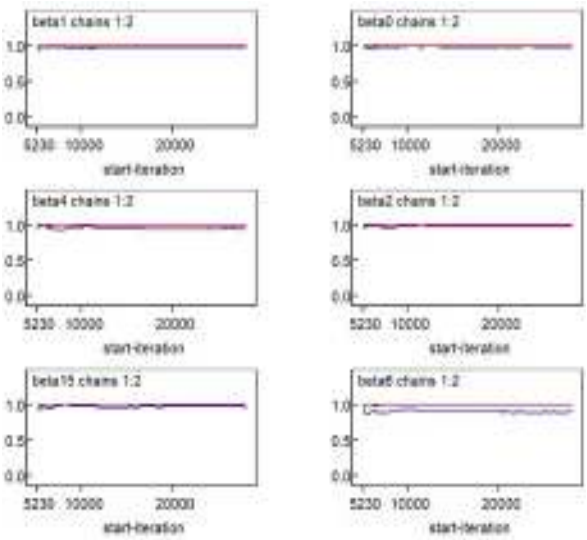
به‌منظور نمایش گرافیکی و شناسایی نواحی با ریسک تصادفات بالا و پائین در شهر مشهد، با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.3 نقشه برآورد ریسک تصادفات بر مبنای روش بیز کامل (مدل نهایی) برای ۱۷۸ ناحیه ترافیکی شهر مشهد ترسیم‌شده است (شکل ۱۳).

ریسک تصادفات درون‌شهری مشهد در این پهنه‌بندی در چهار گروه نمایش داده می‌شوند که این گروه‌ها بر اساس چارک‌های ریسک تصادفات به‌دست‌آمده‌اند. (نواحی دارای ریسک بالاتر به رنگ تیره‌تر مشخص‌شده‌اند و برعکس)

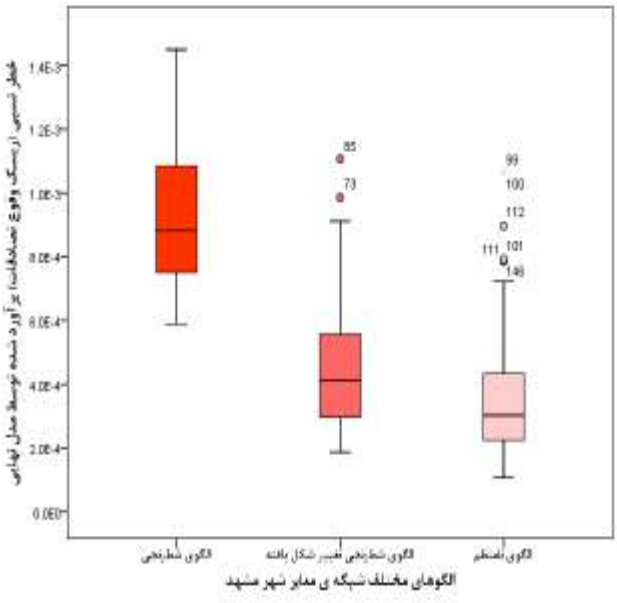


شکل۱۳. نقشه برآورد ریسک وقوع تصادفات درون‌شهری شهر مشهد با استفاده از روش بیز کامل (مدل BYM)

نمودار جعبه‌ای مربوط به خطر نسبی (ریسک وقوع تصادفات) برآورد شده توسط مدل نهایی و الگوهای مختلف شبکه معابر در شکل (۱۴) نشان داده‌شده است.



شکل۱۵. خروجی WinBUGS مربوط به نمودار Gelman Rubin در مدل BYM نهایی



شکل۱۴. رابطه بین خطر نسبی (ریسک وقوع تصادفات) با الگوی شبکه‌ی معابر شهر مشهد

بررسی نمودار فوق مؤید ارتباط نزدیک ریسک وقوع تصادفات با الگوی شبکه‌ی معابر است.

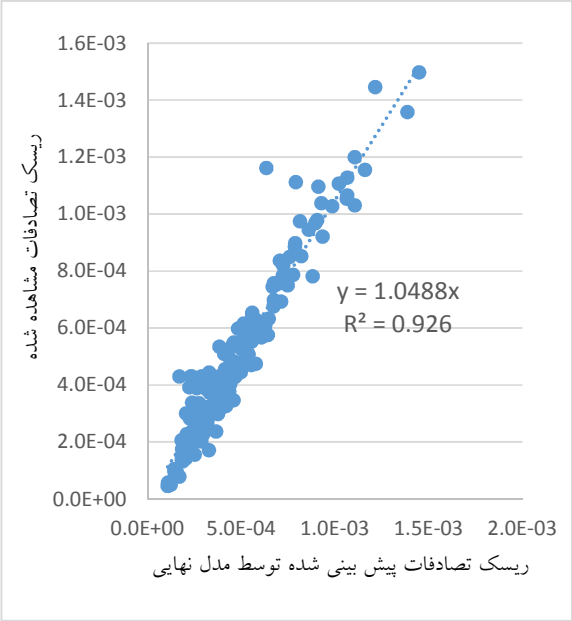
٤-٤-٥-بررسی همگرایی زنجیر مارکوف در مدل نهایی

یک روش مهم برای بررسی همگرایی استفاده از معیار همگرایی گلمن-روبین است. این روش نیاز به تولید حداقل دو زنجیر با مقادیر اولیه‌ی متفاوت دارد. برای اطمینان از همگرایی زنجیر مقادیر این آماره باید نزدیک به یک باشد. (گنجعلی و باغفلکی، ۱۳۹٦) این نمودارها برای مدل حاضر در شکل(۱۵) نمایش داده‌شده‌اند.

همان‌طور که در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود همگرایی زنجیر مارکوف مورد تائید است.

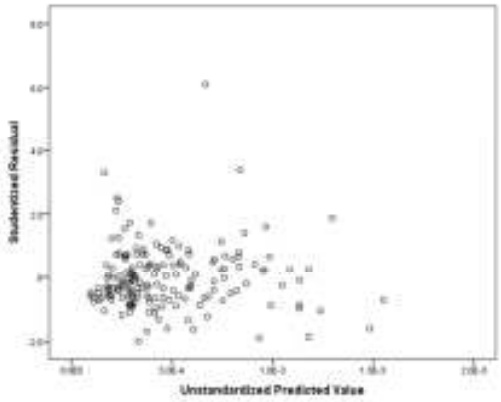
٤-٤-٦-بررسی نیکویی برازش مدل نهایی

برای بررسی توانایی مدل در برآورد ریسک وقوع تصادفات مقادیر ریسک محاسبه‌شده توسط داده‌ها و ریسک پیش‌بینی‌شده توسط مدل (خطر نسبی) در برابر هم رسم می‌گردند.



شکل۱٦. رابطه بین ریسک تصادفات مشاهده‌شده و ریسک تصادفات پیش‌بینی‌شده توسط مدل نهایی

با توجه به شکل (۱٦) ازآنجایی‌که ۹۲,٦٪ از داده‌ها روی نیمساز ربع اول و سوم قرارگرفته‌اند، می‌توان نتیجه گرفت مدل برازش داده‌شده به تصادفات توانایی خوبی در پیش‌بینی وقوع تصادفات درون‌شهری شهر مشهد دارد.



شکل۱۷. رابطه بین مقادیر باقیمانده‌ها و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل

از طرفی رسم مقادیر باقیمانده‌ها و مقادیر پیش‌بینی‌شده در مدل نشان‌دهنده‌ی تصادفی بودن مقادیر خطا می‌باشد که خود مؤید نیکویی برازش مدل است.

۵-نتیجه‌گیری

در این مطالعه پس از شناسایی الگوهای مختلف شبکه معابر نواحی ترافیکی شهر مشهد و طبقه‌بندی آن‌ها در سه الگوی شطرنجی، شطرنجی تغییر شکل یافته و نامنظم، با استفاده از شاخص‌های فضایی تئوری چیدمان فضا از قبیل همپیوندی، اتصال، انتخاب، آنتروپی و خوانایی، کمی سازی شکل شبکه معابر صورت گرفت. سپس رابطه بین الگوی شبکه معابر با ریسک تصادفات در قالب مدل‌های بیزی موردبررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد شاخص همپیوندی، اتصال و خوانایی رابطه‌ی مستقیمی با ریسک تصادفات رانندگی دارند، به‌طوری‌که هر چه درجه‌ی همپیوندی، اتصال و خوانایی یک شبکه‌ی معابر بیشتر می‌شود ریسک تصادفات آن شبکه بیشتر می‌شود. این در حالی است که با افزایش مقادیر شاخص‌های انتخاب و آنتروپی ریسک تصادفات کاهش می‌یابد. طبق یافته‌های این تحقیق توانایی شاخص اتصال، نسبت به سایر شاخص‌های روش چیدمان فضا در کمی سازی الگوی شبکه‌ی معابر و بهبود مدل‌های پیش‌بینی تصادف بیشتر است. در این مطالعه از تحلیل محوری شبکه‌ی معابر خیابان‌ها با شعاع کلی(R_n) استفاده و شاخص‌های چیدمان فضا استخراج گردید. در تحلیل آماری از روش بیز کامل با ماتریس‌های مجاورت مبتنی مرز مشترک نواحی و فاصله مراکز هندسی استفاده گردید. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده علاوه بر محاسبه شاخص‌ها در شعاع n، شاخص‌های کمی ساز شبکه در سایر شعاع‌ها نیز محاسبه و با نتایج این مطالعه موردقیاس قرار گیرند.

سایر روش‌های تحلیل شبکه‌ی معابر از قبیل تحلیل نقشه سگمنت روش چیدمان فضا نیز برای استخراج بهترین شاخص‌های توصیف‌کننده الگوی شبکه‌ی معابر ممکن است مفید باشد. در مطالعات آینده می‌توان با آزمودن ماتریس‌های مجاورت بر پایه ارتباط شبکه‌ی معابر نواحی، به مدل‌های پیش‌بینی تصادفات دقیق‌تری دست‌یافت.

در این مطالعه اثر زمان‌بر ریسک وقوع تصادفات مورد بررسی قرار نگرفت لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با استفاده از مدل‌های BYM تعمیم‌یافته، اثر تغییرات زمانی نیز بر وقوع تصادفات موردبررسی قرار گیرد. از نتایج این پژوهش می‌توان در فرایند طراحی شهری و به‌خصوص در مرحله ارزیابی طرح‌های مختلف جهت پیش‌بینی سطح ایمنی و اتخاذ تصمیمات کلان پیشگیرانه در جهت جلوگیری از افزایش تلفات حوادث ترافیکی استفاده کرد و از ابتدا با چیدمانی مناسب‌تر برای معابر، شبکه‌ای ایمن‌تر ساخت.

۶-مراجع

-آیتی، ا.، و واحدی، ج.، (۱۳۸۶)، "ایجاد مدل شاخص ایمنی ترافیکی در محل پل‌ها در راه‌های ایران (یادداشت پژوهشی)"، نشریه دانشکده مهندسی، شماره ۱۹-۱ (ویژه‌نامه مهندسی عمران).

-پیمانی، ع.، و ذوالقدر، م.، (۱۳۹۰)، "کاربرد روش چیدمان فضا در ارزیابی طرح‌های توسعه‌ی شهری، نمونه‌ی مطالعاتی: طرح جامع جدید کلان‌شهر تهران و طرح تفصیلی مناطق شهرداری تهران (منطقه‌ی ۱۹)"، شماره ٥٤ (۲۱)، ص. ۱۲۳-۱٤٦.

-رحمتی، م.، (۱۳۹۲)، "تحلیل بیزی زمان‌های وقوع عود در بیماران مبتلا به اسکیزوفرنی با استفاده از مدل‌های شکنندگی"،

(پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی آمار زیستی)، دانشگاه علوم بهزیستی و توانبخشی.

-ریسمانچیان، ا. و بل, س.، (۱۳۸۹)، "شناخت کاربـردی روش چیـدمان فضـا دردرک پیکـره بنـدی فضایـی شهـرها"، نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی(۴۳)، ص.۴۹-۵۶.

-سلطانی فرد، ه. و صابری کاریزی، ز.، (۱۳۹۷)، "بررسی اثرات پیکره‌بندی بر کیفیت فضایی پارک‌های شهری مشهد مطالعه موردی: پارک‌های شهر مشهد فصلنامه علمی- پژوهشی مطالعات شهری"، (۲۷).

-شکرانی، و.، (۱۳۹۲)، "کنکاشی در تئوری Space Syntax، (پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی شهرسازی گرایش طراحی شهری)"، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).

-عباس‌زادگان، م.، (۱۳۸۱)، "روش چیدمان فضا در فرایند طراحی شهری با نگاهی به شهر یزد"، فصلنامه مدیریت شهری(۹).

-گنجعلی، م.، و باغفلکی، ت.، (۱۳۹۶)، "مبانی و مدل‌بندی بیزی داده‌ها"، تهران: دانشگاه شهید بهشتی.

-نورانی، ا.، (۱۳۹۱)، "دوره‌ی آموزشی و کارگاه تخصصی: آشنایی با Space Syntax"، جامعه‌ی مهندسین شهرساز ایران.

-یزدانفر، س. و موسوی، م. و زرگردقیق، ه.، (۱۳۸۷)، "تحلیل ساختار فضایی شهر تبریز در محدوده بارو با استفاده از تکنیک اسپیس سینتکس" ماهنامه بین المللی راه و ساختمان(۶۷)، ص. ۵۹-۶۷.

-Aguero-Valverde, J., (2013), "Full Bayes Poisson gamma, Poisson lognormal, and zero inflated random effects models: Comparing the precision of crash frequency estimates", Accident Analysis Prevention, 50, pp.289-297.

-Aguero-Valverde, J., & Jovanis, P. P., (2008), "Analysis of road crash frequency with spatial models", Transportation Research Record, 2061(1), pp.55-63.

-Aguero-Valverde, J., & Jovanis, P. P., (2010), "Spatial correlation in multilevel crash frequency models: Effects of different neighboring structures", Transportation Research Record, 2165(1), pp.21-32.

-Asami, Y., Kubat, A. S., Kitagawa, K., & Iida, S. i., (2003), "Introducing the third dimension on Space Syntax: Application on the historical Istanbul. Paper presented at the Proc," 6th International Space Syntax Symposium.

-Besag, J., York, J., & Mollié, A., (1991), "Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics", Annals of the institute of statistical mathematics, 43(1), pp.1-20.

-Charalambous, N., & Mavridou, M., (2012), "Space syntax: Spatial integration accessibility and angular segment analysis by metric distance (ASAMeD)", Accessibility Instruments for Planning Practice, COST Office, pp.57-62.

-Dill, J., (2004), "Measuring network connectivity for bicycling and walking. Paper presented at the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board", Washington, DC.

-Guo, Q., Xu, P., Pei, X., Wong, S., & Yao, D., (2017), "The effect of road network patterns on pedestrian safety: A zone-based Bayesian spatial modeling approach", Accident Analysis Prevention, 99, pp.114-124 .

-Hedlund, J., (2000), "Risky business: safety regulations, risk compensation, and individual behavior", Injury prevention, 6(2), pp.82-89 .

-Hillier, B., (1999), "The common language of space: a way of looking at the social, economic and environmental functioning of cities on a common basis", Journal of Environmental Sciences, 11, pp.344-349.

-Hillier, B., & Vaughan, L., (2007), "The city as one thing", Progress in Planning, 67(3), pp.205-230.

-Jiang, B., & Claramunt, C., (2002), "Integration of space syntax into GIS: new perspectives for urban morphology", Transactions in GIS, 6(3), pp.295-309.

-Klarqvist, B., (1993), "A space syntax glossary", Nordisk Arkitekturforskning, 6.

-Levine, N., Kim, K. E., & Nitz, L. H., (1995), "Spatial analysis of Honolulu motor vehicle crashes: I. Spatial patterns", Accident Analysis Prevention, 27(5), pp.663-674.

-LEVYM, D. T., & Miller, T., (2000), "Risk compensation literature—the theory and evidence", Journal of Crush Prevention Injury Control, 2(1), pp.75-86.

-Lovegrove, G. R., & Sayed, T., (2006), "Using macrolevel collision prediction models in road safety planning applications", Transportation Research Record, 1950(1), pp.73-82.

-Shariat-Mohaymany, A., & Shahri, M., (2017), "Crash prediction modeling using a spatial semi-local model: a case study of Mashhad, Iran", Applied Spatial Analysis Policy, 10(4), pp.565-584.
-Shariat-Mohaymany, A., Shahri, M., Mirbagheri, B., & Matkan, A. A., (2014), "Exploring Spatial Non-Stationarity and Varying Relationships between Crash Data and Related Factors Using Geographically Weighted Poisson Regression", Transactions in GIS, 19(2), pp.321-337.
-Southworth, M., & Ben-Joseph, E., (1996), "Streets and the Shaping of Towns and Cities: Mcgraw-Hill".
-Teklenburg, J., Timmermans, H., & Van Wagenberg, A., (1993), Space syntax: standardised integration measures and some simulations. Environment Planning B: Planning Design, 20(3), pp.347-357 .
Turner, A., (2007), "From axial to road-centre lines: a new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis", Environment Planning B: planning design, 34(3), pp.539-555 .
-Wakefield, J., Best, N., & Waller, L., (2000), "Bayesian approaches to disease mapping", Spatial epidemiology: methods applications, pp.104-107.
-Wang, X., Jin, Y., Abdel-Aty, M., Tremont, P. J., & Chen, X., (2012), "Macrolevel model development for safety assessment of road network structures", Transportation Research Record, 2280(1), pp.100-109.
-Wang, X., Wu, X., Abdel-Aty, M., & Tremont, P. J., (2013), "Investigation of road network features and safety performance", Accid Anal Prev, 56, pp.22-31. doi:10.1016/j.aap.2013.02.026.
-Zhang, Y., Bigham, J., Li, Z., Ragland, D., & Chen, X., (2012), "Associations between road network connectivity and pedestrian-bicyclist accidents", Paper presented at the 91 St Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
-Zhang, Y., Bigham, J., Ragland, D., & Chen, X., (2015), "Investigating the associations between road network structure and non-motorist accidents", Journal of Transport Geography, 42, pp. 34-47.
doi:10.1016/j.jtrangeo.2014.10.010
-Lovegrove, G. R., & Sun, J., (2010), "Using community-based macrolevel collision prediction models to evaluate safety level of neighborhood road network patterns", Paper presented at the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
-Makri, M.-C., & Folkesson, C., (1999), "Accessibility measures for analyses of land use and travelling with geographical information systems", Department of Technology Society, Lund Institute of Technology, Sweden, 1.
-Marshall, W. E., & Garrick, N. W., (2010), "Effect of street network design on walking and biking", Transportation Research Record, 2198(1), pp.110-115.
-Naderan, A., & Babaei, M., (2011), "Assessment of statistical models for aggregate crash prediction", Paper presented at the Transportation Research Board 90th Annual Meeting.
-Penn, A., (2003), "Space syntax and spatial cognition: or why the axial line ?Environment behavior, 35(1), pp.30-65.
-Quddus, M. A., (2008), "Modelling area-wide count outcomes with spatial correlation and heterogeneity: An analysis of London crash data", Accident Analysis Prevention, 40(4), pp.1486-1497.
-Quddus, M. A., (2008), "Modelling area-wide count outcomes with spatial correlation and heterogeneity: an analysis of London crash data", Accident Analysis Prevention, 40(4), pp.1486-1497.
-Rifaat, S. M., & Tay, R., (2009), "Effects of street patterns on injury risks in two-vehicle crashes", Transportation Research Record, 2102(1), pp.61-67.
-Rifaat, S. M., Tay, R., & De Barros, A. (2011), "Effect of street pattern on the severity of crashes involving vulnerable road users", Accident Analysis Prevention, 43(1), pp.276-283.
-Rifaat, S. M., Tay, R., & de Barros, A., (2012), "Urban street pattern and pedestrian traffic safety", Journal of urban design, 17(3), pp.337-352.
-Rybarczyk, G., & Wu, C., (2014), "Examining the impact of urban morphology on bicycle mode choice", Environment Planning B: planning design, 41, pp.78-88.

The Effect of Road Network Structure on Traffic Safety using Space Syntax Theory (Case Study :Mashhad)

Ali Tavakoli Kashani, Associate Professor, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Hamid Mohammadi, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: alitavakoli@iust.ac.ir

Received: September 2022- Accepted: February 2023

ABSTRACT
Regardless of the properties of links and junctions, road network structure and their arrangement effects on traffic safety and this is a topic that has been less discussed in the area of traffic safety. In this study for the first time in the country by defining a quantitative index of street network pattern, its impact on the risk of traffic accidents has been observed in 178 Mashhad's Traffic Analysis Zones (TAZs). For this purpose, with using Mashhad's crash data of 2008-2010 years, the Space Syntax measures such as Integration, Connectivity, Choice, Entropy, Intelligibility and other descriptive variables such as average car ownership, vehicle kilometer traveled, number of junctions and road network density, The Bayesian accident prediction models were fitted to data. Poisson Log-Normal model was developed to investigate and compare the ability of Space Syntax measures in improving crash prediction models and the BYM model with Conditional Autoregressive (CAR) prior was used to incorporate the spatial correlation of nearby zones. Finally the risk of traffic accidents was estimated using the selected final model. The results showed that applying the descriptive variables of the road network pattern leads to the improvement of crash prediction models. The performance of the Connectivity measure was better than other quantitative variables of the road network pattern and considering the spatial correlation of the TAZs improved the predictive power of the model. The results indicate that the Integration, Connectivity and Intelligibility measures are directly related to the risk of accidents while Entropy and Choice are inversely related. This means that by changing the road network pattern from Irregular to Grid, traffic safety is decreased. This achievement can be used to design a new road network with more safe design of network pattern.

Keywords: Road Network Pattern, Space Syntax, Risk of Traffic Accidents, Bayesian Accident Prediction Models