نشریه‌ی علمی-پژوهشی شهر ایمن
JOURNAL OF RESILIENT CITY
(JRC)

ارزیابی مدل‌های تخلیه‌ی جمعیت ساختمان‌ها در شرایط اضطراری و مقایسه‌ی پدیده‌ی ازدحام در مدل‌های دینامیک سیالات و عامل محور

اسماعیل ضرغامی[1*]؛مهدی ریسمانیان[2]؛

۱- دکترای معماری
۲- دانشجوی دکترای معماری

واژگان کلیدی

**مدل‌های تخلیه
شرایط اضطراری
تخلیه‌ی جمعیت
رفتار جمعیت**

چکیده

برخی از مکان‌ها مانند فرودگاه‌ها، ایستگاه‌های قطار، استادیوم‌های ورزشی و غیره می‌توانند به تشکیل تجمع کمک نمایند. وجود چنین مکان‌هایی دولت‌ها، مدیران، محققان، طراحان و دیگر متخصصان را به شدت به توسعه‌ی فناوری‌هایی برای بهبود امنیت و راحتی آن مکان‌ها و نیز در جهت مدیریت کارآمد در شرایط بحرانی مانند زلزله، آتش سوزی، بمب‌گذاری و عملیات تروریستی علاقه‌مند می‌کند. یکی از این فناوری‌های نسبتا" جدید شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای جمعیت است که بر مبنای مدل‌های مختلفی توسعه یافته‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که مدل‌های تخلیه را می‌توان به طور موثر برای مطالعه‌ی استراتژی‌های جابجایی و مسائل ایمنی مرتبط با ساختمان‌ها استفاده نمود. آشنایی با مدل‌های تخلیه باعث می‌شود مهندسان بتوانند مکان‌های بهتری طراحی نموده و همچنین بهترین راه برای هدایت مردم هنگام انتخاب مسیر تخلیه را پیدا کنند. مناسب بودن مدل‌های خروج از تخلیه ساختمان‌ها با انعطاف‌پذیری آنها در نمایش اجزای خروجی مختلف و فرآیندهای پیچیده رفتاری مورد مطالعه مرتبط است. در پژوهش بنیادی حاضر با استفاده از مطالعه‌ی اسنادی، شش رویکرد اساسی مدلسازی شامل مدل‌های رگرسیون، دینامیک سیالات، قانون‌محور، نیروی اجتماعی، سلول‌های خودکار و عامل‌محور شناسایی گردید و سپس این مدل‌ها بر اساس میزان تمرکز برسطح رفتارهای فردی و اجتماعی افراد به سه مقیاس کل‌نگر، میان‌نگر و خردنگر تقسیم گردید سپس با شبیه‌سازی کامپیوتری، پدیده‌ی ازدحام در سه سطح مذکور و در سه سناریوی مختلف مورد مقایسه قرار گرفت و درنهایت با استفاده از روش تحلیل محتوا، مزایا و معایب این رویکردها مورد بحث و بررسی قرار گرفت. یافته‌های تحقیق حاکی از آن است که در برنامه‌ریزی و مطالعات تخلیه‌ی جمعیت انتخاب مدل مناسب با ویژگی‌های رفتاری مورد مطالعه از اهمیت فراوانی برخوردار است لذا بر اساس سطح رفتاری و اهداف مورد مطالعه، مدل تخلیه‌ی مناسب پیشنهاد گردیده است. استفاده از نتایج این پژوهش می تواند برای انتخاب مدل مناسب تخلیه‌ی جمعیت توسط پژوهشگران، مدیران و برنامه‌ریزان و طراحان معماری و شهرسازی مفید واقع گردد.

۱ – پیش‌گفتار

حوادث غیرمترقبه مانند آتش‌سوزی و دود، خرابی زیرساخت-ها و تاسیسات، پتانسیل مواجهه با مواد خطرناک، ترور و خشونت و خطر بمب‌گذاری (Azizi & Bornafar, 2012) و غیره همواره زندگی انسان‌ها را مورد تهدید قرار داده و می-دهد. بنابراین تخلیه‌ی انسان‌های ساکن در ساختمان‌ها از منطقه‌ی خطر با توجه به همه‌ی محدودیت‌های فیزیکی و زمانی یک موضوع مهم و اساسی می‌باشد. اگر افراد ساکن در ساختمان‌ها به هر دلیلی موفق به خروج از ساختمان در شرایط اضطراری نگردند ممکن است در اثر خطرات مختلف مانند بمب‌گذاری، آتش‌سوزی، وجود گازهای سمی و سایر خطرات دچار آسیب و صدمه شده یا حتی جان خود را از دست بدهند. همچنین رفتارهای برآمده از جمعیت در هنگام خروج که عموما" ناشی از ترس و وحشت (Sheeba & Jayaparvathy, 2019) می‌باشد مانند هل‌دادن، فشاردادن،

پژوهش حاضر مستخرج از پایان نامه‌ی نویسنده‌ی دوم مقاله می باشد.

لگدمال‌کردن و حتی برخی رفتارهای حمایتی نه تنها می‌تواند باعث آسیب‌های جانی به افراد گردد بلکه ممکن است باعث اختلال در روند تخلیه و بروز فاجعه‌های انسانی شود. تا کنون برخی از پدیده‌های رفتاری انسان‌ها و واکنش‌های آنها در شرایط اضطراری تخلیه نسبت به محیط و نسبت به سایر افراد گرفتار در حادثه مورد بررسی و مدلسازی قرار گرفته‌است (Haghani & Sarvi, 2019a; Şahin, Rokne, & Alhajj, 2019; Z.Shahhoseini, M.Sarvi, & M.Saberib, 2018) اما به دلیل فقدان در اطلاعات واقعی و محدودیت‌های تکنولوژیکی همه‌ی این مدل‌ها از نواقصی نیز برخوردار می‌باشند. نرم افزارهای شبیه‌سازی تخلیه در سال-های اخیر مانند *Simulex Step, Viswalk, Pathfinder, MassMotion, Paramics, FDS, PedGo,Exodus* و غیره می‌توانند روند و مراحل مختلف حرکت و رفتار جمعیت را در ساختمان‌های گوناگون بررسی کرده و نتایج تخلیه را پیش‌بینی نمایند. لذا این نرم افزارها وسایل و ابزارهای مهمی برای تجزیه و تحلیل تخلیه‌ی جمعیت در ساختمان‌ها چه در هنگام طراحی ساختمان و چه در هنگام بهره‌برداری برای مدیریت ریسک محسوب می‌گردند (Zheng Xiaoping, Zhong Tingkuan, 2009) اگرچه با توجه به پیشرفت‌های قابل توجه و مطالعات فراوان در طی دو دهه‌ی گذشته، این مطالعات فاقد بسیاری از جنبه‌های کلیدی می باشند.(B.Yogameena & C.Nagananthini, 2017)

نرم افزارهای شبیه‌سازی حرکت جمعیت همچنین می‌توانند برای آموزش و کنترل جمعیت در نیروهای نظامی و انتظامی (Sung, M., Gleicher, M. and Chenney, 2004; Ulicny, B. and Thalmann, 2001)، آماده‌سازی آموزش و تمرین تخلیه در شرایط اضطراری(De Silva, F. N. and Eglese, 2000; Farahmand, 1997; Mitchell, S. W. and Radwan, 2006; Musse, S. R. and Thalmann, 2001; Pidd, M., de Silva, F. N. and Eglese, 1996) ، آرامش و امنیت در فضاهای عمومی و طراحی فضاهای معماری با خطر ریسک بالا(Farenc, N., Musse, S., Schweiss, E., Kallmann, M., Aune, O., Boulic & Thalmann, 2000; Musse, S. R., Jung, C. R., Jacques Jr., J. C. S. and Braun, 2007; Schreckenberg, M. and Sharma, 2001) مورد استفاده قرار گیرند.

با توجه به تنوع در مدل‌های مختلف تخلیه‌ی جمعیت تحقیقات مختلفی در خصوص تقسیم‌بندی این مدل‌ها صورت پذیرفته است. گین و همکاران (GwynneS, GaleaER, OwenM, LawrencePJ, 1999) بیست و دو مدل مختلف تخلیه را شناسایی و تقسیم‌بندی نمودند. النیک و کارپنتر (OlenickSM, 2003) چهار مدل مختلف خروج را در تحقیقات خود مشاهده نمودند. کولیگاوسکی (KuligowskiED., 2004) بیست و هشت مدل مختلف تخلیه‌ی خروج را بر اساس سطوح مختلف ترکیبی رفتار ساکنان تقسیم‌بندی نموده است. سانتوس و آگویر (SantosG, 2004) نیز در مقاله‌ی خود چهار مدل مختلف شبیه‌سازی تخلیه جمعیت در شرایط اضطراری را تشخیص دادند. همه‌ی مطالعات انجام شده و تقسیم بندی‌های صورت گرفته بر اساس مشخصه‌های ذاتی این مدل‌ها می‌باشد و نه بر مبنای خصوصیات کاربردی آنها. از سوی دیگر کاربران این مدل‌ها بر اساس اهداف شبیه‌سازی، نوع مطالعه، میزان دقت لازم، ابعاد فضای شبیه‌سازی و پیچیدگی‌های رفتاری با سردرگمی در انتخاب مدل مناسب مواجه می‌باشند. لذا هدف اصلی پژوهش حاضر تقسیم‌بندی و یافتن ارتباط بین انواع مدل‌های موجود تخلیه‌ی جمعیت و نیازهای محقق یا مدل‌ساز بوده و این پژوهش در پی پاسخگویی به سوال‌های اصلی زیر می‌باشد:

الف – مدل‌های مختلف جمعیت چه میزان و چگونه بر پیش-بینی زمان تخلیه جمعیت تاثیر می‌گذارند؟

ب – مدل‌های مختلف جمعیت دارای چه ویژگی‌های اصلی می‌باشند و هر کدام در تعامل با چه سطحی از ویژگی‌های رفتاری جمعیت مورد مطالعه هستند؟

ج – معیارهای انتخاب یک مدل مناسب تخلیه‌ی جمعیت با توجه به ویژگی‌های رفتاری موضوع مورد مطالعه چیست؟

به منظور دستیابی به پاسخ سوالات فوق، ابتدا در بخش مبانی نظری با مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای مدل‌های تخلیه‌ی جمعیت موجود از حیث مشخصات ذاتی آنها ارائه خواهد شد سپس در بخش سوم پژوهش جهت دستیابی به پاسخ سوال "الف"، پدیده‌ی ازدحام در دو مدل متفاوت شبیه‌سازی می گردد و در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده از شبیه سازی‌ها و نیز مطالعات گذشته با استفاده از روش تحلیل

محتوا به بحث و بررسی جهت یافتن پاسخ سوال‌های دوم و سوم پرداخته خواهد شد.

۲ – مبانی نظری؛ مدل‌های شبیه‌سازی حرکت و تخلیه‌ی جمعیت

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان گفت نرم‌افزارهای شبیه-سازی تخلیه‌ی جمعیت برای مطالعه‌ی موارد چهارگانه‌ی زیر بکار می‌روند:

الف – مطالعات حرکت: در این مطالعات جریان و زمان حرکت افراد بدون در نظر گرفتن رفتارهای آن‌ها شبیه‌سازی می-گردد.(Xiao et al., 2019)

ب – مطالعات بهینه‌سازی زمان تخلیه: در این مطالعات عموما" تاثیر عوامل محیطی بر زمان تخلیه مورد بررسی قرار می‌گیرد و برخی مشخصه‌های فردی موثر مانند سن (Chen, Tang, Song, Huang, & Guo, 2019) و جنس نیز می-توانند توسط کاربر تنظیم گردند.

ج - مطالعات رفتارهای جزئی: در این گونه مطالعات برخی عوامل موثر بر رفتار جمعیت مانند آتش‌سوزی و واکنش‌های حرکتی جمعیت در مقابل آن عوامل مورد بررسی قرار می-گیرند.

د – مطالعات رفتاری پیچیده با قابلیت ارزیابی ریسک: در این‌گونه مطالعات افراد جمعیت به مثابه‌ی انسان هوشمند می‌توانند با تغییر شرایط تصمیم‌های جدید اتخاذ نمایند، آنها از محیط اطراف خود آگاهی نسبی داشته و می‌توانند با توجه به شرایط متفاوت رفتارهای گوناگون از خود بروز دهند.

پژوهش حاضر متفاوت از سایر تقسیم‌بندی‌ها در مطالعات قبلی بر اساس میزان تمرکز مدل‌ها برسطح رفتارهای فردی و اجتماعی، آنها را به سه گروه کلی مدل‌های کل‌نگر ، میان‌نگر و خردنگر تقسیم می‌نماید و سپس با تکیه بر شیوه‌های گوناگون بررسی شبیه‌سازی حرکت و رفتارهای انسانی، شش مدل کلی شامل مدل‌های رگرسیون و دینامیک سیالات در سطح کل‌نگر و مدل‌های نیروهای اجتماعی، قانون محور، سلول های خودکار در سطح میان‌نگر و مدل عامل‌محور را در سطح خردنگر شناسایی نموده است.

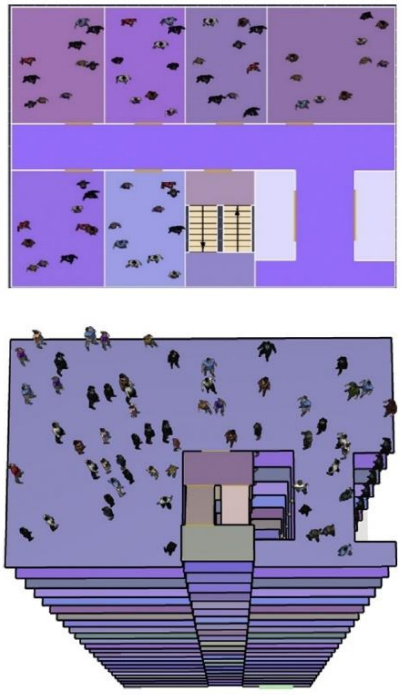
مدل‌های سطح خردنگر بر روی سطح فردی رفتار و حرکت تمرکز می‌کنند و به رفتار، اعمال و تصمیم گیری افراد درون جمعیت و تعاملات آنها با دیگران مربوط می‌شوند (Seyfried, A., Steffen, B., Klingsch, W. and Boltes, 2005). مدل‌های سطح میان‌نگر به برخی رفتارهای جزئی پرداخته و مدل‌های سطح کلی‌نگر بر تمامیت مدل سیستم تمرکز می‌کنند و رفتارهای قابل مشاهده مشترک که از جمع ظهور می‌کنند، نظیر رفتار کلی جمعیت، را مورد بررسی و مداقه قرار می‌دهند.

۲-۱- سطح خردنگر

در سطح مدل‌های خردنگر می‌توان مدل‌های عامل محور را قرار داد. مدل‌های عامل محور که در آنها یک سیستم شامل مجموعه‌ای از عناصر مستقل، هوشمند و تصمیم ساز(Haghani & Sarvi, 2019b) می‌باشد، پیچیده‌ترین و واقع‌گرایانه‌ترین ابزار شبیه‌سازی جمعیت محسوب می‌شوند و به همین دلیل می‌توان این گونه مدل‌ها را برای شبیه‌سازی موقعیت‌هایی که شامل عوامل و عناصر پویا و ناهمگن هستند، مورد استفاده قرار داد (Cimellaro, Mahin, & Domaneschi, 2019) (Wong, K. H. L. and Luo, 2005) (Bandini, S. and Manzoni, 2006).

در مدل‌های عامل‌محور که به اختصار به *ABM (Agent Based Models)* شهرت دارند نه تنها ویژگی‌های فردی افراد مانند جنسیت ، سن، اندازه‌ی بدن و سرعت حرکت آنها قابل تنظیم می‌باشد بلکه افراد دارای عملکردهای ادراکی و شناختی بوده و قادر به هماهنگ نمودن رفتار خود با شرایط محیطی می‌باشند (Paris, S., Donikian, S. and Pelechano, N. Addler, J. M. and Bonvalet, 2006) (Durupinar, F., Allbeck, J., Badler, 2007) (Pelechano, N. and Badler, 2008). در این مدل‌ها عوامل هوشمند و مستقل بر اساس مجموعه‌های مختلف قوانین شبیه‌سازی قادر به درک و ارزیابی محیط خود، ایجاد اهداف جدید، تصمیم‌گیری مستقل و معقولانه و رفتارهای واقع‌گرایانه مانند اجتناب از موانع و انتخاب مستقیم‌ترین مسیر می‌باشند (Feng, L. and Liang, 2003; Treuille, A., Cooper, S. and Popovic, 2006). مدلهای مبتنی بر عامل همچنین نشان می‌دهند هنگامی که چگالی جمعیت افزایش می‌یابد،

تعاملات بین افراد نیز بیشتر شده و در نتیجه سرعت حرکت افراد کاهش می‌یابد. **شکل شماره ی ۱** یک نمونه از شبیه سازی با مدل‌های عامل‌محور برای بررسی مشکل استراتژی-های تخلیه در ساختمان‌های بلندمرتبه را نمایش می‌دهد (Yuanchun Ding , Lizhong Yang, Falu Wenga, Zhijian Fu, 2015).



شکل ۱. شبیه‌سازی یک ساختمان بلندمرتبه بر مبنای مدل عامل‌محور

بنایو (Bonabeau, 2002) معتقد است که مدل سازی عامل-محور در شرایط زیر می‌تواند بسیار سودمند باشد:

- جمعیت‌های ناهمگن، یعنی زمانی که افراد درون جمعیت دارای ویژگی‌های فیزیکی و روانشناختی متفاوتی هستند.
- رفتارهای پیچیده‌ی انسان مانند یادگیری یا انطباق
- پیچیدگی غیر خطی تعاملات بین افراد، مانند هنگامی که رفتار یک فرد بر اعمال فرد یا افراد دیگر تاثیر می‌گذارد.

۲-۲ – مدل های سطح میان‌نگر

در سطح میان‌نگر سه گونه‌ی مختلف از مدل‌ها شامل نیروهای اجتماعی، قانون‌محور و سلول‌های خودکار قابل مشاهده و تقسیم‌بندی می‌باشند که ذیلا" به شرح خصوصیات و ویژگی-های آنها خواهیم پرداخت.

۱-۲-۲ – مدل نیروهای اجتماعی

مدل نیروهای اجتماعی که معمولا در شبیه‌سازی‌های وحشت استفاده می‌شود در ۱۹۹۵ توسط هلبینگ و همکارانش پیشنهاد گردید (HelbingD, 1995). این مدل رفتار تجمع وحشت‌زده را با استفاده از چارچوب چندذره‌ای خودجوش توصیف می‌کند، که در آن هر ذره خودجوش دارای یک هدف است و برای رسیدن به آن هدف تلاش می‌نماید (Helbing, D. Farkas, I. and Vicsek, 2000). به عبارتی افراد پیاده به مثابه‌ی توده‌ای فیزیکی با مشخصات ثابت، تمایل به حرکت در یک مسیر مشخص و با سرعت معین دارند و در همین حال سعی در حفظ فاصله‌ی خود با موانع و سایر افراد را دارند. در مدلی که هلبینگ ارائه نمود حرکت افراد توسط چهار مفهوم زیر مشخص می‌گردد: الف) فرد قصد دارد که به یک مقصد مشخص برسد. ب) فرد یک فاصله‌ی مشخصی را با سایر افراد حفظ می‌نماید. ج) فرد یک فاصله‌ی مشخصی را از اشیا و موانع حفظ می‌نماید. د) گاهی اوقات ممکن است فرد توسط سایر افراد جمعیت (مانند دوستان و آشنایان) یا اشیا جذب گردد. در این مدل مجموع نیروهای وارد بر فرد α در زمان t توسط فرمول $F_{\alpha}(t) = F_{\alpha 0} + \sum F_{\alpha \beta} + \sum F_{\alpha B} + \sum F_{\alpha i}$ حاصل می-گردد که در آن $F_{\alpha 0}$ نیرو و اراده موجود در فرد برای رسیدن به مقصد، $\sum F_{\alpha \beta}$ مجموع نیروهای وارده از طرف سایر افراد جمعیت، $\sum F_{\alpha B}$ مجموع نیروهای وارده به فرد از طرف اشیا و موانع اطراف و $\sum F_{\alpha i}$ مجموع نیروهای جذب کننده از محیط در لحظه‌ی t می‌باشند.

همانطورکه از فرمول ارائه شده توسط هلبینگ مشخص است حرکت هر عضو جمعیت مستنتج از نیروهای اجتماعی و شخصی و فیزیکی است که افراد را جذب یا دفع می‌کند . نیروهای اجتماعی تمایل افراد برای برخورد با افراد دیگر یا

موانع و همچنین حرکت در یک جهت و سرعت خاص را منعکس می‌نماید. هلبینگ معتقد است که نیروهای فیزیکی وارده از اجتماع مانند هل دادن و فشار دادن ، رفتارهای جمعیت را در تراکم بالا مانند شرایط تخلیه اضطراری تحت تاثیر قرار داده و افراد مجبور به برخورد با یکدیگر و با محیط اطراف می‌گردند (Helbing, D., Farkas, I. J., Molnár, P. and Vicsek, 2002). هنین و وایت بیان می‌دارند که اثرات نیرو باید یک عنصر اساسی در مدلهای شبیه‌سازی رفتار جمعیت باشند، زیرا نیروها مانند فشار دادن و هل دادن می‌توانند با اثر دومینو تاثیر مستقیمی در نحوه حرکت کل اعضای جمعیت ایفا نمایند و در حالیکه مردم به طور کلی سعی دارند به سوی هدف خاصی حرکت کنند اما تاثیر این نیروها می‌تواند آنها را از مسیرهای مورد نظر خود دور کند یا باعث آسیب‌های جدی به آنها شود (Henein, C. M. and White, 2007) (Henein, C. M. and White, 2005). در این مدل فضای شبیه‌سازی بصورت پیوسته رفتار می‌کند و افراد قادر به حرکت مداوم در یک فضای دو بعدی می‌باشند. این مدل برای مطالعه پدیده‌های رفتاری خودمحور در تجمعات مانند پدیده‌ی گرفتگی، پدیده‌ی صف‌بندی تجمع، پدیده‌ی کمانی و غیره که در آنها نقش فرد کم رنگ می‌باشد، بسیار مفید واقع می‌گردد.

۲-۲-۲- مدل‌های قانون محور

مدل‌های مبتنی بر قانون عموما" به شبیه‌سازی تجمعات انسانی با گله‌های حیوانات پرداخته و از قوانین حاکم برگله‌های حیوانی برای پیش‌بینی رفتار تجمع استفاده می‌نمایند.

یکی از مطرح ترین این مدل‌ها ، مدل *Boids* است که رینولدز مطرح و پیشنهاد نموده‌است. در این مدل از خصوصیات رفتاری گله پرندگان مانند حفظ حداقل فاصله هر پرنده با پرنده‌های کناری در عین حداکثر سرعت به عنوان الگویی برای شبیه‌سازی حرکت جمعیت‌های انسانی استفاده شده است (Reynolds, 1987). مدل اولیه رینولدز از یک الگوریتم شامل چهار عنصر اصلی استفاده می‌نماید:

الف-جداسازی، یعنی حفظ حداقل فاصله بین افراد در محیط

ب- تطبیق، به معنی سازگاری و هماهنگی در جهت و سرعت حرکت فرد در رابطه با سایر افراد تجمع

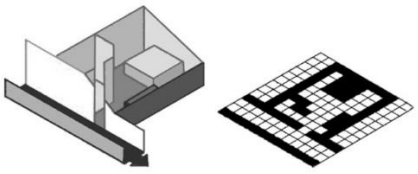
ج- همسازی، به معنی جمع کردن اعضای یک جمعیت منحصر بفرد

د- اجتناب، به معنی جلوگیری از برخورد هر فرد با دیگران

رینولدز در مطالعات بعدی خود (Reynolds, 1999) عناصر دیگری مانند جستجو کردن، تعقیب کردن و فرار کردن را به الگوریتم خود اضافه نموده است.

۳-۲-۲- مدل سلول‌های خودکار

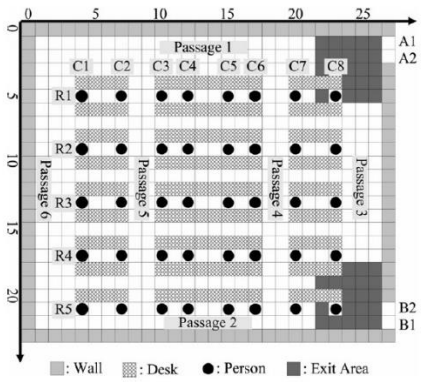
مدل سلول‌های خودکار یا مدلهای مبتنی بر ماتریس ، محیط را بصورت گسسته تلقی نموده و فضا را به شبکه‌ای یکسان از سلول‌های گسسته تقسیم می‌کند (Weifeng, Y. and Kang Hai, 2007; Yamamoto, K., Kokubo, S. and Nishinari, 2007; Zhao, D. L., Yang, L. Z. and Li, 2006; Zhou, Zhou, & Cai, 2019) که در آن هر فرد یک سلول یا موقعیت خاص را در شبکه اشغال می‌کند و از یک سلول به سلول دیگر بر اساس مجموعه‌ای از قوانین حرکت می‌کند. به این ترتیب هر فرد تنها می‌تواند در صورتی که سلول همسایه‌ی آن خالی باشد به آن منتقل گردد. بدیهی است که این مدل در یک سری گام‌های گسسته‌ی زمانی رشد می‌کند و متغیرها در هر سلول به طور همزمان و بر اساس مجموعه‌ای از قوانین محلی به روز می‌شوند (**شکل شماره ۲**).



شکل ۲. فضای سه بعدی و شبکه‌ی سلولی متناظر با آن. دیوارها و موانع ثابت با رنگ مشکی و فضاهایی که می تواند توسط ساکنین اشغال گردد با رنگ سفید مشخص شده‌اند.

این مدل برای اولین بار توسط *Von Neumann* مطرح گردید و در حال حاضر برای مطالعه سیستم‌های بزرگ و متنوع مانند مدل‌های ترافیکی و برخی تحقیقات بیولوژیکی و

همچنین برای حرکت جمعیت در هنگام تخلیه استفاده می-شود. مدل سلول‌های خودکار اخیرا" توسعه‌ی بیشتری برای مطالعه جمعیت پیدا کرده‌اند، به گونه‌ای که می‌توان آنها را در دو دسته اصلی تقسیم نمود. دسته اول به مطالعه‌ی تعاملات بین محیط و انسان (ZhaoDL, YangLZ, 2006) و دسته دوم به تعاملات بین افراد جمعیت می‌پردازند (KirchnerA, KlupfelH, NishinariK, SchadschneiderA, 2003). در **تصویر شماره ۳** یک مدل سلول‌های خودکار برای شبیه-سازی یک آزمایش تخلیه در کلاس درس همراه با موانع ثابت (میزها و دیوارها) جهت مطالعه‌ی تراکم در خروجی‌های کلاس توسط لیو شابو و همکاران استفاده گردیده است (Liu Shaobo, Yang Lizhong , Fang Tingyong, 2009).



شکل ۳. شبیه‌سازی یک کلاس درس مبتنی بر مدل سلول-های خودکار

۳-۲-مدل‌های سطح کلی‌نگر

در سطح کلی‌نگر دو گونه‌ی کلی از مدلها شامل رگرسیون و دینامیک سیالات مورد کاربرد قرار دارند که اختصارا به شرح خصوصیات آنها پرداخته خواهد شد.

۱-۳-۲- مدل‌های رگرسیون

این مدل‌ها می‌توانند جریان حرکت افراد پیاده را در شرایط خاص و وابسته به زیر ساخت‌های محیطی (به عنوان مثال پله‌ها) با استفاده از روابط آماری موجود بین متغیرهای جریان ، پیش‌بینی نمایند. برای نمونه میلاز و همکارانش با این روش به بررسی تاثیر افراد پیاده بر ظرفیت چهارراه‌ها و تقاطع‌ها پرداختند. آنها همچنین بر اساس همین مدل به پیش‌بینی توزیع جریان عابر پیاده در شبکه‌های معابر جهت بهینه‌سازی مسیر تخلیه پرداختند (Milazzo, J. S., Rouphail, N. M., Hummer, J. E. and Allen, 1998).

۲-۳-۲- مدل‌های دینامیک سیالات

مدل‌های دینامیک سیالات بر اساس این ایده است که حرکت جمعیت می‌تواند به جریان سیال (مایع یا گاز) تشبیه شود (Rose Challenger, 2009). با توجه به اینکه مسیرهای افراد درون یک گروه از نظر کیفی شبیه به جریان مایعی است که با مولکول‌هایی نسبتا" مستقل از یکدیگر در حرکت می-باشند، می‌توان از قوانین دینامیک سیالات در شبیه‌سازی حرکت جمعیت استفاده نمود و حرکت مردم به مثابه‌ی حرکت مایع در طبیعت توصیف می‌گردد.

هیوز (Hughes, 2002, 2003) جریان جمعیت را به مایعی تشبیه می‌کند که علاوه بر خصوصیات مایع ، اعضای آن توانایی تفکر منطقی و رفتارهای هدفمند را دارا می‌باشند. مدل‌های دینامیک سیالات تغییرات سرعت و تراکم را در طول زمان با استفاده از معادلات فیزیک جزئی نمایش می‌دهند. هیوز مدل دینامیک سیالاتی خود را بر مبنای سه فرضیه‌ی اساسی زیر در خصوص رفتارهای جمعیتی مطرح می‌نماید:

الف- سرعت افراد متحرک، توسط محیطی که درآن حرکت می‌کنند، چگالی افراد اطراف و ویژگی‌های رفتاری افراد تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

ب- افراد دارای یک مفهوم مشترکی هستند که با آن برای رسیدن به یک مقصد مشترک تلاش می‌کنند و می‌توان آن را "پتانسیل" نامید. این موضوع باعث می‌گردد که هردو نفر با پتانسیل یکسان اما در مکان‌های مختلف هیچ مزیتی برای تبادل مکان‌های خود نداشته باشند.

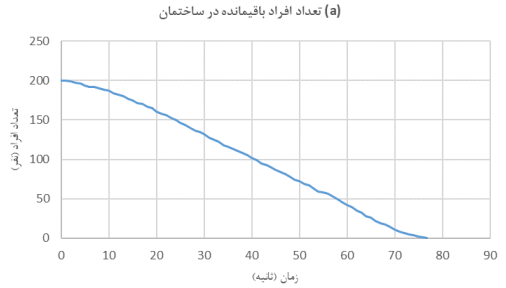
ج- افراد در حالیکه برای جلوگیری از تراکم جمعیت شدید تلاش می‌کنند، سعی در به حداقل رساندن زمان سفر خود به سمت یک هدف خاص را دارند.

۳ - بررسی پدیده‌ی ازدحام در دو مدل عامل-محور و مدل دینامیکی سیالات

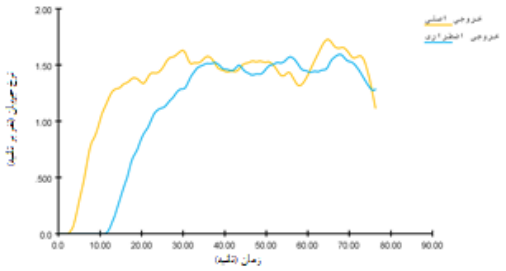
به منظور دستیابی به پاسخ سوال اول پژوهش یعنی چگونگی تاثیر انتخاب مدل تخلیه بر نتایج پیش بینی‌ها و ارتباط این موضوع با سطوح رفتاری مورد مطالعه در این پژوهش پدیده‌ی ازدحام در دو مدل عامل محور و مدل دینامیک سیالات مورد بررسی قرار خواهد گرفت. پدیده ازدحام در شرایط تخلیه هنگامی حادث می‌گردد که در یک خروجی یا بخشی از مسیر خروج گرفتگی اتفاق افتاده یا جریان تخلیه به کندی صورت گیرد در چنین شرایطی تراکم و نیز زمان تخلیه افزایش یافته و ممکن است باعث آسیب‌های جدی به افراد گردد. بررسی این پدیده از آن جهت اهمیت دارد که از یک سو به شدت با سطح رفتاری مورد مطالعه در تعامل می باشد و از سوی دیگر وجود و یا عدم وجود ازدحام و نیز میزان ازدحام نتایج تخلیه را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.

جهت مقایسه پدیده ازدحام در دو مدل عامل محور و مدل دینامیکی سیالات، فضایی مربع شکل به ابعاد بیست متر در بیست متر با یک خروجی اصلی در قسمت شرقی بنا و یک خروجی اضطراری در قسمت جنوب غربی بنا که توسط یک راهرو به فضای آزاد خارج از ساختمان منتهی می‌گردد در نظر گرفته شد و در این فضا تعداد دویست نفر به صورت تصادفی قرار گرفتند که در هنگام بروز حادثه و تخلیه با سرعت ۱/۱۹ متر بر ثانیه حرکت می‌کنند. در سناریوی شماره یک مطابق با مدل‌های دینامیکی سیالات افراد به مثابه‌ی ذرات یک سیال و به دلیل اختلاف فشار درون و بیرون از درهای اصلی و اضطراری خارج می‌گردند که مطابق شکل ۴ الف مدت ۷۶/۵ ثانیه زمان تخلیه‌ی کامل ساختمان می‌باشد. نرخ جریان در خروجی‌های اصلی و اضطراری در شکل ۴ب مشخص گردیده است که علت تاخیر در لحظات اولیه‌ی تخلیه در خروجی اضطراری به دلیل طی نمودن راهروی جانبی خروج می‌باشد. بررسی وضعیت ازدحام در خروجی‌ها نشان داد که از ثانیه‌ی پنجم الی ثانیه‌ی ۶۶ تخلیه مناطقی با تراکم جمعیتی بالاتر از ۲/۵ نفر در متر مربع پدیدار می‌گردد. شکل ۴ج وضعیت تراکم در ثانیه‌ی ۷۰ از شروع تخلیه را نشان می‌دهد.

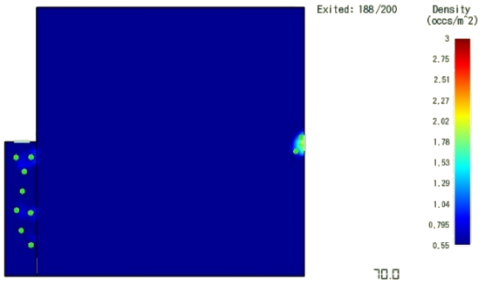
الف)



ب)



ج)

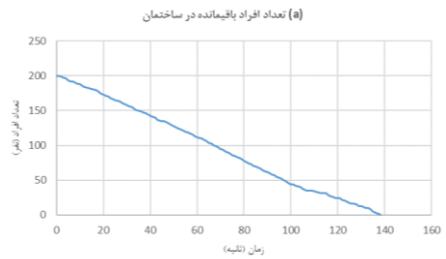


شکل ۴. نتایج سناریوی اول، الف) تعداد افراد باقیمانده در ساختمان. ب) نرخ جریان در خروجی‌ها. ج) وضعیت ازدحام در ثانیه‌ی ۷۰ از شروع تخلیه

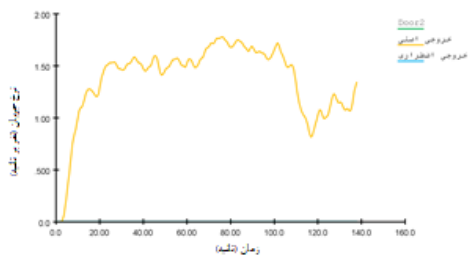
در سناریوی شماره‌ی دو که منطبق با مدل‌های عامل‌محور طراحی گردیده است فضایی با مشخصات مدل قبلی و همان تعداد افراد ساکن در فضا در نظر گرفته شده است با این تفاوت که افراد با مسیر خروجی اضطراری آشنایی نداشته و همه‌ی این افراد صرفا" از خروجی اصلی خارج می‌شوند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که زمان تخلیه‌ی کامل ۱۳۸/۳ ثانیه می‌باشد **(شکل ۵ الف)**. مطابق شکل ۵ب نرخ جریان در خروجی اصلی تفاوت معنی‌داری با سناریوی شماره‌ی یک نداشته اما بنا بر

فرضیات سناریو نرخ جریان در خروجی اضطراری صفر می-باشد. بررسی نقشه‌های تراکمی نشان می‌دهد که از ثانیه‌ی ۴ تا ثانیه‌ی ۱۳۴ در خروجی اصلی ازدحام زیاد با تراکم بالای ۲/۵ نفر در هر مترمربع پدید می‌آید. تصویر شماره‌ی ۵ج تراکم در ثانیه‌ی هفتاد از شروع زمان تخلیه را نشان می‌دهد که از نظر وسعت و محدوده‌ی ازدحام باید با شکل ۴ج مقایسه نمود.

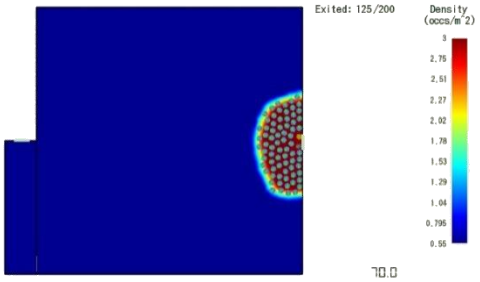
الف)



ب)

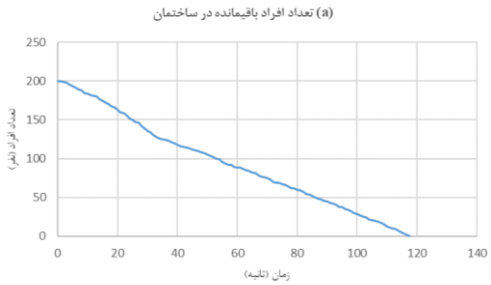


ج)

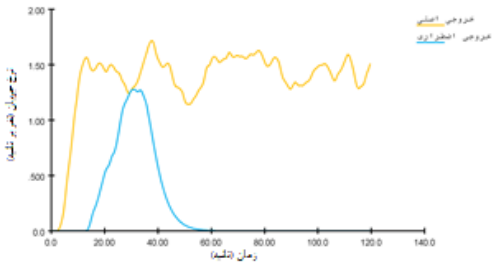


شکل ۵. نتایج سناریوی دوم، الف) تعداد افراد باقیمانده در ساختمان. ب) نرخ جریان در خروجی‌ها. ج) وضعیت ازدحام در ثانیه‌ی ۷۰ از شروع تخلیه

الف)



ب)



ج)

شکل ۶. نتایج سناریوی سوم، الف) تعداد افراد باقیمانده در ساختمان. ب) نرخ جریان در خروجی‌ها. ج) وضعیت ازدحام در ثانیه‌ی ۷۰ از شروع تخلیه

در سناریوی شماره‌ی سه که باز هم مطابق با الگوی مدل‌های عامل محور طراحی گردیده است هشتاد درصد از افراد ساکن در فضا پس از وقوع حادثه و شروع عملیات تخلیه و به علت عدم آشنایی با خروجی اضطراری و یا خصوصیت اخلاقی تمایل به استفاده از مسیرهای آشنا، صرفا" از خروجی اصلی خارج می‌کنند و بیست درصد باقی مانده بر اساس موقعیت قرارگیری خود در فضا تصمیم می‌گیرند که از کدام خروجی استفاده نمایند. بدیهی است که طراحی چنین نقشه‌ی رفتاری جمعیت در مدل‌های کلی‌نگر امکان پذیر نمی‌باشد. در این

سناریو زمان تخلیه‌ی کامل ۱۲۰ ثانیه می‌باشد (شکل ۶ الف). **شکل ۶ب** نشان می‌دهد که خروجی اضطراری تا ثانیه‌ی ۶۰ از شروع عملیات تخلیه دارای نرخ جریان عبوری می‌باشد و پس از آن نرخ جریان صفر می‌گردد. بررسی نقشه‌های تراکمی نیز حاکی از وجود تراکم بالای ۲/۵ نفر در هر متر مربع از ثانیه‌ی ۴ الی ثانیه‌ی ۱۱۳ در خروجی اصلی می‌باشد و این در حالیست که در کل زمان تخلیه، تراکم در خروجی اضطراری همواره کمتر از ۱/۵ نفر در هر مترمربع می‌باشد. شکل ۶ الف نیز ازدحام در ثانیه‌ی هفتاد از این سناریو را نمایش می‌دهد.

۴ - بحث و بررسی:

طبق نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها در سناریوهای سه-گانه‌ی طراحی شده، زمان تخلیه‌ی کامل جمعیت در سناریوی شماره‌ی یک که بر پایه‌ی مدل دینامیک سیالات می‌باشد ۷۶/۵ ثانیه است و ازدحام در جلوی خروجی‌ها نسبت به دو سناریوی دیگر بسیار کمتر می‌باشد. این در حالی است که در سناریوهای دوم که بر اساس مدل عامل محور می‌باشد زمان تخلیه‌ی کامل جمعیت ۱۳۸/۳ ثانیه است و در سناریوی سوم که باز هم بر مبنای مدل عامل محور و وجود عوامل ناهمگن در جمعیت طراحی گردیده است (آشنایی و عدم آشنایی با مسیر خروج اضطراری) این زمان ۱۲۰ ثانیه است. از مقایسه‌ی پدیده‌ی ازدحام و زمان تخلیه در دو مدل عامل محور و مدل دینامیک سیالات می‌توان نتیجه گرفت(جدول۱) که مدل دینامیک سیالات که در سطح مدل‌های کلی نگر قرار دارد قادر به تشخیص خصوصیات فردی افراد جمعیت و پیچیدگی و تنوع در تصمیم‌گیری آنها در شرایط اضطراری و لحاظ کردن برخی پارامترهای اساسی مطالعه‌ی جمعیت مانند آشنایی یا عدم آشنایی با راه های خروج نمی‌باشد این در حالی است که مدل‌های سطح خردنگر از همه‌ی این توانایی‌ها برخوردار می-باشند. لذا می‌توان به این نتیجه‌ی کلی رسید که انتخاب مدل تخلیه‌ی جمعیت بر نتایج شبیه‌سازی تاثیرگذار بوده و لازم است که مدل مناسب تخلیه بر اساس اهداف مطالعه صورت پذیرد.

جدول ۱. زمان تخلیه‌ی کامل در سناریوهای مختلف

	سناریوی شماره ۱	سناریوی شماره ی ۲	سناریوی شماره ی ۳
مدل	دینامیک سیالات	عامل محور	عامل محور
سطح رفتاری	کلی‌نگر	خردنگر	خردنگر
زمان تخلیه (ثانیه)	۷۶,۵	۱۳۸,۳	۱۲۰

بدیهی است که همه مدلهای موجود جهت شبیه‌سازی حرکت جمعیت دارای مزایا و محدودیت‌هایی می‌باشند و شناسایی آن‌ها به همراه آگاهی از عوامل موثر بر دینامیک جمعیت می-تواند به انتخاب مناسب مدل توسط کاربران (طراحان، مدیران، محققان و...) کمک شایانی نماید.

فیلیچانو و مالکاوی (Pelechano, N. and Malkawi, 2008) ضمن مطالعات فراوان خود، مدل‌های قانون محور را که عموما" حرکت جمعیت‌های انسانی را در قیاس با حرکت گله‌های حیوانی قرار می‌دهند، به علت فقدان واقع‌گرایی کافی مورد انتقاد قرار دادند. آنها بیان نمودند که در این مدل‌ها با مشخص نمودن حرکت افراد براساس سرعت، جهت و نزدیکی افراد دیگر، سایر عوامل مهم دیگری که ممکن است بر روی رفتارهای جمعیت تاثیر گذارد نادیده گرفته شده‌اند.

در خصوص مدل‌های نیروی اجتماعی پر واضح است که اثرات نیرو در مدل‌سازی رفتارهای جمعیت بسیار مهم هستند. اگرچه مردم به طور کلی سعی دارند به سوی اهداف حرکت کنند، اثرات نیروهای وارده از طرف جمعیت می‌تواند آنها را از مسیرهای مورد نظر خود دور کند و مدل‌های دقیق باید این را انعکاس دهند. همچنین حضور اعضای آسیب دیده‌ی جمعیت توسط نیروی بیش از حد، می‌تواند بر توانایی دیگران برای حرکت آزادانه تاثیر بگذارد. در یک وضعیت تخلیه، افزایش سرعت حرکت مورد نظر منجر به افزایش نیروها می-شود و این نیروها باعث بوجود آمدن تاخیر بیشتری برای کسانی که سعی دارند از آن خارج شوند می‌گردد. بنابراین

مدلهایی که نیروهای فشار را نشان نمی‌دهند، به طور مستقیم نمی‌توانند تمامی این تاخیرهای اضافی را محاسبه کنند.

اما با وجود مزایای مدل‌های نیروی اجتماعی، این مدل‌ها به دلیل عدم موفقیت در تسلط کامل به محدوده و ظرافت‌های رفتاری فردی مورد انتقاد قرار گرفته‌اند. لاکوبا و همکارانش معتقدند که در مدلهای نیروی اجتماعی، به این علت که حرکت افراد توسط نیروها مشخص می‌گردد تاثیر حیاتی و مهم تصمیم‌گیری‌های فردی نادیده گرفته شده است (Lakoba, T. I., Kaup, D. J. and Finkelstein, 2005). لرنر معتقد است که برخی رفتارهای ساده مانند راه رفتن دو نفری، توقف صحبت کردن با دیگران، تغییر مسیر یک نفر و جابجایی در جهات گوناگون و یا بی هدف و سرگردان بودن، چند نمونه بارز از ضعف‌های شبیه سازی در مدل نیروهای اجتماعی می‌باشند (Lerner, A., Chrysanthou, Y. and Lischinski, 2007).

مهمترین مزیت مدل‌های سلول‌های خودکار را می‌توان مناسب بودن برای شبیه سازی فضاهای بزرگ مقیاس نامید که این موضوع به علت تکنیک منحصر به فرد این مدل‌ها در مدول کردن فضا و تقسیم آن به سلول‌هایی با ابعاد یکسان می‌باشد اما این مدل‌ها نیز به نوبه خود از محدودیت‌هایی برخوردار می‌باشند، برای مثال استیل (Still, 2000) و پلاچانو (Pelechano, N. and Malkawi, 2008) مدل‌های سلول-های خودکار را به دلیل عدم واقع گرایی از جمله محدود کردن رفتار انسان‌ها به حرکت مبتنی بر شبکه، برای اشغال سلول-های گسسته در شبکه مورد انتقاد قرار داده‌اند. علاوه بر این حرکت افراد در یک محیط استاتیک و تنها وابسته به دسترسی به فضا، حرکت واقعی در یک محیط پویا و توانایی افراد را برای تصمیم گیری مستقل، از بین می‌برد.

مدل‌های عامل‌محور اگر چه در طراحی سناریو و طراحی موقعیت و ویژگی‌های فردی صرف زمان زیادی را می‌طلبد اما می‌توان این مدل را واقع‌گرایانه‌ترین مدل موجود برای شبیه-سازی تخلیه جمعیت تلقی نمود. دلایل این برتری می‌تواند پیش بینی دقیق جریان جمعیت و زمان سفر در مسیرهای باریک، شبیه‌سازی جریان‌های متقاطع و ضد جریان در حرکات جمعیت، استفاده دقیق از فضا، تراکم و سرعت به عنوان تابع زمان، ارزیابی‌های واقع گرایانه‌ای از اندازه و شکل صف در نقاط بارگیری، شبیه‌سازی ادغام جریان‌های جمعیتی در طول سناریوهای تخلیه، ضبط پدیده‌ها یا حوادث و اقداماتی که از تعاملات عوامل فردی ناشی می‌شود، از قبیل گرفتگی جمعیت، زمانی که اعضای گروه سعی می‌کنند در جهت مخالف حرکت کنند، انعطاف پذیر بودن یعنی تغییر قوانین اساسی برای آزمایش شرایط مختلف، مانند تغییر رفتار عاملها برای بررسی سناریوهای مختلف تخلیه و نیز ارائه یک توصیف طبیعی از سیستم، یعنی یک نمایش واقعی‌تر از محیط باشند.

در خصوص مدل‌های کلی‌نگر شامل مدل‌های رگرسیون و مدل‌های دینامیکی سیالات هم می‌توان بیان نمود که اگرچه این مدل‌ها از سرعت نسبتا" خوبی در طراحی مدل و نیز در تجزیه و تحلیل آن برخوردار هستند اما هیچ ویژگی فردی مانند توانایی‌های جسمی، جهت حرکت و موقعیت فردی را نمی‌توانند مورد توجه قرار دهند. پان و همکاران معتقدند که تشابه سیال با جمعیت‌های انسانی یک تشابه ضعیف بوده و مردم طبق قوانین فیزیک رفتار نمی‌کنند. این مدل‌ها همچنین نمی‌توانند برای رفتارهای جمعیت مشاهده شده مانند ازدحام، جریان چند جهته و توزیع تراکم نامناسب محاسبات و پیش بینی لازم را انجام دهند. به عنوان مثال، مدل‌های دینامیکی سیالات می‌توانند استفاده همزمان از خروجی‌ها را در حین تخلیه اضطراری پیش بینی کنند (Pan, X., Han, C. S. and Law, 2005). اما در حقیقت پدیده-هایی مانند ازدحام، در این مدلها قابل شناسایی و بررسی نمی-باشند.

در یک نگاه کلی و با توجه به مطالب پیشین می‌توان قابلیت های رفتاری مورد مطالعه توسط شش مدل تخلیه‌ی مذکور را مطابق با جدول۲ تقسیم‌بندی و ارائه گردیده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌گردد مدل‌های دینامیک سیالات و رگرسیون توانایی بررسی پارامترهای کمتری را داشته و مدل عامل‌محور قادر به بررسی سطوح گسترده‌تری از رفتار عوامل حادثه‌دیده نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد هر چند که استفاده از این قابلیت‌ها با صرف زمان و هزینه‌های بیشتر همراه است.

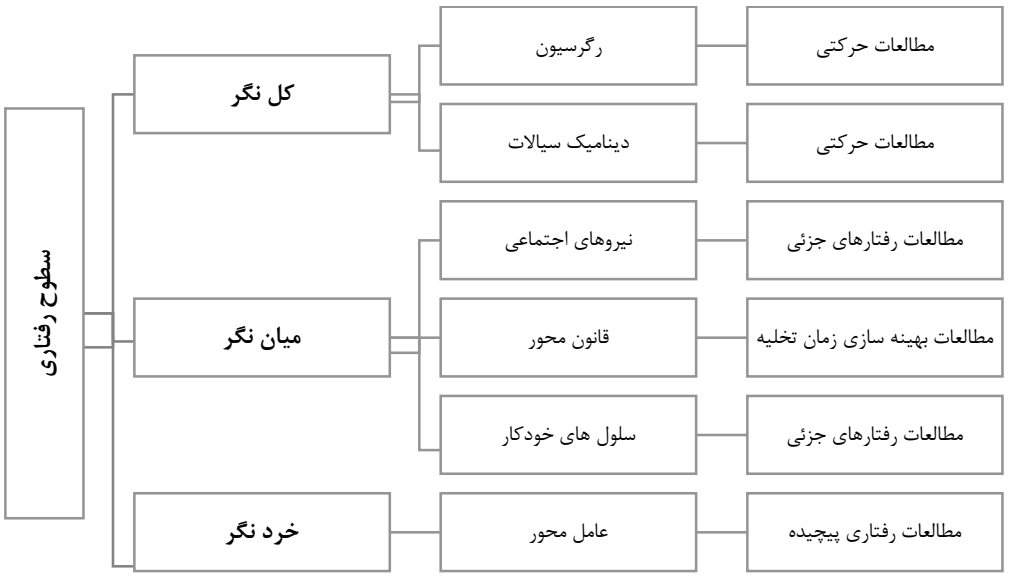
جدول ۲. قابلیت‌های رفتاری مورد مطالعه توسط مدل‌های تخلیه

	بررسی عوامل ناهمگن	مطالعه‌ی عوامل هوشمند	مطالعه‌ی رفتارهای پیچیده	شبیه سازی وحشت	بررسی تعامل محیط و انسان	بررسی تعامل انسان با انسان	مشخصات فیزیکی (جنس، سن و ...)
مدل رگرسیون	--	--	--	--	✓	--	--
مدل دینامیک سیالات	--	--	--	--	✓	--	--
مدل نیروهای اجتماعی	--	--	--	✓	✓	✓	--
مدل قانون‌محور	--	--	--	✓	✓	✓	--
مدل سلول‌های خودکار	--	--	--	✓	✓	✓	--
مدل عامل‌محور	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

با در نظر گرفتن نتایج جدول ۲ و نیز با توجه به اینکه هر یک از مدلهای مشروح قادر به بررسی سطح خاصی از رفتارهای افراد می‌باشند و همچنین بر اساس اهداف مورد مطالعه‌ی کاربران این مدل‌ها، **نمودار ۱** برای انتخاب مدل مناسب شبیه سازی تخلیه ی جمعیت در شرایط اضطراری ارائه و پیشنهاد شده است.

مطابق با نمودار مذکور کاربران، طراحان، محققان و برنامه-ریزان حوزه‌ی تخلیه جمعیت می توانند بر اساس سطح رفتاری مورد مطالعه و اهداف رفتاری آن به انتخاب مدل تخلیه‌ی مناسب اقدام نمایند.

نمودار ۱. سطوح رفتاری و اهداف مورد مطالعه‌ی مدل‌های تخلیه جمعیت



۵ - جمع بندی و نتیجه گیری:

در این پژوهش مساله شبیه سازی جمعیت های انسانی و مدل‌هایی که در نرم افزارهای موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد مورد بحث و بررسی قرار گرفت. از آنجا که تنوع در مدلهای و نرم‌افزارهای موجود تخلیه‌ی جمعیت باعث سردرگمی در انتخاب مدل مناسب کاربران این مدلها می-گردید لذا در این پژوهش سعی گردید که دسته بندی متناسب با نیازها و اهداف کاربران آنها صورت پذیرد. بدین منظور ابتدا تاثیر انتخاب دو مدل مختلف (مدل دینامیک سیالات و مدل عامل محور) بر نتایج تخلیه، بوسیله‌ی شبیه‌سازی کامپیوتری مورد بررسی قرار گرفت. زمان تخلیه‌ی نهایی و کانتور تراکم در زمانهای مختلف بررسی گردید که نتایج به دست آمده حاکی از تفاوت فاحش در زمان کلی تخلیه و ایجاد پدیده‌ی ازدحام در جلوی خروجی یا خروجی‌ها می‌باشد و این خود مبین اهمیت شناخت و درک درست از اهداف مطالعاتی جهت یافتن مدل و نرم افزارهای متناسب با آن می‌باشد. بر اساس مطالعات اسنادی و با استفاده از روش تحلیل محتوا برای اولین بار مدلهای تخلیه‌ی جمعیت براساس میزان تمرکز بر روی رفتارهای فردی و اجتماعی در سه سطح کلی‌نگر، میان‌نگر و خردنگر تقسیم‌بندی گردیدند که مدل‌های دینامیک سیالات و مدل رگرسیون در سطح کلی‌نگر، مدل‌های قانون‌محور، مدل سلولهای خودکار و مدل نیروهای اجتماعی در سطح میان‌نگر و مدل عامل‌محور در سطح خردنگر قرارگرفتند و سپس مزایا و معایب هرکدام از این مدلها مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

از طرفی اهداف استفاده از این مدل‌های شبیه‌سازی در چهار بخش کلی تقسیم بندی گردید که می‌توان با توجه به سطح امکانات و تسهیلات این مدل‌ها جهت مطالعه‌ی حرکت افراد فارغ از جنبه‌ها و ویژگی‌های رفتاری آنها از مدل‌های دینامیک سیالات یا مدل رگرسیون، جهت مطالعات بهینه‌سازی زمان تخلیه و مطالعات رفتارهای جزئی از مدل‌های قانون محور یا مدل سلول‌های خودکار و یا مدل نیروهای اجتماعی که در سطح میان‌نگر قرار دارند استفاد نمود و جهت مطالعات رفتاری با قابلیت ارزیابی ریسک که تنوع، جزئیات و پیچیدگی‌های رفتاری تجمع از اهمیت خاصی برخوردار است از مدل‌های عامل محور که در سطح خردنگر قرار دارند استفاده می‌گردد. نتایج این مطالعه می‌تواند مورد استفاده‌ی محققان، مدیران و برنامه ریزان معماری و شهرسازی و ارگان‌های مرتبط با حوادث غیرمترقبه و پدافند غیرعامل به منظور انتخاب مدل مناسب شبیه سازی جمعیت با توجه به اهداف مورد مطالعه و سطح ویژگی های رفتاری آنها، قرار گیرد.

۶-مراجع

Azizi, M., & Bornafar, M. (2012). Assessing Urban Vulnerability Due to Air Attacks: District 1 of Region 11 of Tehran Municipality. *Passive Defence Sci. & Tech.*, 127–137.

B.Yogameena, & C.Nagananthini. (2017). Computer vision based crowd disaster avoidance system: A survey. *Elsevier International Journal of Disaster Risk Reduction*, *22*, 95–129.

Bandini, S. and Manzoni, S. (2006). Towards affective situated cellular agents. *Cellular Automata, Proceedings*, 686–689.

Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 7280–2787.

Chen, L., Tang, T.-Q., Song, Z., Huang, H.-J., & Guo, R.-Y. (2019). Child behavior during evacuation under non-emergency situations: Experimental and simulation results. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *90*, 31–44. http://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2018.10.007

Cimellaro, G. P., Mahin, S., & Domaneschi, M. (2019). Integrating a Human Behavior Model within an Agent-Based Approach for Blasting Evacuation. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *34*(1), 3–20.

De Silva, F. N. and Eglese, R. W. (2000). Integrating simulation modeling and GIS: Spatial decision support systems for evacuation planning. *Journal of the Operational Support Society*, 423–430.

Durupinar, F., Allbeck, J., Pelechano, N. and Badler, N. (2008). Creating crowd variation with the OCEAN personality model. *Proceedings of the 7th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 1217–1220.

Farahmand, K. (1997). Application of simulation modeling to emergency population evacuation. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*.

Farenc, N., Musse, S., Schweiss, E., Kallmann, M., Aune, O., Boulic, R. and, & Thalmann, D. (2000). A paradigm for controlling virtual humans in urban environment simulations. *Applied Artificial Intelligence*, 69–91.

Feng, L. and Liang, R. (2003). Intelligent crowd simulation. *Computational Science and Its Applications*, 462–471.

GwynneS, GaleaER, OwenM, LawrencePJ, F. (1999). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and Environment*.

Haghani, M., & Sarvi, M. (2019a). Imitative (herd) behaviour in direction decision-making hinders efficiency of crowd evacuation processes. *Safety Science*, *114*, 49–60. http://doi.org/10.1016/J.SSCI.2018.12.026

Haghani, M., & Sarvi, M. (2019b). Simulating dynamics of adaptive exit-choice changing in crowd evacuations: Model implementation and behavioural interpretations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *103*, 56–82. http://doi.org/10.1016/J.TRC.2019.04.009

Helbing, D. Farkas, I. and Vicsek, T. (2000). Simulating dynamic features of escape panic. *Nature*, 487–490.

Helbing, D., Farkas, I. J., Molnár, P. and Vicsek, T. (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. . *In M. Schreckenberg and S. Deo Sarma (Eds.), Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 21–58.

HelbingD, M. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical ReviewE*.

Henein, C. M. and White, T. (2005). Agent-based modelling of forces in crowds. *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*, 173–184.

Henein, C. M. and White, T. (2007). Macroscopic effects of microscopic forces between agents in crowd models. *Physica*, 694–712.

Hughes, R. L. (2002). A continuum theory for the flow of pedestrians. *Methodological*.

Hughes, R. L. (2003). The flow of human crowds. *Annual Review of Fluid Mechanics*.

KirchnerA, KlupfelH, NishinariK, SchadschneiderA, S. (2003). Simulation of competitive egress behavior:comparison with aircraft evacua- tion data. *PhysicaA*.

KuligowskiED. (2004). Review of 28 egress models. *In:PeacockRD,KuligowskiED, Editors. In:Proceedings of the workshop on building occupant movement during Fire emergencies*.

Lakoba, T. I., Kaup, D. J. and Finkelstein, N. M. (2005). Modifications of the Helbing-Molnar-Farkas-Vicsek social force model for pedestrian evolution. *Simulation*.

Lerner, A., Chrysanthou, Y. and Lischinski, D. (2007). Crowds by example. *Eurographics*.

Liu Shaobo, Yang Lizhong , Fang Tingyong, L. J. (2009). Evacuation from a classroom considering the occupant density around exits. *Physica A*.

Milazzo, J. S., Rouphail, N. M., Hummer, J. E. and Allen, D. P. (1998). The effect of pedestrians on the capacity of signalized intersections. *Journal of the Transportation Research Board*.

Mitchell, S. W. and Radwan, E. (2006).). Heuristic priority ranking of emergency evacuation stagin to reduce clearance time. *Journal of the Transportation Research Board*, 219–228.

Musse, S. R. and Thalmann, D. (2001). Hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 152–164.

Musse, S. R., Jung, C. R., Jacques Jr., J. C. S. and Braun, A. (2007). Using computer vision to simulate the motion of virtual agents. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 83–93.

OlenickSM, C. (2003). An updated inter national survey of computer models for fire and smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*.

Pan, X., Han, C. S. and Law, K. H. (2005). A multi-agent based simulation framework for the study of human and social behavior in egress analysis. *Proceedings of the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering*.

Paris, S., Donikian, S. and Bonvalet, N. (2006). Environmental abstraction and path planning techniques for realistic crowd simulation. *Computer Animation and Virtual Worlds*.

Pelechano, N. Addler, J. M. and Badler, N. I. (2007). Controlling individual agents in high-density crowd simulation. *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/ Eurographics Symposium on Computer Animation*, 99–108.

Pelechano, N. and Malkawi, A. (2008). Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. *Automation in Construction*, 377–385.

Pidd, M., de Silva, F. N. and Eglese, R. W. (1996). A simulation model for emergency evacuation. *European Journal of Operational Research*.

Reynolds, C. (1987). Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. *Computer Graphics*, 25–34.

Reynolds, C. (1999). (1999). Steering behaviors for autonomous characters. *Game Developers Conference*.

Rose Challenger, M. A. R. (2009). Understanding Crowd Behaviours,.

Şahin, C., Rokne, J., & Alhajj, R. (2019). Human behavior modeling for simulating evacuation of buildings during emergencies. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *528*, 121432. http://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2019.121432

SantosG, A. (2004). Acritical review of emergency evacuation simulation models. *In:PeacockRD,KuligowskiED,editors.Proceedingsoftheworkshop on Building occupant movement during fire emergencies*.

Schreckenberg, M. and Sharma, S. (2001). Pedestrian and Evacuation Dynamics. *Springer-Verlag*.

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

Sheeba, A. A., & Jayaparvathy, R. (2019). Performance modeling of an intelligent emergency evacuation system in buildings on accidental fire occurrence. *Safety Science*, *112*, 196–205. http://doi.org/10.1016/J.SSCI.2018.10.027

Still, G. K. (2000). Crowd Dynamics. . *PhD Thesis, University of Warwick, UK*.

Sung, M., Gleicher, M. and Chenney, S. (2004). Scalable behaviors for crowd simulation. *Eurographics*.

Treuille, A., Cooper, S. and Popovic, Z. (2006). Continuum crowds. *ACM Transactions on Graphics*, 1160–1168.

Ulicny, B. and Thalmann, D. (2001). Crowd simulation for interactive virtual environments and VR training systems. *Computer Animation and Simulation*.

Weifeng, Y. and Kang Hai, T. (2007). A novel algorithm of simulating multi-velocity evacuation based on cellular automata modeling and tenability condition. *Physica A*.

Wong, K. H. L. and Luo, M. (2005). Computational tool in infrastructure emergency total evacuation analysis. *Intelligence and Security Informatics, Proceedings*, 536–542.

Xiao, Y., Gao, Z., Jiang, R., Li, X., Qu, Y., & Huang, Q. (2019). Investigation of pedestrian dynamics in circle antipode experiments: Analysis and model evaluation with macroscopic indexes. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *103*, 174–193. http://doi.org/10.1016/J.TRC.2019.04.007

Yamamoto, K., Kokubo, S. and Nishinari, K. (2007). Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA). *Physica A*.

Yuanchun Ding , Lizhong Yang, Falu Wenga, Zhijian Fu, P. R. (2015). Investigation of combined stairs elevators evacuation strategies for high rise buildings based on simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*.

Z.Shahhoseini, M.Sarvi, & M.Saberib. (2018). Pedestrian crowd dynamics in merging sections: Revisiting the “faster-is-slower” phenomenon. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *491*, 101–111.

Zhao, D. L., Yang, L. Z. and Li, J. (2006). Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency. *Physica A*.

ZhaoDL, YangLZ, L. (2006). Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency. *PhysicaA*.

Zheng Xiaoping, Zhong Tingkuan, L. M. (2009). Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*.

Zhou, Z., Zhou, Z., & Cai, H. (2019). An Analysis of Pedestrians' Behavior in Emergency Evacuation Using Cellular Automata Simulation. *arXiv Preprint arXiv:1903.01229*.