



نخستین شماره از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال نهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۶
Vol.9, No. 1, Spring 2017

۱۷-۳۶

طرح شاخص‌های نوین دشواری حرکت با بهره‌گیری از نتایج شبیه‌سازی مکانی عامل مبنا در هنگام آتش‌سوزی

علی‌اکبر متکان^۱، عباس‌علی محمدی^۲، بابک میرباقری^۳، کمال اکبری^{۴*}، محمد تناسان^۴
۱. استاد مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۲. دانشیار گروه GIS، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. دانشجوی دکتری GIS، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۴. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۶/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۸

چکیده

متناسب با پیچیدگی‌های رفتاری در انسان‌ها، سیستم‌های اجتماعی نیز دارای پیچیدگی خاصی‌اند. مدیریت جمعیت در این سیستم‌ها بسیار اهمیت دارد و نیازمند صرف هزینه و انرژی بسیار است. با توجه به تعاملات موجود میان انسان‌ها و محیط در سیستم‌های اجتماعی و تأثیر آنها در روند حرکتی جمعیت در شرایط متفاوت، شناخت و بررسی این تعاملات به‌ویژه در شرایط اضطراری، از نیازهای اساسی هر سیستم است. در پژوهش حاضر، از نتایج شبیه‌سازی مکانی عامل مبنای روند حرکتی افراد و شبیه‌سازی آتش‌سوزی در ایستگاه قطار شهری هفت تیر جهت بررسی رفتار افراد و محیط در هنگام آتش‌سوزی استفاده شد. سپس شاخص‌های دشواری حرکت، شامل شاخص‌های محیطی و محیطی-انسانی، به‌منظور بررسی تأثیر محیط و عامل‌ها در روند حرکتی، محاسبه شد. در ادامه کار دو شاخص دشواری جدید، شامل یک شاخص محیطی و یک شاخص محیطی-انسانی با نام‌های AM₁ و AM₂ ویژه شرایط آتش‌سوزی، معرفی شدند. نوآوری شاخص‌های یادشده، افزون بر میزان تعاملات افراد با یکدیگر و تعاملات آنها با اجزای فیزیکی محیط، به تلفیق نتایج شبیه‌سازی‌های عامل مبنا و شبیه‌سازی‌های مربوط به آتش‌سوزی در محیط و استفاده از پارامتری به نام میزان قابلیت دید مربوط می‌شود. بررسی نتایج شاخص‌های محاسبه‌شده و نتایج مربوط به شبیه‌سازی روند حرکتی افراد در محیط ایستگاه نمایانگر رابطه معکوس بین میزان دشواری و سرعت روند حرکتی عامل‌ها در محیط ایستگاه است. همچنین، میزان دشواری حرکت در سناریوی موفق محیطی نشان از کاهش میزان دشواری، در مقایسه با سناریوی وضعیت فعلی در نقاط داغ دارد. بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های عامل مبنا و محاسبه شاخص‌های دشواری در بازه‌های زمانی متفاوت وقوع بحران می‌تواند در تدوین استراتژی‌های مکانی-زمانی مدیریت جمعیت و تخلیه اضطراری مؤثر باشد و در نقش پشتیبانی‌کننده تصمیم مکانی، مدیران بحران را در مدیریت بهینه شرایط یاری کند.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی، عامل مبنا، شاخص دشواری، آتش‌سوزی، اضطرار.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS. تلفن: ۰۹۱۲۶۴۲۴۶۱۷

۱- مقدمه

محدودیت‌های موجود) یا گردآوری داده‌ها از طریق مشاهدات و نمونه‌برداری، نمی‌توان به تمامی جوانب آن در شرایط متفاوت دست یافت. استفاده از روش‌های سنتی، مانند مانور، به دلایل زیر، در فهم مناسب شرایط جمعیت در شرایط متفاوت راهگشا نیست:

۱. در این روش‌ها نمی‌توان شرایط واقعی حاکم بر اضطرار پیش آمده، مانند آتش‌سوزی، را پیاده‌سازی کرد.
۲. با توجه به تلفات احتمالی در مانورها، به ندرت می‌توان جمعیتی معادل جمعیت واقعی را در یک محل، برای بررسی شرایط حاکم بر اضطرار، گرد آورد.
۳. از سویی در بسیاری از مواقع، چون افراد حاضر از ساختگی بودن شرایط اطلاع دارند، رفتارهای مصنوعی و به دور از واقعیت نشان می‌دهند که نتایج قابل اتکایی در پی نخواهد داشت.

با توجه به محدودیت‌ها و مشکلات موجود در به‌کارگیری روش‌های سنتی برای بررسی سیستم‌های پیچیده اجتماعی، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از روش‌های نوع دوم در این زمینه می‌تواند نتایج مطلوبی به همراه داشته باشد. بررسی روند حرکتی افراد در زمان‌ها، مکان‌ها و شرایط گوناگون چه بسا موجب شناخت بهتر رفتارها و تعاملات میان افراد و محیط در شرایط عادی یا اضطراری شود و می‌توان از نتایج به دست آمده برای تدوین استراتژی‌های مدیریت جمعیت و تخلیه اضطراری بهره برد. از میان روش‌های شبیه‌سازی موجود، روش عامل مبنا به علت قابلیت‌های آن در تجزیه یک سیستم به اجزای منفرد آن، همراه با ویژگی‌ها و مجموعه قواعد و قوانین میان آنها، روشی مناسب جهت شناخت و بررسی سیستم‌های پیچیده محسوب می‌شود. این روش الگویی قدرتمند برای توسعه و افزایش دانش ما در مورد سیستم‌های مکانی، اجتماعی یا اجتماعی- مکانی است (Heppenstall et al., 2012). در سال‌های اخیر شبیه‌سازی عامل مبنا، با توانایی پرداختن به رفتار اجزای سیستم به صورت

انسان همواره، جهت رفع نیازهای خویش، در پی ایجاد سیستم‌های پیچیده و متنوع خدماتی و تولیدی بوده است. این سیستم‌ها در طول زمان رشد و توسعه یافته‌اند و مسائل و مشکلات ناشی از پیچیدگی آنها فرایند تصمیم‌گیری، هدایت و کنترل برای انسان را بسیار مشکل می‌کند. پیچیدگی این سیستم‌های اجتماعی به علت حضور انسان در چرخه آنها و بروز رفتارهای خاص و متغیر از آن سیستم‌ها، با توجه به شرایط مکانی و زمانی متفاوت است. سیستم‌های حمل‌ونقل عمومی، آموزشی و شهری نمونه‌هایی از سیستم‌های اجتماعی پیچیده‌اند. بسیاری از آنها مکانی‌اند و با عنوان سیستم‌های اجتماعی- مکانی^۱ به آنها اشاره می‌شود.

برای مطالعه سیستم‌های اجتماعی و بررسی رفتار اجتماعی دو روش عمده وجود دارد: روش نخست جمع‌آوری داده‌ها از طریق مشاهدات، نمونه‌برداری‌ها و در نهایت، تحلیل آنها برای دستیابی به نتیجه است. روش دوم که در سال‌های اخیر رواج فراوانی یافته، شامل درک دقیق از یک رفتار اجتماعی، ساختن مدلی از آن و در نهایت، شبیه‌سازی متغیرهای پویای آن برای رسیدن به مفهومی بهتر و شفاف‌تر از پیچیدگی یک سیستم اجتماعی به ظاهر ساده است (Gilbert, 2008). محققان در سال‌های اخیر، بنا به دلایلی همچون نداشتن دسترسی به امکانات لازم، هزینه‌بر بودن و توانایی نداشتن در ایجاد شرایط واقعی مسئله مورد مطالعه در حل بسیاری از مسائل اجتماعی، به جای بهره‌گیری از روش نخست، به سمت بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی روی آورده‌اند. روش‌های نوع اول به تجربه و وقوع یک رخداد نیاز دارند؛ در صورتی که روش‌های نوع دوم نیاز به وقوع رخداد و آزمایش ندارند. یکی از سیستم‌های پیچیده اجتماعی فضاها و فضاهای انسانی با حضور جمعیت‌های بسیار محسوب می‌شود. مدیریت جمعیت بسیار اهمیت دارد و به آسانی، از طریق برگزاری مانورها (به‌علت

1. socio-spatial

آن قرار گرفته‌اند؛ به‌صورتی که امکان تعامل، ارتباط و تصمیم‌گیری برای عامل‌ها فراهم باشد (Conte et al., 1997). در حقیقت، مدل عامل مبنا دارای ساختاری پویا و از پایین به بالاست (Ligmann-Zielinska and Jankowski, 2010). بدین معنا که از فعالیت اجزای آن، یعنی عامل‌ها، نتیجه‌ای مجموع و کلی به‌دست می‌آید که «نتیجه برآیند» نامیده می‌شود. این مدل‌ها معمولاً با سیستم‌ها و مسائل پیچیده سروکار دارند و دارای قابلیت‌های نوآورانه و خلاقانه‌اند (Crooks et al., 2008). در نهایت، پس از مدل‌سازی برای بررسی سیستم و فرایند کلی و حل مسئله، لازم است شبیه‌سازی صورت گیرد. در مجموع، شبیه‌سازی روشی کاربردی برای توصیف رفتار یک سیستم با استفاده از یک مدل ریاضی یا یک مدل نمادین به‌شمار می‌رود (Fishwick, 1995). همچنین، شبیه‌سازی ممکن است تقلیدی از عملکرد فرایندی از دنیای واقعی یا یک سیستم در طول زمان باشد (Banks, 1998).

هلبینگ و همکاران^۶ (۲۰۰۰) در پژوهش خود، برای بررسی مکانیسم‌ها در موقعیت‌های هراس و ازدحام حاصل از جابه‌جایی‌های ناهماهنگ جمعیت، از یک مدل رفتار عابر پیاده بهره بردند. آنها با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های خود، روش‌هایی عملی برای جلوگیری از فشارهای خطرناک ناشی از جمعیت مطرح کردند. همچنین استراتژی بهینه‌ای جهت گریز از اتاقی پر از دود عرضه داشتند که شامل ترکیبی از رفتار فردی و حرکت توده‌ای است. دامین^۷ در رساله دکتری خود (۲۰۰۴)، مدلی محاسباتی را به‌منزله ابزار برای پشتیبانی در طراحی تسهیلات حمل‌ونقل عمومی و فضاهای عمومی مشابه، که جریان‌های فشرده‌ای از جمعیت در آنها جاری است، عرضه کرد. وی در این پژوهش، علاوه بر حرکت افراد، جنبه‌هایی دیگر شامل انتخاب مسیر، فعالیت‌داشتن در مسیر، سوار وسایل

جداگانه و تعاملات میان اجزا و محیط، به‌منزله تکنیکی بسیار قدرتمند در حل مسائل حوزه‌های گوناگون علوم، به‌ویژه حوزه سیستم اطلاعات مکانی، جایگاه خود را یافته است. گیلبرت^۱ عامل^۲ را سیستمی واقع در درون محیط یا بخشی از آن می‌داند که محیط اطراف را درک می‌کند و براساس آن، در هر لحظه رفتار مناسب دارد و در کل این مدت، هدف خود را در حالی پیگیری می‌کند که درک آن از محیط در تصمیماتش اثر می‌گذارد (Gilbert, 2008). عامل‌ها را می‌توان در نقش افراد، موجودات زنده و در شرایطی نیز در نقش موجودات بی‌جان، همچون خانه و خودرو، به‌کار گرفت (Malleon et al., 2010). ویژگی‌های بسیاری برای عامل‌ها برشمرده شده ولی آنچه بیش از همه مورد توافق و تأکید است خودکاربودن و قابلیت تصمیم‌گیری عامل‌هاست (Macal and North, 2007).

رفتار عامل ممکن است یک یا چند مورد از ویژگی‌های زیر را داشته باشد (Getchell, 2008):

- هدف‌مداری یا حرکت به‌سوی هدف^۳: هر عامل به‌گونه‌ای رفتار می‌کند که در نهایت، به هدفی مشخص برسد.
- واکنش‌پذیری/ ادراک^۴: هر عامل محیط اطراف خود را درک و طرحی کلی ایجاد می‌کند که به او در مورد محیط اطرافش آگاهی می‌دهد.
- عقلانیت محدود^۵: به‌طور کلی، هدف‌مداری عامل‌ها براساس اصل انتخاب عقلانی است که معمولاً بر دسترسی نامحدود به اطلاعات و منابع محاسباتی دلالت دارد. با این حال، شواهد تجربی نشان می‌دهد تصمیم‌گیری غیربهینه به واقعیت نزدیک‌تر است. بنابراین، برای ایجاد قدرت پیش‌بینی بهتر، می‌توان عامل‌ها را از نظر شرایط مربوط به منابع اطلاعاتی یا قدرت تحلیلی محدودتر کرد.

برای پیاده‌سازی رفتار عامل‌ها و در نهایت، بررسی شرایط آنها در حالت‌های گوناگون، به مدل‌سازی عامل‌ها و شبیه‌سازی نیاز است. مدل عامل مبنا مدلی شامل یک یا چند عامل به‌همراه محیطی است که عامل‌ها در

1. Gilbert
2. agent
3. goal-direction
4. reactivity/ perceptivity
5. bounded rationality
6. Helbing et al.
7. Daamen

آنها با استفاده از فیلم‌های ویدئویی مراسم مذهبی خاص در هند، رفتار، تراکم جمعیت، جریان و سرعت حرکت جمعیت را به‌دست آوردند و در مدل خود از آنها به‌منزله ورودی استفاده کردند. همچنین بوزوگی و همکارانش^۵ (۲۰۱۷)، در پژوهش خود، مدلی عامل مینا جهت بررسی رفتار افراد از دو جنبه فیزیکی و روانی در شرایط اضطراری مطرح کردند. در این پژوهش برای تولید رفتارهای دلخواه افراد در شرایط گوناگون، از مجموعه‌ای از رفتارهای محتمل انسانی ایجادشده در فضایی مکانی-زمانی و همچنین از مدلی عامل مینا مبتنی بر سیستم پاداش و هزینه برای ایجاد محدودیت‌هایی در فرایند تصمیم‌گیری عامل‌ها استفاده شد. همچنین، آنها در این مدل فرایند تصمیم‌گیری مارکو^۶ و NASA-TLX را برای تخمین هزینه و پاداش به‌کار بردند. با استفاده از مدل پیشنهادی، فرایند تخلیه اضطراری بررسی شد. در بین پژوهش‌های صورت‌گرفته در کشور، می‌توان به پژوهش حاجی‌بابایی و همکاران (۱۳۸۶)، در رابطه با انتخاب بهترین مسیر بین نقاط گوناگون جهت جلوگیری از اتلاف زمان و انرژی، در زمینه راهیابی در محیط‌های شهری و به‌ویژه داخل ساختمان‌ها اشاره داشت. در پژوهش مورد نظر، مدلی مبتنی بر عامل برای ارزیابی شاخص‌های مکانی و کمک به طراحی بهینه آنها جهت تسهیل فرایند راهیابی در محیط داخل ساختمان‌ها استفاده شده است. در بین شبیه‌سازی‌های مربوط به آتش‌سوزی و بررسی رفتار آن، می‌توان به پژوهش مایار و همکاران (۱۳۹۲) و بهره‌گیری آنها از مدل‌های آتش‌سوزی برای بررسی رفتار آن در تونل اشاره کرد.

در این پژوهش، از نتایج شبیه‌سازی مکانی عامل مینای روند حرکتی افراد و شبیه‌سازی آتش‌سوزی در ایستگاه قطار شهری هفت تیر برای محاسبه

نقلیه عمومی شدن و پیاده‌شدن از آنها را نیز بررسی کرد. هنین و وایت^۱ (۲۰۰۵)، در پژوهشی در زمینه پیاده‌سازی رفتار افراد در کانادا، مدلی مبتنی بر شبیه‌سازی عامل مینا ارائه کردند. آنها افزون بر موارد مرتبط با افراد، فشار محیطی ناشی از عوامل دیگر را نیز در مدل خود پیاده‌سازی کردند. از ویژگی‌های این مدل بررسی اثر فشار و تعاملات محیطی در تراکم‌های متفاوت جمعیت و پیش‌بینی تعداد تلفات انسانی در فرایند تخلیه است. سانگ و همکاران^۲ (۲۰۱۳)، در پژوهش خود، روشی برای شبیه‌سازی تخلیه جمعیت در هنگام وقوع تهدیدهای بیوتروریسم مطرح کردند. روش آنها تلفیقی از تئوری اولیه محیط‌های جغرافیایی مجازی (VGE)، انتشار پاتوژن و تکنیک‌های شبیه‌سازی جمعیت بود. در این پژوهش، از فناوری‌های مهم روز شامل محیط مکانی مبتنی بر شبکه، مدل عامل مینای انفرادی و روشی مرکب از رفتار انفرادی افراد با محیط مکانی استفاده شده است. آنها برای پیاده‌سازی نمونه اولیه خود، محیط یکی از ایستگاه‌های قطار شهری پکن را انتخاب کردند. مدل نمونه برخی از رفتارهای فردی در شرایط اضطراری را، مانند رقابت و پیروی از صف و حرکت‌های توده‌ای، به‌خوبی نشان داد. ژو و همکارانش^۳ (۲۰۱۶)، در پژوهشی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار پویای افراد، از روش منطق فازی بهره بردند. این رفتارها منتج از تجربه و دانش انسانی و اطلاعات ادراکی به‌دست‌آمده از تعاملات انسان با محیط اطراف‌اند. کارآیی مدل با شبیه‌سازی تخلیه جمعیت در سناریوهای گوناگون، از جهات کمی و کیفی، بررسی شده و با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های مورد پذیرش، مانند Social forces Model نیز، مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان از توانمندی منطق فازی در مدل‌سازی قواعد حرکتی انسان‌ها دارد. باساک و گوپتا^۴ (۲۰۱۷) برای رسیدن به ویژگی‌های حرکتی جمعیت در مکانی خاص در زمان اضطراری و طرح راهکار مناسب برای مدیران بحران به‌منظور مسیرهای بهینه تخلیه جمعیت، مدلی عامل مینا عرضه کردند.

1. Henein and White
3. Zhou et al.
5. Busogi et al.

2. Song
4. Basak and Gupta
6. Markov decision process

سرپوشیده‌ای حدود ۳۸۲۹ مترمربع را داراست. در حال حاضر، این ایستگاه در خط یک مترو تهران قرار گرفته اما در آینده، ایستگاهی تقاطعی بین خط ۱ و خط ۶ در حال احداث ۶ متر خواهد بود. شکل ۱ موقعیت ایستگاه هفت تیر را نشان می‌دهد. اهمیت این ایستگاه از آنجاست که روزانه، به‌طور میانگین، حدود شصت‌هزار نفر برای تردد در مسیر مورد نظرشان از آن استفاده می‌کنند. این ایستگاه شامل یک سالن ورودی و یک سکو است. شکل ۳ سکوی این ایستگاه را، با عرضی حدود ۱۴ متر و طولی حدود ۱۴۰ متر، نشان می‌دهد. روی سکو، به‌جز صندلی‌ها، موانع فیزیکی دیگری وجود ندارد. ارتباط سکو و سالن ورودی با چهار دستگاہ پله‌برقی، با عرض حدود ۱۰۰ سانتی‌متر و چهار مسیر پله‌ای معمولی برقرار می‌شود.

۲-۲- داده‌های پایه مورد استفاده در پژوهش

داده‌های پایه مورد نیاز در این پژوهش دو گروه داده را دربر می‌گیرد: داده‌های محیطی مرتبط به ایستگاه و داده‌های جمعیتی، شامل آمار ورود و خروج افراد به ایستگاه و ویژگی‌های افراد.

۲-۲-۱- داده‌های محیطی

داده‌های محیطی ایستگاه شامل نقشه‌های محیط سالن ورودی و نیز سکوی انتظار جهت سوار و پیاده‌شدن افراد است. پس از اسکن کردن این نقشه‌ها، به‌دلیل ناخوانا بودن اعداد مرتبط با ابعاد ایستگاه، با مراجعه حضوری به محیط ایستگاه ابعاد واقعی محیط با متر مساحی برداشت شد. از این نقشه‌ها برای رقومی کردن و طراحی مدل فیزیکی ایستگاه در دو محیط نرم‌افزاری مرتبط با شبیه‌سازی عامل مبنا و نیز نرم‌افزار تحلیل پویای آتش‌سوزی استفاده شده است. در شکل ۲ و ۳ نمای دوبعدی ساختمان ایستگاه، شامل سالن ورودی و سکو، نشان داده شده است.

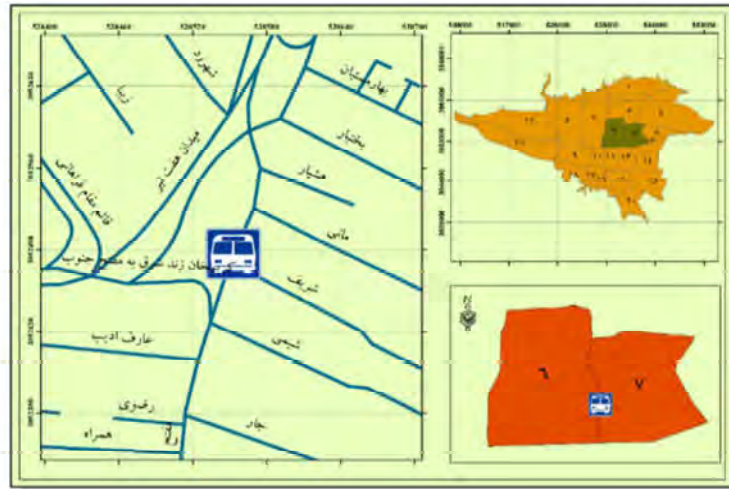
شاخص‌های دشواری حرکت، شامل شاخص‌های محیطی و محیطی-انسانی، با هدف بررسی تعاملات رفتاری افراد از محیط و افراد دیگر بهره برده می‌شود. دشواری در حرکت می‌تواند ناشی از پارامترهای انسانی یا محیطی باشد و در روند حرکتی افراد و زمان سفر آنها اثر بگذارد. دشواری حرکت در حقیقت معادل هزینه‌هایی است که در فرایند حرکت بر شخص تحمیل می‌شود. هر اندازه میزان دشواری حرکت در یک محیط کم باشد، ممکن است موجب روان‌شدن حرکت و در نهایت، پیشگیری از ازدحام شود. دانستن میزان شاخص‌های دشواری در هر زمان، در هر نقطه‌ای از فضای ساختمان، می‌تواند به مدیر بحران یاری برساند تا بداند نیرو و توان امدادی خود را چگونه در لحظه، در امداد رسانی، تقسیم و مدیریت کند. در راستای فرموله کردن و محاسبه دشواری حرکت، می‌توان از نتایج شبیه‌سازی‌های مکانی بهره گرفت. میزان شاخص دشواری حرکت می‌تواند بیانگر درجه روانی حرکت در مکان‌های متفاوت یک محیط اجتماعی باشد. در پژوهش حاضر، برای نخستین بار شاخص‌های دشواری حرکت ویژه زمان آتش‌سوزی در ساختمان‌ها مطرح می‌شود. تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش‌های پیشین بهره‌گیری از نتایج شبیه‌سازی‌های عامل مبنای حرکت افراد و آتش‌سوزی محیط در شاخص‌های دشواری حرکت است. پارامترهایی همچون میزان دید و تعاملات افراد در این شاخص‌ها به کار می‌روند. در ادامه، داده‌های مورد نیاز و همچنین روش به‌کاررفته در پژوهش بیان می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

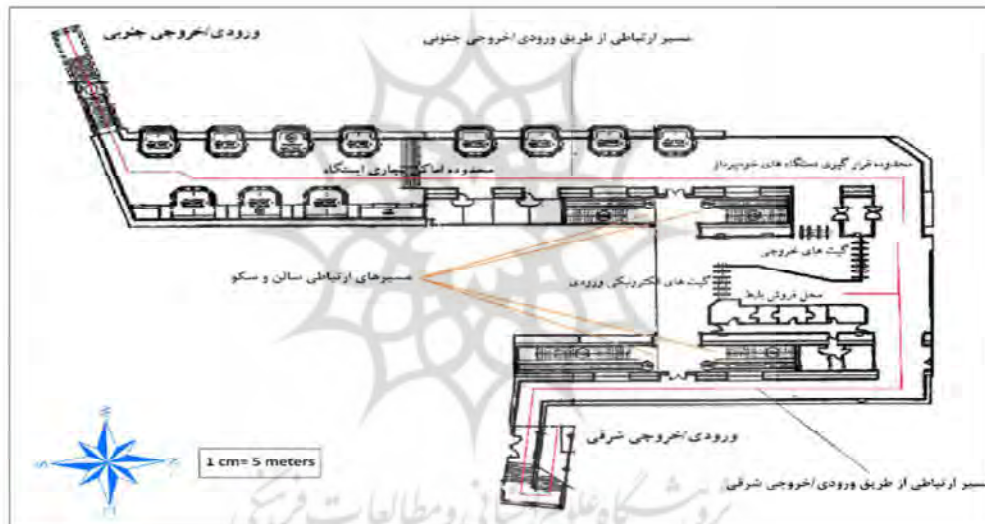
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، ایستگاه قطار شهری هفت تیر تهران، در مقام یکی از ایستگاه‌های بسیار مهم و پر رفت‌وآمد پایتخت، به‌منزله محل مورد مطالعه انتخاب شد. این ایستگاه در میدان هفت تیر واقع شده است و مساحت

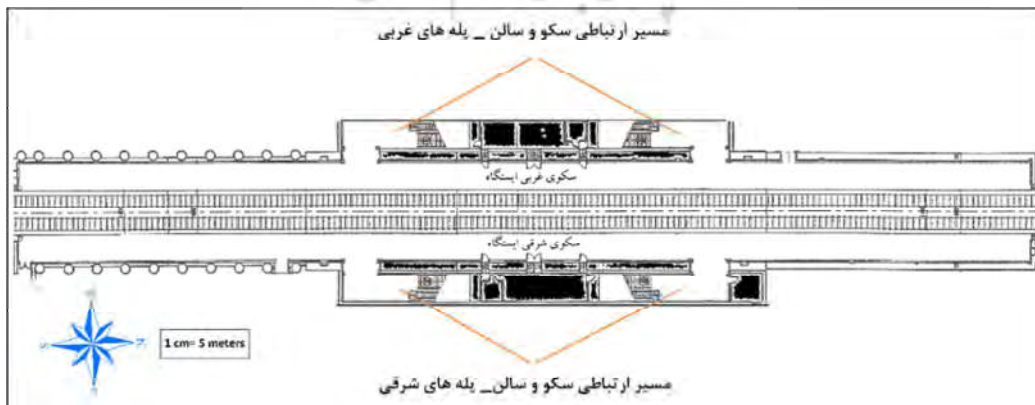
طرح شاخص‌های نوین دشواری حرکت با بهره‌گیری از ...



شکل ۱. شمای منطقه مورد مطالعه (ایستگاه قطار شهری هفت تپه تهران)



شکل ۲. شمایی از سالن ورودی ایستگاه هفت تپه



شکل ۳. شمایی از سکوی ورود و خروج قطار به ایستگاه

۲-۲-۲- داده‌های جمعیتی

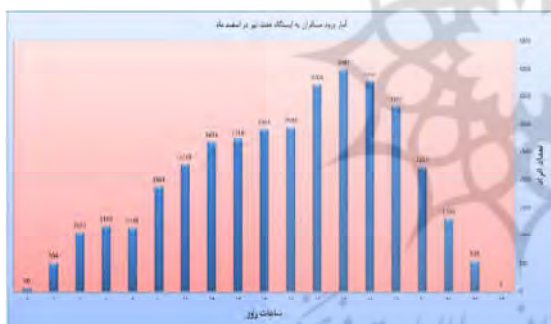
این داده‌ها شامل آمار ورود و خروج افراد به ایستگاه و نیز داده‌های مرتبط با ویژگی افراد است که آمار ورود و خروج از طریق شرکت قطار شهری تهران و حومه، و داده‌های دسته دوم از طریق نتایج پژوهش‌های مرتبط تأمین شدند.

۲-۲-۲-۱- آمار ورود و خروج افراد به ایستگاه

داده‌های مرتبط با آمار ورود شامل میانگین ورود در ماه‌های اسفند ۹۱ و اردیبهشت ۹۲، در مقیاس ساعتی است. شکل ۴ میانگین توزیع ورود مسافران به داخل ایستگاه راه، طی ساعات کاری آن در اردیبهشت ماه، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار مشخص است ساعات ۱۶ تا ۱۹، از لحاظ ورود افراد،

ساعات شلوغی مترو محسوب می‌شوند. عدد بیشینه مربوط به ساعت ۱۷ تا ۱۸ و عدد کمینه مربوط به ساعت ۲۳ می‌باشد. آمار روزانه این ماه انحراف معیاری برابر با ۹۹۲۱ دارد و کمترین تعداد ورود افراد به ایستگاه در این ماه مربوط به روزهای جمعه است.

شکل ۵ میانگین توزیع ورود افراد به داخل ایستگاه راه، طی ساعات کاری آن در اسفند ماه، نمایش می‌دهد. آنچه از این نمودار برمی‌آید مطابقت ساعات شلوغی آن با آمار اردیبهشت ماه، یعنی ساعات بین ۱۶ تا ۱۹ است. عدد بیشینه مربوط به ساعت ۱۷ تا ۱۸ و عدد کمینه مربوط به ساعت ۲۳ است. آمار روزانه این ماه نیز انحراف معیاری برابر ۱۱۶۹۵ دارد و مانند اردیبهشت ماه ۱۳۹۲، کمترین میزان مربوط به روزهای جمعه است.



شکل ۵. آمار ورود افراد به ایستگاه، اسفند ماه ۱۳۹۱



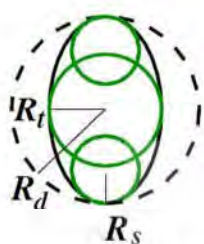
شکل ۴. آمار ورود افراد به ایستگاه، اردیبهشت ماه ۱۳۹۲



شکل ۶. آمار خروج افراد از ایستگاه، اردیبهشت ماه ۱۳۹۲

سانتی‌متر نیز به دلیل لباس ضخیم بدان افزوده می‌شود. همچنین مشخص شده است کارگران مرد، با لباس کامل، بدنی به ضخامت ۰/۳۳ متر و پهنای ۰/۵۸ متر دارند (تسهیلات پیاده‌روی، ۱۳۷۵).

شکل ۷ ابعاد بدن انسان را، که ترکیبی از سه دایره همپوشان است، نمایش می‌دهد. Rd شعاع دایره مربوط به پهنای بدن، Rt شعاع دایره مربوط به ضخامت بدن و Rs شعاع دایره مربوط به شانه است.



شکل ۷. شکل بدن انسان با دایره‌های همپوشان فرضی

همچنین در پژوهش کرهنن و هوستیکا^۱ (۲۰۱۰)، ابعاد بدن افراد و سرعت حرکت آنها مطابق جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. پارامترهای فیزیکی بدن افراد

منبع: Korhonen and Hostikka, 2010

دسته‌بندی	Rd	Rt/Rd	Rs/Rd	Ds/Rd
بزرگسالان	۰/۲۲-۰/۲۹	۰/۵۸۸۲	۰/۳۷۲۵	۰/۱۶۲۷۵
آقایان	۰/۲۵-۰/۲۹	۰/۵۹۲۶	۰/۳۷۰۴	۰/۱۶۲۹۶
بانوان	۰/۲۲-۰/۲۶	۰/۵۸۳۳	۰/۳۷۵	۰/۱۶۲۵
کودکان	۰/۱۹۵-۰/۲۲۵	۰/۵۷۱۴	۰/۳۳۳۳	۰/۱۶۶۶۷
کهنسالان	۰/۲۳-۰/۲۷	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۱۶۴

1. Fruin

2. Korhonen and Hostikka

شکل ۶ آمار میانگین خروج افراد از ایستگاه به‌عبارتی، افراد ورودی به ایستگاه از طریق قطارها، در اردیبهشت ماه ۱۳۹۲ را نمایش می‌دهد. در این نمودار، ساعات اوج خروجی ایستگاه ساعات ۷ تا ۹ صبح است. بیشینه آمار مربوط به ساعت ۸ تا ۹، با تعداد ۲۵۶۳ نفر و کمینه این آمار مربوط به ساعات ۲۲ تا ۲۳، با تعداد ۱۲ نفر است. این داده‌ها انحراف معیاری برابر با ۴۱۵۵ نفر دارند.

۲-۲-۳- داده‌های مرتبط با ویژگی‌های افراد

۲-۲-۳-۱- ابعاد بدن افراد

از آنجاکه محور این مطالعات شناخت ویژگی‌های رفتاری افراد به‌منزله عامل‌های انسانی است، تمامی پیچیدگی‌ها و ظرافت‌های انسانی، اجتماعی و مکانی در آن تأثیر می‌گذارد. به‌علاوه، به‌علت سرشت تغییرپذیر رفتارها و تمایلات انسانی، این‌گونه مطالعات باید در مکان‌ها و زمان‌های متفاوت به‌صورت جزء تفکیک‌ناپذیر برنامه‌ریزی و مدیریت حمل‌ونقل شهری تکرار شوند (تسهیلات پیاده‌روی، ۱۳۷۵). با توجه به گسترده‌بودن جنبه‌ها و خصوصیات رفتاری افراد در رویارویی با عوامل محیطی متفاوت، امکان ارزیابی همه‌جانبه آنها وجود ندارد.

این داده‌ها، شامل اعداد مرتبط با ابعاد بدن افراد و نیز سرعت حرکت آنها، مهم‌ترین ویژگی‌ها به‌شمار می‌آیند. به‌منظور دسترسی به این داده‌ها، از نتایج پژوهش‌های مرتبط با سنجش ویژگی‌های رفتاری افراد و مشاهدات میدانی نگارنده در محیط ایستگاه، در رابطه با سرعت افراد، بهره برده شد. از مهم‌ترین تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه رفتار حرکتی و ویژگی‌های افراد پیاده در ایران، نتایج منتشرشده در نشریه تسهیلات پیاده‌روی سازمان برنامه و بودجه (۱۳۷۵ و ۱۳۷۶) است. در این پژوهش دو ویژگی اساسی افراد، یعنی ابعاد بدن و سرعت حرکت آنها، در شرایط گوناگون بررسی شده است. براساس مطالعات انجام‌شده در پژوهش فروین^۱ (۱۹۷۱) مشخص شده میانگین پهنای بدن انسان ۰/۵۳ متر است و در حالت عادی، ۳/۸

سن و جنسیت و نوع کاربری معبر اندازه‌گیری شده که خلاصه آنها در جدول ۲ آمده است.

تحلیل داده‌های جدول نشان می‌دهد که میانگین بیشینه سرعت پیاده‌روی مشاهده‌شده در گروه سنی ۲۵-۱۳ برابر ۱/۳۲ متر بر ثانیه و کمینه آن، در گروه سنی بالای ۵۵ سال، برابر ۱/۰۵ متر بر ثانیه است. در مورد کودکان (گروه سنی ۱۲-۶ سال)، سرعت پیاده‌روی به علت کوتاهی گام‌ها عملاً کمتر از ۱/۱۴ متر بر ثانیه است.

در ارتباط با تأثیر نوع کاربری معبر در سرعت‌های پیاده‌روی، مشاهده می‌شود که بیشترین سرعت مربوط به عبور از عرض خیابان (۱/۳ متر بر ثانیه) و کمترین سرعت در گردشگاه‌ها (۱/۱ متر بر ثانیه) و در دیگر کاربری‌ها، میانگین سرعت آزاد پیاده‌روی در حدود ۱/۲ متر بر ثانیه است. در پژوهشی دیگر، سرعت افراد مطابق جدول ۳ گزارش شده است.

آنچه اهمیت دارد در نظر گرفتن تفاوت‌های فردی، مکانی و فرهنگی در محاسبه پارامترهای انسانی است. با توجه به مطالب پیشین، در این پژوهش، ابعاد بدن افراد در بازه ۰/۳۹ تا ۰/۵۸ در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۳-۲- سرعت حرکت افراد

سرعت پیاده‌روی افراد در شرایط جریان آزاد، طبق سن و جنس و وضعیت جسمانی فرد و دیگر عوامل، همچون منظور از سفر پیاده، زمان سفر و شرایط محیطی، متفاوت است. اشخاص سالم می‌توانند سرعت پیاده‌روی خود را از حد کندروی به میزان ۰/۹-۰/۶ متر در ثانیه، تا حد تندروی به میزان ۱/۸ - ۱/۵ متر بر ثانیه تغییر دهند (تسهیلات پیاده‌روی، ۱۳۷۵).

در پژوهش رادیویا (۱۳۷۲)، نتایج مطالعه‌ای در زمینه سرعت پیاده‌روی عابران در شهر تهران گزارش شده است. در این مطالعه، سرعت عابران پیاده برحسب

جدول ۲. نتایج اندازه‌گیری سرعت آزاد افراد در کاربری‌های گوناگون

منبع: رادیویا، ۱۳۷۲

نوع کاربری	گروه سنی ۶ تا ۱۲ سال		گروه سنی ۱۳ تا ۲۵ سال		گروه سنی ۲۶ تا ۴۰ سال		گروه سنی ۴۱ تا ۵۵ سال		گروه سنی بالای ۵۵ سال		میانگین کل
	بانوان	آقایان	بانوان	آقایان	بانوان	آقایان	بانوان	آقایان	بانوان	آقایان	
گردشگاه	۰/۹۳	۱/۳	۱/۱۵	۱/۳۸	۱/۱۳	۱/۳۶	۱	۱/۰۵	۰/۸	۰/۹۹	۱/۰۸
مسکونی	۱	۱/۱۳	۱/۲۹	۱/۴۳	۱/۱۸	۱/۳۶	۱/۰۹	۱/۳۴	۱/۱	۱/۰۷	۱/۱۹
تجاری	۱/۱۶	۱/۱۷	۱/۰۵	۱/۳۳	۰/۸۵	۱/۲۵	۱/۰۱	۱/۳۸	۰/۹۲	۱/۰۳	۱/۱۱
آموزشی	۱/۱۹	۱/۱۳	۱/۲۳	۱/۳۴	۱/۲۴	۱/۲۶	۱/۱۷	۱/۲	۱/۰۷	۱/۰۶	۱/۱۹
عبور از خیابان	۱/۱۴	۱/۲۱	۱/۴۷	۱/۵۹	۱/۳۷	۱/۴۶	۱/۱۹	۱/۴۴	۱/۱۶	۱/۲۹	۱/۳۲
میانگین	۱/۰۸	۱/۱۹	۱/۳۴	۱/۴۱	۱/۱۵	۱/۳۴	۱/۰۹	۱/۳۴	۱/۰۱	۱/۰۹	۱/۱۸
میانگین کل	۱/۱۴	۱/۳۲	۱/۲۵	۱/۳۲	۱/۱۷	۱/۲۵	۱/۰۵	۱/۱۷	۱/۰۵	۱/۱۸	۱/۱۸

جدول ۳. سرعت پیاده‌روی افراد براساس رده سنی و جنسیت

منبع: Korhonen and Hostikka, 2010

رده سنی	بزرگسالان	آقایان	بانوان	کودکان	کهنسالان
سرعت پیاده‌روی	۰/۹۵-۱/۵۵	۱/۱۵-۱/۵۵	۰/۹۵-۱/۳۵	۰/۶-۱/۲	۰/۵-۱/۱

۲-۴- طراحی مدل شبیه‌سازی آتش‌سوزی

در پژوهش حاضر برای بررسی رفتار آتش در محیط ایستگاه، از شبیه‌سازی آتش با نرم‌افزار FDS استفاده شده است. شبیه‌سازی آتش‌سوزی ایستگاه مبتنی بر یک مدل محاسباتی دینامیک سیالات است که از آن به‌منظور بررسی جریان‌های ناشی از آتش‌سوزی، به‌ویژه چگونگی توزیع دود و دما، بهره گرفته شد. این مدل فرم ویژه‌ای از معادله ناویر-استوکس^۳ را، برای جریان‌های سرعت پایین ناشی از آتش‌سوزی، به‌صورت عددی حل می‌کند. این نرم‌افزار معادلات ناویر-استوکس را در سرعت‌های پایین، با تأکید بر حرکت دود و انتقال گرما از آتش، به‌دست می‌آورد. از این شبیه‌سازی می‌توان در مطالعه جریان دود، طراحی دقیق سیستم اطفای حریق (از قبیل محل مناسب قرارگیری تجهیزات، مانند آشکارساز دود و حریق) و طراحی مسیر فرار استفاده کرد.

۲-۵- سناریوهای پیاده‌سازی شده در پژوهش

در ادامه، سناریوهای پیاده‌سازی شده در پژوهش معرفی شده است. شکل ۸ نمایی کلی از این سناریوها را نمایش می‌دهد. در پژوهش حاضر، دو سناریو برای شبیه‌سازی روند حرکتی و یک سناریو برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی در نظر گرفته شد. از میان سناریوهای موجود، نتایج مربوط به دو سناریوی شبیه‌سازی روند حرکتی و نتایج مربوط به شبیه‌سازی آتش‌سوزی در سکو برای محاسبه شاخص‌های دشواری حرکت استفاده شدند.

۲-۶- سناریوهای روند حرکتی

سناریوهای اجرا شده برای شبیه‌سازی عامل مبنای ایستگاه شامل دو سناریوی عمده است که هر یک از آنها براساس میزان تردد در ساعات شلوغی خواهند بود. شایان ذکر است تغییرات محیطی در ایستگاه فقط در سالن ورودی صورت می‌گیرد. در ادامه، این دو سناریو مطابق شکل‌های ذیل معرفی می‌شود.

1. social forces model
2. repulsive forces
3. Navier-Stokes

مطالعات صورت‌گرفته نشان از نرمال بودن توزیع سرعت حرکت افراد دارد (تسهیلات پیاده‌روی، ۱۳۷۵؛ Chandra and Bharti, 2013).

۲-۳- روش محاسباتی حرکت عامل‌ها

برای پیاده‌سازی حرکت افراد در محیط، از قواعد مدل نیروهای اجتماعی^۱ استفاده شد:

این مدل یک مدل خرد محسوب می‌شود که هم در فضا و هم در زمان پیوسته است. این مدل تحت تأثیر مکانیک نیوتنی است و به حرکت افراد تعمیم داده می‌شود. این نیروها از نیروهای دافع^۲ در برابر دیگر افراد و مرزها، نیروهای اصطکاک، نیروهای جاذبه بین اعضای گروه و نیروهای محرک مرتبط با سرعت‌های مطلوب تشکیل شده است. برهم‌نهی تمامی این نیروها نیروی برآیندی را به‌دست می‌دهد که شتاب افراد را مشخص می‌کند. در نهایت، با انتگرال‌گیری در زمان، سرعت‌ها و موقعیت‌ها از شتاب‌ها به‌دست می‌آیند (Helbing and Johansson, 2009; Helbing and Molnar, 1995). طبق این مدل، هر فرد تحت تأثیر نیروهای اجتماعی مجبور به حرکت می‌شود. مجموع نیروهای وارد بر فرد باعث به‌وجود آمدن شتاب در وی می‌شود. مقدار این شتاب از رابطه (۱) به‌دست می‌آید:

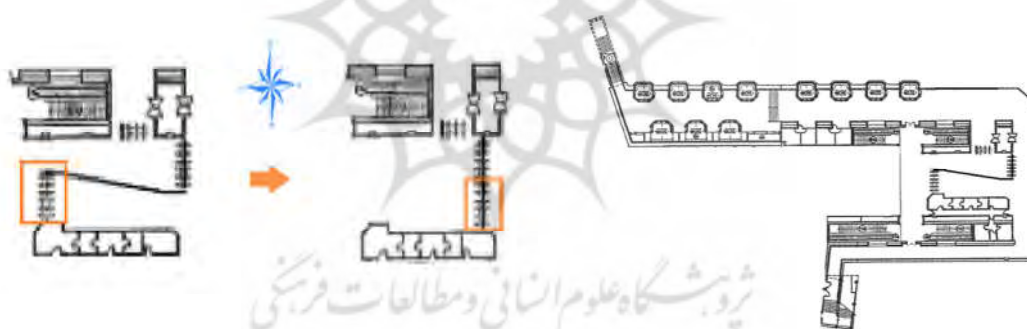
رابطه (۱)

$$m \frac{dv_i(t)}{dt} = m \frac{v_0 e_i - v_i(t) + \xi_i(t)}{\tau} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij}(x_i(t), x_j(t)) + f_b(x_i(t))$$

که در این رابطه، $x_i(t)$ مکان فرد پیاده‌آدم در زمان t ، $v_i(t)$ سرعت فرد پیاده‌آدم در زمان t ، m جرم فرد پیاده، v_0 سرعت مورد نظر در زمان تداخل‌نداشتن، e_i جهتی که فرد پیاده‌آدم در حال پیمودن است، $\xi_i(t)$ نوسان سرعت افراد، تداخل بین فرد پیاده‌آدم و زام، f_b تداخل افراد پیاده با مرزهای مشخص شده است.



شکل ۸. شمایی کلی از سناریوهای پیاده‌سازی شده در پژوهش



شکل ۹. سناریوی وضعیت فعلی (نخستین سناریو مربوط به شرایط موجود و حال حاضر ایستگاه هفت تیر، براساس داده‌های واقعی میزان ورود و خروج افراد است)

شکل ۱۰. سناریوی تغییر محیطی بهینه (برای کاستن اثر ازدحام افراد در شرایط گلوگاهی سناریوی وضعیت فعلی و بررسی اثر آن در روند حرکتی افراد، موقعیت گیت‌های ورود و خروج جابه‌جا شده است)

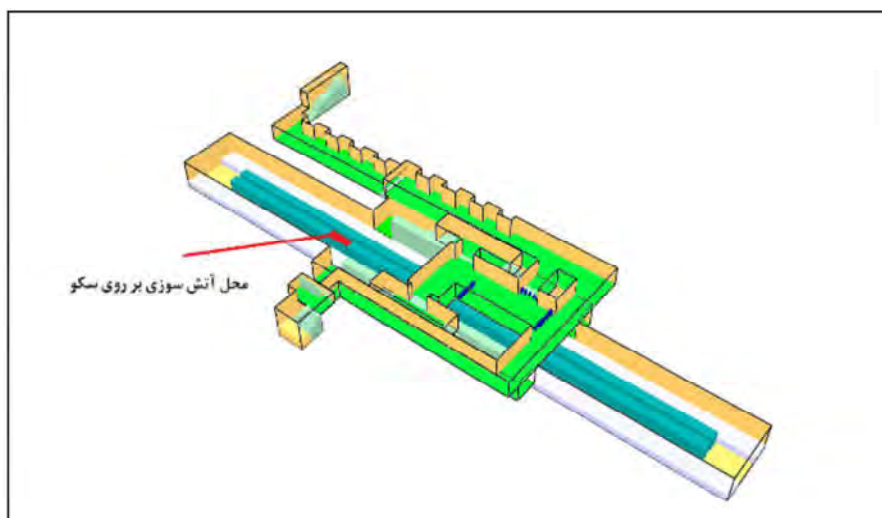
سناریو میزان دید جهت بهره‌گیری در محاسبه شاخص‌ها به دست خواهد آمد.

۲-۸- شاخص‌های دشواری حرکت

شاخص‌های گوناگونی به منظور بررسی تأثیر عوامل محیطی و پیرامونی در رفتار حرکتی عامل‌ها وجود دارد. از مهم‌ترین و قابل درک‌ترین آنها شاخص

۲-۷- سناریوهای مورد نظر در شبیه‌سازی آتش

در پژوهش حاضر، سناریوهای بررسی شده در زمینه شبیه‌سازی آتش شامل سه سناریوی عمده، مطابق شکل ۱۱ است. این سناریوها آتش‌سوزی در سکو، با فرض قطعی برق و از کار افتادن فن‌ها را دربر می‌گیرند. باید گفته شود این سناریو براساس آتش‌سوزی شدید است و شدتی برابر با 10000 kw/h دارد. برای این



شکل ۱۱. سناریوی نخست، محل آتش‌سوزی در سکو و روی قطار

AM₂ را دربر می‌گیرد. در ادامه، هر یک از این شاخص‌ها شرح داده شده است.

۱. شاخص دشواری به دلیل حرکت در فاصله‌ای نزدیک با دیوار و موانع

برای محاسبه این شاخص از رابطه (۲) استفاده می‌شود (Hoogendoorn and Bovy, 2005).

رابطه (۲)

$$L_2(t, \xi, v) = g_m(d(B_m, \xi)) = a_m \exp(-d(B_m, \xi)/b_m)$$

L_2 میزان دشواری در زمان t ، در مکان ξ و با سرعت v است و $d(B_m, \xi)$ فاصله بین عامل‌ها و موانع محسوب می‌شوند. a_m و b_m پارامترهایی با افزایش تدریجی‌اند که محدوده اثر^۴ مانع m را نشان می‌دهند و به نوع مانع، مانند درختان و دیوارها، ارتباط دارند.

۲. دشواری به دلیل ازدحام و سطح خدمات

این شاخص شامل میزان تعاملات مورد انتظار بین عامل‌هاست و در آن تابعی به نمایندگی تعداد تعاملات مورد انتظار به صورت $\xi(t, \xi) = \xi$ در زمان t و

دشواری^۱ محیط است (Hoogendoorn and Bovy, 2005).

این شاخص‌ها در جهت محاسبه هزینه‌های حرکتی^۲ عامل به کار می‌روند. هزینه‌های حرکتی عواملی‌اند که موجب کندی روند حرکتی یک عامل و در نهایت، جمعی از آنها می‌شوند و در نتیجه، زمان سفر را افزایش می‌دهند. آگاهی از میزان این هزینه‌ها، در زمان‌ها و شرایط گوناگون، چه بسا در تخمین روند حرکتی جمعیت مؤثر باشد و حتی می‌توان از آنها در بهینه‌سازی شرایط محیطی بهره گرفت. همچنین می‌توان در زمان‌های بحرانی، با تکیه بر نتایج این محاسبات، استراتژی‌های مناسبی برای مدیریت جمعیت اتخاذ کرد. شاخص‌های دشواری حرکت را می‌شود در دو دسته کلی شاخص‌های در شرایط عادی و شاخص‌های در شرایط اضطرار تقسیم‌بندی کرد.

شاخص‌های دشواری محاسبه‌شده در این پژوهش شامل دو شاخص دشواری در شرایط عادی و دو شاخص جدید مطرح‌شده در این پژوهش برای شرایط آتش‌سوزی است. شاخص‌های دسته اول که هوگندرن و همکارانش^۳ (۲۰۰۵)، عرضه کردند شامل شاخص‌های L_2 (محیطی) و L_4 (انسانی) است و شاخص‌های نوین مطرح‌شده برای شرایط آتش‌سوزی شاخص‌های AM_1 و

1. discomfort
3. Hoogendoorn et al.

2. running costs
4. region of influence

نمایش دشواری در محیط در هنگام آتش‌سوزی باشد.

$$AM_2 = R(AM_1, L) \quad \text{رابطه (۵)}$$

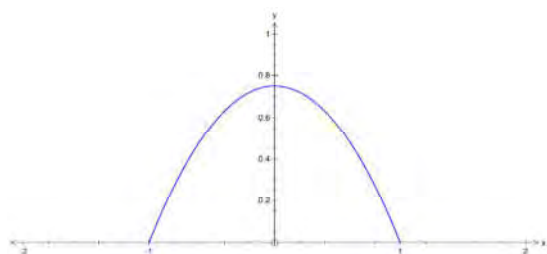
برای محاسبه این شاخص، از لایه‌های فواصل مربوط به دیوارها، موانع، لایه عمق میدان دید و لایه تراکم و ترکیب آنها پس از نرمال‌سازی بهره‌برده می‌شود.

۲-۹- تعامل عامل‌ها

برای به‌دست آوردن لایه معادل تعامل عامل‌ها و محاسبه شاخص دشواری مؤثر در رفتار عامل‌ها در شرایط عادی و اضطرار، از روش Kernel Density استفاده شده است. به‌منظور رسیدن به نتیجه مطلوب، داده‌های مکانی مربوط به موقعیت عامل‌ها در طول شبیه‌سازی استخراج می‌شود. سپس تابع مورد نظر، روی داده‌های موقعیت، پیاده‌سازی می‌شود و محل‌های بحرانی ازدحام در زمان‌های متفاوت به‌دست می‌آید. برای محاسبه Kernel Density از تابع (quadratic) Epanechnikov مطابق رابطه (۶)، استفاده می‌شود (De Smith et al., 2007).

$$K(t) = \begin{cases} \frac{3}{4}(1-t^2), & |t| \leq 1 \\ 0, & t > 1 \end{cases}$$

رابطه (۶)



شکل ۱۲. تابع Epanechnikov

مکان ξ تعریف شده است. $k(t, \xi)$ تابعی غیرخطی است که از لایه ازدحام $k(t, \xi)$ به‌دست می‌آید. این شاخص با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Hoogendoorn and Bovy, 2005).

رابطه (۳)

$$L(t, \xi, v) = \zeta(k(t, \xi))$$

۳. شاخص AM_1

از این شاخص که بهینه‌شده شاخص اول به‌شمار می‌رود، می‌توان برای شبیه‌سازی در شرایط آتش‌سوزی استفاده کرد. این شاخص عبارت از دخیل کردن عاملی دیگر با عنوان عمق میدان دید بر اثر دود حاصل از آتش‌سوزی در رابطه (۱) است. به‌علت شرایط خاص حاکم بر زمان آتش‌سوزی و کاهش عمق میدان دید بر اثر تولید دود و آلاینده‌ها، می‌توان در محاسبه هزینه‌ها و دشواری‌های حرکتی، پارامتر عمق میدان دید را نیز در مسائل وارد کرد. این شاخص را در حقیقت می‌توان نماینده تأثیر محیط و آتش در رفتار حرکتی عامل‌ها توصیف کرد. برای این شاخص می‌شود رابطه (۴) را در نظر گرفت.

$$AM_1(t, \xi, v) = f(g_m, Vis) \quad \text{رابطه (۴)}$$

Vis متغیر جدید در این شاخص است که لایه عمق میدان دید را نشان می‌دهد.

۴. شاخص AM_2 . شاخصی ترکیبی از دو شاخص

L و AM_1

برای نزدیک‌تر شدن به واقعیت در محاسبه دشواری، می‌توان دشواری منتج از ازدحام و دشواری منتج از شرایط محیطی را در یک شاخص و تابع ترکیبی مطرح کرد. دشواری‌ای که در شرایط آتش‌سوزی در رفتار حرکتی عامل تأثیر می‌گذارد برآیندی از تعاملاتش با محیط، آتش و نیز تعاملات با دیگر عامل‌هاست. بنابراین، شاخص AM_2 می‌تواند شاخصی مناسب برای

- آثار درجه اول: احتمال وقوع رخداد در تمامی فضای محیط یکسان نیست. یعنی با توجه به شرایط محیطی، احتمال وقوع در برخی مکان‌ها بیشتر و در برخی قسمت‌ها کمتر است.

- آثار درجه دوم: مکان وقوع رخدادها از هم مستقل نیستند و بین آنها تعامل وجود دارد.

برای بررسی آثار درجه اول، یعنی محیط، از بررسی نتایج شاخص‌های محیطی یادشده در مطالب پیشین، یعنی L_2 و AM_1 بهره گرفته شده است زیرا پارامترهای مؤثر در این شاخص‌ها شرایطی را به وجود می‌آورند تا احتمال حضور عامل در تمامی محیط یکسان نباشد. اما در رابطه با بررسی آثار درجه دوم، از نتایج شاخص L_2 ، یعنی لایه ازدحام حاصل از Kernel Density با شعاع جست‌وجوی در نظر گرفته‌شده براساس تعریف فضای اجتماعی عامل، استفاده شده است.

۳- نتایج

۳-۱- نتایج مربوط به شبیه‌سازی آتش‌سوزی

در این بخش سناریوهای مربوط به آتش‌سوزی، شامل سه سناریوی اصلی براساس موقعیت آتش‌سوزی‌ها و نیز نه سناریوی فرعی براساس شدت آتش، بررسی شده‌اند. در مورد هر سناریو، نتایج به‌دست‌آمده برای میزان میدان دید در ارتفاع ۱/۷ متر از کف سالن‌ها نمایش داده شده است. علت انتخاب ارتفاع ۱/۷ متر نزدیک‌بودن این عدد به میانگین قد افراد است. نتایج بیان‌شده در هر سناریو شامل میزان قابلیت دید در صدوپنجاهمین ثانیه اجرای مدل است. مدت زمان شبیه‌سازی مربوط به آتش‌سوزی ۵۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل ۱۳ نمونه‌ای از نتایج مربوط به میزان قابلیت دید در شرایط آتش‌سوزی در ایستگاه را نمایش می‌دهد.

برای محاسبه تراکم، به شعاع جست‌وجو نیاز است و این شعاع برابر با فاصله‌ای در نظر گرفته شده که افراد با هم تعامل و در هم اثر دارند. هال^۱ در پژوهشی (۱۹۹۶)، چهار منطقه را برای یک فرد در نظر می‌گیرد:

۱. منطقه عمومی: فضای بیرون دایره‌ای به شعاع ۳/۶ متر به مرکزیت هر شخص را منطقه عمومی برای آن شخص در نظر می‌گیرند. معمولاً افراد به افراد دورتر از این فاصله توجهی ندارند و در مقابل آن شخص در آن فاصله احساس امنیت می‌کنند. می‌توان گفت فرد با افراد حاضر در این منطقه هیچ‌گونه تعاملی ندارد.

۲. منطقه اجتماعی: فضای محصور بین دایره‌هایی با شعاع ۱/۵ تا ۳/۶ متر به مرکزیت شخص را منطقه اجتماعی می‌نامند. در این منطقه، افراد شروع به درک و توجه به افراد دیگر می‌کنند.

۳. منطقه خصوصی: منطقه شامل فضای بین دایره‌هایی به شعاع ۰/۵ تا ۱/۵ متر را منطقه خصوصی شخص می‌نامند.

۴. منطقه خودمانی: فضای درون دایره‌ای به شعاع ۰/۵ متر به مرکزیت فرد را منطقه خودمانی فرد گویند.

با توجه به مطالب ذکرشده، می‌توان چنین برداشت کرد که در فضای دورتر از ۳/۶ متر، تعاملی بین فرد با افراد دیگر رخ نمی‌دهد، تعاملات فرد با افراد دیگر درون فاصله کمتر از ۳/۶ متری رخ می‌دهد و با نزدیک‌تر شدن به فرد، میزان این تعاملات افزایش می‌یابد.

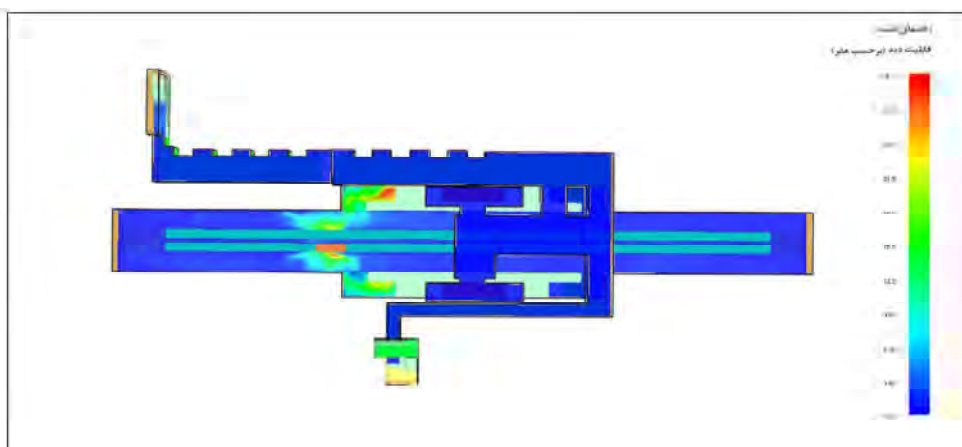
براساس مطالب مطرح‌شده، شعاع جست‌وجوی رابطه تراکم برابر با میانگین شعاع منطقه اجتماعی هر عامل، و تعاملات رخ داده بین عامل‌ها برابر با ۳/۶ متر در نظر گرفته شده است.

۲-۱۰- آثار درجه اول و دوم در ایستگاه قطار

شهری

با در نظر گرفتن سیستم ایستگاه قطار شهری به‌منزله فرایندی مکانی، امکان بررسی آثار درجه اول و درجه دوم پایداری در آن به‌وجود می‌آید (O'Sullivan and Unwin, 2010).

1. Hall



شکل ۱۳. توزیع مکانی میزان قابلیت دید در محیط ایستگاه در ثانیه صدوینجاهم

شاخص‌ها تابعی از زمان است و متناسب با تغییر موقعیت عامل‌ها و نیز تغییر محیط بر اثر آتش‌سوزی (افزایش غلظت دود) کاملاً متغیر است. در ادامه، نتایج مربوط به توزیع مکانی دشواری در محیط ایستگاه بیان شده است.

۳-۲-۱- شاخص محیطی I_2 (دشواری به دلیل حرکت در فاصله نزدیک از دیوار و موانع)

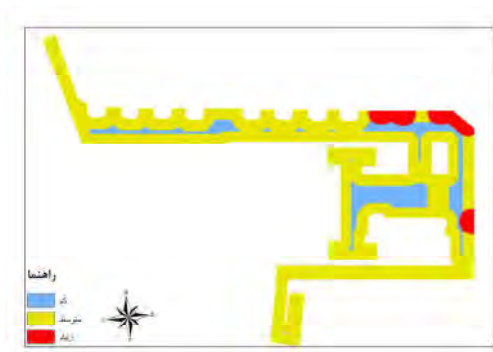
همان‌گونه که در شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود، بیشترین دشواری مربوط به مکان‌های نزدیک به موانع باجه‌های خودپرداز و نیمکت‌ها است. با مقایسه دو نتیجه مربوط به شاخص دشواری سالن ورودی در شرایط فعلی و نیز دشواری در شرایط تغییرات محیطی بهینه‌شده با جابه‌جایی مکان گیت‌ها، مشاهده می‌شود که میزان دشواری در وسط سالن ورودی، پس از گیت‌ها، کاهش چشمگیری داشته و راحتی تردد در این شرایط به‌وجود آمده است. بهبود زمان و فرایند تخلیه در سناریوی تغییر محیطی اول دلیلی بر اثبات این قضیه است.

شایان ذکر است که در سکو تغییراتی صورت نگرفته و در هر دو سناریو، شرایط ثابت و یکسانی دارد. شکل ۱۶ شمایی از میزان L_2 در سکو را نمایش می‌دهد. طبق تصویر، میزان دشواری در مکان‌های نزدیک نیمکت‌ها و نزدیک لبه سکو بیشترین میزان را به خود اختصاص داده است.

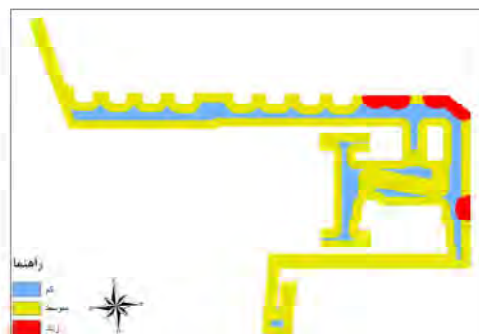
۳-۲-۲- نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های دشواری

با توجه به مطالب بیان‌شده در بخش‌های پیشین، شاخص‌های دشواری ممکن است محیطی یا انسانی باشند. اهمیت محاسبه این شاخص‌ها در یافتن تأثیرات محیطی یا انسانی در رفتار حرکتی افراد و محاسبه هزینه‌های حرکتی تحمیل‌شده بر عامل است. در شاخص‌های دشواری بررسی‌شده در این پژوهش، از داده‌های محیطی شامل لایه‌های دیوارها، موانع و میزان دید و از داده‌های انسانی لایه‌های تراکم تولیدشده بر اساس شعاع جست‌وجوی $3/6$ متر بهره گرفته شده است. برای بررسی تأثیر شاخص‌های دشواری در رفتار حرکتی عامل‌ها و مقایسه تأثیرات تغییر محیطی در این شاخص‌ها، از نتایج سناریوی مربوط به وضعیت فعلی و سناریوی تغییر محیطی بهینه با میزان ورود بالا به محیط ایستگاه بهره برده شده است.

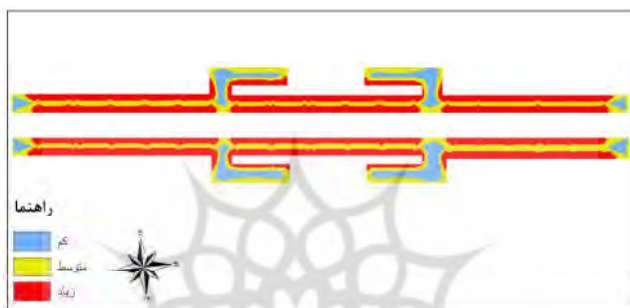
برای محاسبه شاخص‌های دشواری AM_1 و AM_2 ، به داده‌های فواصل از دیوارها و موانع، تعامل عامل‌ها و میزان قابلیت دید در هر دو سناریوی بالا نیاز است. برای محاسبه تعامل عامل‌ها در این سناریوها، از محاسبات نقشه‌های تراکم با روش Kernel Density در هر دو سناریو استفاده شده است. با توجه به مطالب مطرح‌شده برای هر سناریو، سه مجموعه محاسبات شاخص دشواری صورت گرفته است. میزان این



شکل ۱۵. توزیع مکانی دشواری محیطی L_2 در شرایط تغییرات محیطی بهینه‌ای ایستگاه در سالن ورودی



شکل ۱۴. توزیع مکانی دشواری محیطی L_2 در شرایط فعلی ایستگاه در سالن ورودی



شکل ۱۶. توزیع مکانی دشواری محیطی L_2 در سکو

شکل ۱۹ میزان شاخص AM_1 را در سکو نمایش می‌دهد. تصویر بیانگر بالابودن میزان دشواری در نزدیکی مکان نیمکت‌ها و اندک‌بودن دشواری در مسیرهای ورودی راه‌پله‌ها، به‌علت بالابودن میزان قابلیت دید در این نواحی، در هنگام آتش‌سوزی است.

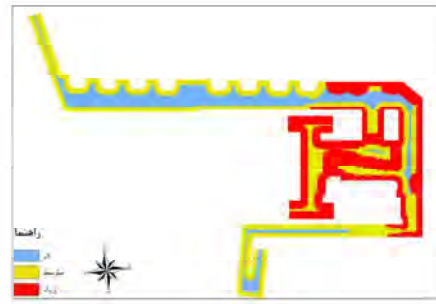
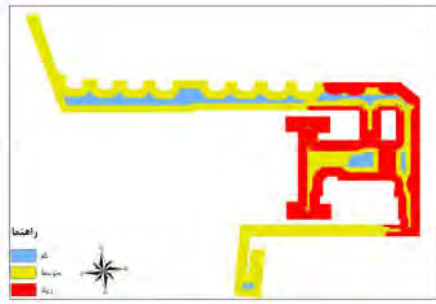
۳-۲-۳- نتایج مربوط به شاخص محیطی -

AM_2 انسانی

در محاسبه این شاخص، متغیری در جایگاه عامل انسانی در محاسبات دخیل شده است. این عامل انسانی لایه میزان تعامل افراد با یکدیگر در محیط است که از طریق محاسبه تراکم حضور افراد براساس شعاع منطقه اجتماعیشان، در شرایط آتش‌سوزی، در هر دو سناریو به‌دست آمده است. برای نمونه، نقشه تراکم افراد در ثانیه پنجاهم سناریوی شرایط فعلی ایستگاه در شکل ۲۰ نمایش داده شده است.

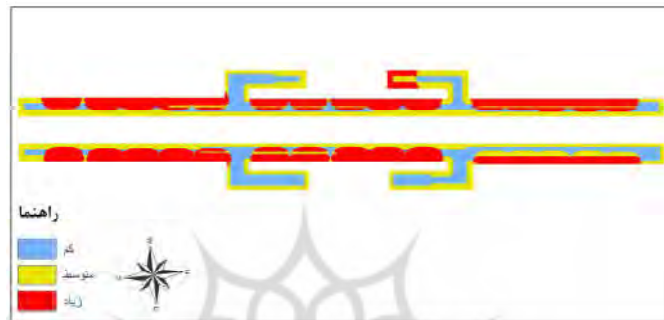
۳-۲-۲- نتایج مربوط به شاخص محیطی AM_1

همان‌گونه که در بخش پیشین بیان شد، این شاخص به‌منظور بررسی دشواری محیطی در شرایط آتش‌سوزی مطرح شده و در آن، افزون بر عوامل محیطی، میزان قابلیت دید در هنگام آتش‌سوزی نیز به‌منزله متغیری محیطی وارد شده است. در این محاسبات، از لایه میزان قابلیت دید در ثانیه پنجاهم آتش‌سوزی استفاده شده است. نتایج حاکی از شدت بالای دشواری در هنگام آتش‌سوزی در مکان‌های نزدیک به موانع، دیوارها و محل‌های با قابلیت دید اندک است. این امر قطعاً در شرایط اضطرار، در تردد افراد تأثیر می‌گذارد و روند را کندتر خواهد کرد. با مقایسه شکل ۱۷ و ۱۸ می‌توان به کاهش میزان دشواری در شرایط بهینه، در مقایسه با شرایط فعلی در مرکز سالن ورودی و نزدیک گیت‌ها، اشاره داشت. این امر به‌خودی‌خود روند حرکتی عامل‌ها در زمان آتش‌سوزی را روان‌تر خواهد کرد.



شکل ۱۷. توزیع مکانی دشواری محیطی AM₁ در شرایط فعلی
ایستگاه در سالن ورودی

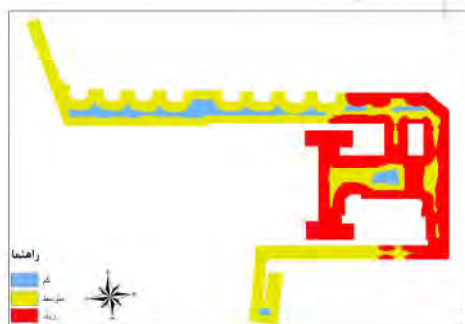
شکل ۱۸. توزیع مکانی دشواری محیطی AM₁ در شرایط بهینه
ایستگاه در سالن ورودی



شکل ۱۹. توزیع مکانی دشواری محیطی AM₁ در سکو

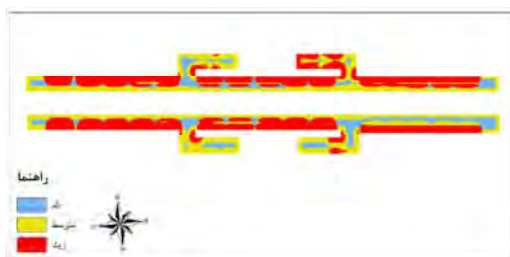


شکل ۲۰. نقشه تراکم نسبی حضور عامل‌ها در ثانیه پنجاهم سناریوی شرایط فعلی



شکل ۲۱. توزیع مکانی دشواری محیطی AM₂ در شرایط فعلی
ایستگاه در سالن ورودی

شکل ۲۲. توزیع مکانی دشواری محیطی AM₂ در شرایط بهینه
ایستگاه در سالن ورودی



شکل ۲۴. توزیع مکانی دشواری محیطی AM₂ در سکو در سناریوی بهینه



شکل ۲۳. توزیع مکانی دشواری محیطی AM₂ در سکو در شرایط فعلی

نتیجه‌گیری

مدیریت جمعیت امری پیچیده است و به‌آسانی نمی‌توان با برگزاری مانورها (به‌دلیل محدودیت‌های موجود) به تمامی زوایای مربوط به رخدادهای احتمالی در حضور جمعیت دست یافت. بررسی روند حرکتی افراد در زمان‌ها، مکان‌ها و شرایط متفاوت می‌تواند موجب شناخت بهتر رفتارها و تعاملات میان افراد و محیط در شرایط عادی و اضطرار شود و نتایج حاصل از آن در تدوین راهکارهای مدیریت جمعیت و تخلیه اضطراری به کار می‌آید. از سویی، به‌دلیل تعاملات موجود میان انسان‌ها و محیط در سیستم‌های اجتماعی و تأثیر این تعاملات در روند حرکتی جمعیت، نیاز به شناخت و بررسی این تعاملات، به‌ویژه در شرایط اضطراری، وجود دارد. در این پژوهش، به‌منظور بررسی رفتار افراد و محیط در هنگام آتش‌سوزی، از نتایج شبیه‌سازی مکانی عامل مبنای روند حرکتی افراد و شبیه‌سازی آتش‌سوزی در ایستگاه قطار شهری هفت تیر و شاخص‌های دشواری حرکت، شامل شاخص‌های محیطی و محیطی-انسانی، برای بررسی تأثیر محیط و عامل‌ها در روند حرکتی استفاده شد و در ادامه کار، دو شاخص دشواری جدید شامل یک شاخص محیطی و یک شاخص محیطی-انسانی با نام‌های AM₁ و AM₂، متناسب با شرایط آتش‌سوزی، معرفی شدند.

بررسی نتایج شاخص‌های محاسبه‌شده و نتایج مربوط به شبیه‌سازی روند حرکتی افراد در محیط ایستگاه رابطه معکوس بین میزان دشواری و سرعت روند حرکتی

با بررسی نتایج مربوط به سناریوهای مذکور، مشاهده می‌شود که در سناریوی تغییر اول محیطی بهینه (تغییر در موقعیت گیت‌های خروج و انتقال آنها به مکانی جلوتر از محل پیشین)، در مرکز سالن ورودی که هنگام تخلیه اضطراری ازدحام بالایی از جمعیت راه به‌دلیل عبور افراد حاضر در آن و نیز ورود افراد حاضر در سکو به خود اختصاص می‌دهد، دشواری کمتری وجود دارد و تردد افراد در آن آسان‌تر از شرایط فعلی و با زمان کمتری صورت می‌گیرد. با بررسی نتایج شاخص AM₂ در سکو برای هر دو سناریو، مشاهده می‌شود که افزایش متغیر تعامل افراد در نقش عامل افزایشدهنده مقدار دشواری عمل می‌کند.

شاخص‌های AM₁ و L₂ شاخص‌های صرفاً محیطی‌اند و در بررسی آثار درجه ۱ و ۲ فرایند مکانی، از آثار درجه اول محسوب می‌شوند؛ یعنی متغیربودن میزان این شاخص‌ها، نبود یکنواختی در محیط و وجودداشتن احتمال برابر برای حضور هر عامل در محیط را نشان می‌دهد.

شاخص AM₂ شاخصی تلفیقی است که هم شرایط محیطی و هم شرایط انسانی را در نظر می‌گیرد. با واردشدن پارامتر انسانی، تراکم افراد براساس شعاع منطقه اجتماعی وجود تعامل بین افراد را در حل مسئله و محاسبه شاخص دشواری دخیل می‌کند. لایه نماینده تعامل افراد ممکن است آثار درجه دوم فرایند مکانی تخلیه را براساس تعامل میان افراد نمایش دهد.

نقشه‌برداری کشور.

مایار، م.، حیدری‌نژاد، ق.، پاسدار شهری، ه.، زرگر طالبی، ح.، ۱۳۹۲، شبیه‌سازی رفتار حریق در آتش‌سوزی تونل‌های جاده‌ای و بررسی پارامترهای مهم روی سرعت تهویه بحرانی، پانزدهمین کنفرانس دینامیک شارها (سیالات)، انجمن فیزیک ایران.

Banks, J., 1998. **Handbook of Simulation**, Wiley Online Library.

Basak, B. & Gupta, S., 2017, **Developing an Agent-Based Model for Pilgrim Evacuation Using Visual Intelligence: A Case Study of Ratha Yatra at Puri**, Computers, Environment and Urban Systems, 64, PP. 118-131.

Busogi, M., Shin, D., Ryu, H., Oh, Y.G. & Kim, N., 2017, **Weighted Affordance-Based Agent Modeling and Simulation in Emergency Evacuation**, Safety Science, 96, PP. 209-227.

Chandra, S. & Bharti, A.K., 2013, **Speed Distribution Curves for Pedestrians During Walking and Crossing**, Procedia-Social and Behavioral Sciences, 104, PP. 660-667.

Conte, R., Hegselmann, R. & Terna, P., 1997, **Simulating Social Phenomena**, Lecture notes in Economics and Mathematical Systems.

Crooks, A., Castle, C. & Batty, M., 2008, **Key Challenges in Agent-Based Modelling for Geo-Spatial Simulation**, Computers, Environment and Urban Systems, 32, PP. 417-430.

Daamen, W., 2004, **Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities**, DUP Science Delft, the Netherlands.

De Smith, M.J., Goodchild, M.F. & Longley, P., 2007, **Geospatial Analysis: a Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools**, Troubador Publishing Ltd.

عامل‌ها در محیط ایستگاه را بیان می‌کند. بهره‌گیری از شبیه‌سازی‌های عامل مبنا و محاسبه شاخص‌های دشواری در بازه‌های زمانی متفاوت وقوع بحران ممکن است در تدوین راهکارهای مدیریت جمعیت و تخلیه اضطراری مؤثر باشد. باید گفته شود که می‌توان از این بررسی‌ها در بهینه‌سازی محیط ساختمان‌های بزرگ و پرجمعیت و همچنین مکان‌های دارای جاذبه بالای جمعیت، مانند مکان‌های مقدس، پیش از اجرای سازه آنها، بهره برد. در مسیر مدلسازی و شبیه‌سازی‌های لازم در پژوهش، این محدودیت‌ها وجود دارند:

۱. کمبود مطالعات پایه مناسب در رابطه با ویژگی‌های رفتاری و حرکتی افراد در کشور (پارامترهایی همچون سرعت حرکت افراد در مکان‌های گوناگون، ابعاد بدن آنها و ...)

۲. کمبود مطالعات پایه مناسب در رابطه با رفتار و واکنش افراد در شرایط اضطراری؛

۳. امکان نداشتن پیاده‌سازی سناریوها در دنیای واقعی و بررسی و مقایسه نتایج برای ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده؛ زیرا شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته برای شرایط اضطرار و آتش‌سوزی است.

با توجه به مطالب مطرح‌شده، صورت‌دادن پژوهش‌هایی در زمینه مطالعات پایه ویژگی‌های رفتاری و حرکتی افراد در شرایط عادی و اضطراری در کشور ضروری به نظر می‌رسد. همچنین درمورد روش‌های ارزیابی نتایج شبیه‌سازی‌های عامل مبنا، می‌توان در پژوهش‌های آتی، مطالعات مناسبی را صورت داد.

۴- منابع

تسهیلات پیاده‌روی (جلد ۱) مبانی فنی، نشریه ۱-۱۴۴، سازمان برنامه و بودجه، سال ۱۳۷۵.

حاجی‌بابایی، ل.، دلاور، م.، ملک، م.، فرانک، ا.، ۱۳۸۶، شبیه‌سازی عامل مبنا در سیستم‌های اطلاعات مکانی (مطالعه موردی: راهیابی در محیط بیمارستان)، همایش ژئوماتیک ۸۶، سازمان

- Fishwick, P.A., 1995, **Simulation Model Design and Execution: buiLDing Digital Worlds**, Prentice Hall PTR.
- Fruin, J.J., 1971, **Pedestrian Planning and Design**, University of Michigan.
- Getchell, A., 2008, **Agent-Based Modeling**, Physics, 22, PP. 757-767.
- Gilbert, N., 2008, **Agent-Based Models**, Sage.
- Helbing, D., Farkas, I. & Vicsek, T., 2000, **Simulating Dynamical Features of Escape Panic**, Nature, 407, PP. 487-490.
- Helbing, D. & Johansson, A., 2009, **Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics**, Springer.
- Helbing, D. & Molnar, P., 1995, **Social Force Model for Pedestrian Dynamics**, Physical Review E, 51, P. 4282.
- Henein, C.M. & White, T., 2005, **Agent-Based Modelling of Forces in Crowds**, Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation, PP. 173-184.
- Heppenstall, A.J., Crooks, A.T., See, L.M. & Batty, M., 2012, **Agent-Based Models of Geographical Systems**, Springer.
- Hoogendoorn, S.P. & Bovy, P.H., 2005, **Pedestrian Travel Behavior Modeling, Networks and Spatial Economics**, 5, PP. 193-216.
- Korhonen, T. & Hostikka, S., 2010, **Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+ Evac**, Technical Reference and User's Guide, VTT Technical Research Centre of Finland.
- Ligmann-Zielinska, A. & Jankowski, P., 2010, **Exploring Normative Scenarios of Land Use Development Decisions with an Agent-Based Simulation Laboratory**, Computers, Environment and Urban Systems, 34, PP. 409-423.
- Macal, C.M. & North, M.J., 2007, **Tutorial on Agent-Based Modeling and Simulation**, Proceedings of the 37th conference on Winter simulation, Winter Simulation Conference.
- Malleson, N., Heppenstall, A. & See, L., 2010, **Crime Reduction through Simulation: An Agent-Based Model of Burglary**, Computers, Environment and Urban Systems, 34, PP. 236-250.
- O'Sullivan, D. & Unwin, D., 2010, **Geographic Information Analysis**, Wiley Online Library.
- Song, Y., Gong, J., Li, Y., Cui, T., Fang, L. & Cao, W., 2013, **Crowd Evacuation Simulation for Bioterrorism in Micro-Spatial Environments Based on Virtual Geographic Environments**, Safety Science, 53, PP.105-113.
- Zhou, M., Dong, H., Wang, F.-Y., Wang, Q. & Yang, X., 2016, **Modeling and Simulation of Pedestrian Dynamical Behavior Based on a Fuzzy Logic Approach**, Information Sciences, 360, PP. 112-130.