

# شبیه سازی انتشار دود برآمده از آتش سوزی در ساختمان های بلند مرتبه با استفاده از مدل سه بعدی تولید شده از داده های کاداستر دوبعدی تفکیک آپارتمان

مجید مختاری کرچگانی<sup>۱</sup>، محمد طالعی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم های اطلاعات مکانی - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی

خواجه نصیرالدین طوسی

majid.mokhtari@email.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

taleai@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۸، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۸)

## چکیده

در اختیار داشتن مدل سه بعدی از ساختمان های با تعداد طبقات بالا، در مواقع اضطراری همچون رخداد آتش سوزی، نقش بنیادی و راهبردی در مدیریت بحران و کاهش خسارات دارد. در حالی که ایجاد مدل سه بعدی ساختمان های بلند، همواره با کمبود اطلاعات مورد نیاز روبرو بوده است، داده های دوبعدی تفکیک آپارتمان، به عنوان منبع بارز، کم هزینه ای و در دسترس می تواند مورد استفاده قرار گیرد. با به کارگیری این داده ها و استفاده از ابزارهای مدل سازی سه بعدی، می توان گامی مؤثر در تولید مدل سه بعدی ساختمان ها، به ویژه ساختمان های بلندمرتبه در شهرها برداشت. هنگام بروز آتش سوزی در ساختمان، دود یکی از عوامل اصلی تهدیدکننده سلامت افراد خواهد بود که حرکت و انتشار آن در قسمت های گوناگون ساختمان، متأثر از شرایط طراحی داخلی و معماری ساختمان است. از این رو شبیه سازی رایانه ای نحوه انتشار دود در ساختمان، تحت سناریوهای گوناگون، می تواند در هنگام بروز آتش سوزی، کمک شایانی در فرایند تصمیم گیری مدیران بحران و کاهش تلفات انسانی، ایفا نماید. در این تحقیق، ابتدا پلان دوبعدی یک ساختمان بلندمرتبه واقع در تهران، به صورت خودکار از داده های اخذ شده از سامانه نقشه های تفکیکی اداره ثبت، ایجاد گردید. سپس با بهره گیری از نرم افزار CityEngine، مدل سه بعدی ساختمان با جزئیات مناسب تولید شد. در نهایت با به کارگیری مدل سه بعدی ایجاد شده، شبیه سازی انتشار دود در ساختمان مورد نظر در هفت سناریو متفاوت، در نرم افزار PyroSim انجام گرفت. نتایج مؤید قابلیت های مناسب مدل سه بعدی ساخته شده از داده های دوبعدی تفکیک آپارتمان، برای شبیه سازی و تحلیل سناریوهای گوناگون انتشار دود در ساختمان های بلند است.

**واژگان کلیدی:** ساختمان بلندمرتبه، مدیریت بحران، مدل سازی سه بعدی، BIM، گسترش دود آتش سوزی، CityEngine، PyroSim

## ۱- مقدمه

امروزه با توسعه شهرها به همراه گسترش روزافزون جمعیت و رشد شهرنشینی، نیازهای عمومی مردم از جمله اشتغال و مسکن جلوه بیشتری پیدا کرده اند. یکی از اقدامات مسئولین شهرسازی و توسعه شهری در راستای برآورده کردن نیازهای یادشده، احداث سازه های با تعداد طبقات بالا، بوده است.

نقشه ها، داده ها و اطلاعات مکانی نقش مؤثری در پیشبرد اهداف گروه های مشارکتی داشته است [۱]. از سوی دیگر تولید و در اختیار داشتن مدل های سه بعدی از محیط های شهری می تواند در برنامه ریزی شهری، مخابرات، کاداستر سه بعدی، مدیریت منابع، مدیریت بحران، صنعت گردشگری، مسیریابی و شهرهای هوشمند مورد استفاده قرار گیرد [۲]. در برخی از این مدل ها ارتباط بین اجزا مکانی مهم است [۳] و در برخی دیگر تنها به هندسه عوارض توجه می شود، بدون اینکه روابط معنایی و توپولوژیکی مدنظر باشد [۴]. این در حالی است که سامانه های اطلاعات مکانی به صورت تعامل پذیر میان عوارض، نرم افزار و کاربران ارتباط برقرار می کند و علاوه بر روابط هندسی، سبب می گردد دسترسی به اطلاعات معنایی، توصیفی و توپولوژیکی قسمت های گوناگون امکان پذیر باشد. بصری سازی یک از مفیدترین و قدرتمندترین راه حل ها جهت بیان عوارض مکانی همچون ساختمان ها و خیابان ها بیان شده است [۵]. نمایش سه بعدی مؤلفه های مکانی نسبت به نقشه های دوبعدی متعارف در برنامه ریزی شهری، مفیدتر و مؤثرتر واقع می شود [۶]. شایان ذکر است مدل هایی که تحت استانداردهای CityGML و IFC در زمینه BIM تهیه می شوند، از ارتباط های هندسی و معنایی بین اجزای گوناگون پشتیبانی می کنند [۷].

منابع داده گوناگون و فراوانی جهت مدل سازی سه بعدی ساختمان ها بیان شده است: داده های موجود در ادارات ثبت، داده های لیزر اسکنر<sup>۱</sup> (به صورت هوایی<sup>۲</sup> و زمینی<sup>۳</sup>) [۸]، عکس های ماهواره ای، هوایی یا تلفیقی از آن ها [۹ و ۱۰] و داده های مکانی به دست آمده از سایر روش های نقشه برداری، از جمله آن ها خواهد بود. علاوه بر

داده، نرم افزار بکار گرفته شده جهت تولید مدل سه بعدی نیز مهم است. نرم افزارهای ArcGIS، GeoMedia 3D، QGIS، Google SketchUp و CityEngine نمونه ای از نرم افزارهای مکانی هستند. CityEngine یک نرم افزار مدل سازی سه بعدی است که از مجموعه داده های دوبعدی برای تولید محیط های شهری سه بعدی و مدل های پارامتریک پیچیده مورد استفاده قرار می گیرد [۱۱]. همچنین این نرم افزار از انواع داده های مکانی (Shapefile، Geodatabase، KML، OSM و COLLADA) و کار با مؤلفه های مربوط به GIS نظیر بلوک ها و پلان های دوبعدی (footprints) ساختمانی پشتیبانی می کند [۸].

مدل های ساختمان با توجه به جنس و نوع داده مورد استفاده، در سطوح گوناگون جزئیات<sup>۴</sup> نمایش داده می شوند که هر کدام از این سطوح، در مسائل گوناگون کاربرد خواهند داشت [۱۲].

در سال های اخیر اداره کاداستر کشور با همکاری سازمان نظام مهندسی ساختمان، اقدام به تولید نقشه های رقومی تفکیک آپارتمان در قالب یک سامانه نموده است<sup>۵</sup>. داده دوبعدی تفکیک آپارتمان می توانند یک ساختمان را در سطوح گوناگون جزئیات، نمایش دهند. هر چند این گونه داده ها دربرگیرنده چیدمان مبلمان<sup>۶</sup>، جنس مواد به کار برده شده اجزا ساختمان و تقسیمات داخلی نیستند، ولی سایر اجزای داخلی ساختمان از جمله داکت ها، آسانسورها، بالکن ها، نورگیرها، تراس ها، پله ها و بسیاری موارد دیگر که نقش مهمی در توسعه و انتشار دود از محل وقوع به سایر بخش های ساختمان را دارند، دربرگیرنده می شوند.

از سوی دیگر مدیریت ساختمان های بلندمرتبه با توجه به جمعیت ساکن در آن ها، در شرایط اضطراری و وقوع بحران از جمله آتش سوزی و زلزله، از اهمیت بالایی برخوردار هستند. در جدول ۱ چند نمونه آتش سوزی در ساختمان های بلندمرتبه به همراه تعداد تلفات انسانی هر کدام، آورده شده است.

۴ Level of Detail (LoD)

۵ <http://cadastre.ssaai.ir/>

۶ Furniture

۱ Laser Scanner

۲ Aerial

۳ Terrestrial

عملکرد ساختمان در هنگام وقوع آتش و انتشار دود تحت شرایط گوناگون است [۱۹].

حرکت و انتشار دود در ساختمان‌های بلند روال پیچیده‌ای دارد؛ حال آنکه اگر آتش‌سوزی در طبقات پایین اتفاق بیفتد، امکان گسترش دود به وسیله چاه‌های آسانسور و راه‌پله‌ها بسیار خواهد بود [۲۰ و ۲۱].

با در اختیار داشتن نتایج حاصل از شبیه‌سازی مانند مدت‌زمان سوختن، میزان ارتفاع شعله‌های آتش، Backdraft، Flashover و توزیع و پخش دود، می‌توان ترتیب و توالی سوخته شدن اشیاء موجود و انتشار دود با منشأ اصلی آتش‌سوزی را مشخص نمود [۲۲]. به‌طور کلی سه مدل رایج‌های جهت پیش‌بینی حرکت دود در ساختمان وجود دارد: مدل‌های شبکه<sup>۳</sup>، مدل‌های منطقه<sup>۴</sup> و مدل‌های CFD<sup>۵</sup> [۲۳]. در مجموع می‌توان مهندسی ایمنی آتش را علمی بین‌رشته‌ای خواند [۲۴] و مدل‌سازی حرکت دود در ساختمان‌های بلند را یک فاکتور کلیدی جهت بررسی ریسک آتش‌سوزی در آن تلقی نمود [۲۵].

حرکت و انتشار دود در ساختمان‌های بلند روال پیچیده‌ای دارد حال آنکه اگر آتش‌سوزی در طبقات پایین اتفاق بیفتد، امکان گسترش دود به وسیله چاه‌های آسانسور و راه‌پله‌ها بسیار خواهد بود.

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، نقشه دوبعدی تفکیک ساختمان است که به‌سادگی و با کمترین هزینه قابل دسترس است. این یک مزیت نسبت به داده‌های اولیه مورد استفاده در [۲۶ و ۲۷] به حساب می‌آید. لذا در این تحقیق با استفاده از داده‌های دوبعدی تفکیک آپارتمان، مدل سه‌بعدی از یک ساختمان بلندمرتبه ایجاد گردید. سپس در مدل ایجاد شده، شبیه‌سازی گسترش دود تحت چند سناریو گوناگون انجام گرفت. در نهایت به بررسی نقاط ضعف و قوت معماری داخلی ساختمان بر پایه نتایج سناریوهای گوناگون، پرداخته شد.

در ادامه مقاله، در بخش دوم به بررسی تحقیقات انجام شده قبلی در موضوع مقاله پرداخته شده است. بخش سوم به بیان روش تحقیق و مدل و گام‌های پیشنهادی جهت دستیابی با هدف این تحقیق پرداخته شده است. در بخش چهارم، نتایج پیاده سازی مدل پیشنهادی تحقیق در

جدول ۱- چند نمونه از آتش‌سوزی‌های اتفاق افتاده در ساختمان‌های بلندمرتبه به همراه تعداد جان‌باخته‌ها و مصدومان هر حادثه (منبع: اسناد و آمار موجود در سایت <https://www.wikipedia.org>)

مکان آتش‌سوزی	سال وقوع	تعداد جان باخته/مصدوم	طبقات/ ارتفاع (m)
ساختمان‌های ۱، ۲ و ۷ مرکز تجارت جهانی (نیویورک- آمریکا)	۲۰۰۱	۲۷۶۳	۵۴۱ / ۱۰۴
ساختمان Joelma (سائوپائولو-برزیل)	۱۹۷۱	۱۸۹-۱۹۷ / ۳۰۰	۴۰ / ۲۷
ساختمان آپارتمانی (شانگهای-چین)	۲۰۱۰	۷۰ / ۵۸	- / ۲۸
برج Grenfell (لندن-انگلستان)	۲۰۱۷	۷۰ / ۷۲	۶۷ / ۲۴
ساختمان پلاسکو (تهران-ایران)	۲۰۱۷ (۱۳۹۵)	۲۳۵ / ۲۱	۴۲ / ۱۷

پس از حادثه ۱۱ سپتامبر ۲۰۰۱ در آمریکا و همچنین حوادث اخیر در کشور از جمله آتش‌سوزی ساختمان پلاسکو، تخلیه اضطراری ساختمان‌های با تعداد طبقات بالا، بیش‌ازپیش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۱۳-۱۶].

وجود گازهای سمی و سرعت انتشار بالای دود برآمده از آتش‌سوزی در ساختمان، سبب می‌شود افراد به‌سختی ببینند و به‌آرامی راه بروند، دچار سرگیجه و سردرگمی شوند و در صورتی که غلظت آن بالا باشد، امکان خفگی و مرگ وجود دارد. از طرفی آمار نشان می‌دهد بیش از ۸۰ درصد تلفات جانی در آتش‌سوزی‌ها، برآمده از استنشاق دود است. بعلاوه اینکه گازهای احتراق داخل ساختمان در دماهای بالا، رفتار پیچیده‌ای دارد و اثر دودکش<sup>۱</sup> را ایجاد می‌کند که این امر باعث می‌گردد دود سریع‌تر ساختمان را، چه در راستای افق و چه در راستای قائم، فراگیرد. با وجود آنکه انجمن NFPA<sup>۲</sup> سالیانه دستورالعمل‌هایی جهت طراحی استاندارد سامانه‌های تهویه اضطراری و سیستم کنترل دود در ساختمان‌های بلندمرتبه تحت NFPA ۹۲ [۱۷] و NFPA 204 [۱۸] منتشر می‌کند، عوامل مختلفی می‌توانند آتش‌سوزی در ساختمان را رقم بزنند و شبیه‌سازی‌های رایج‌های یکی از راه‌های بررسی

<sup>۳</sup> Network models

<sup>۴</sup> Zone models

<sup>۵</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

<sup>۱</sup> Chimney/Stack effect

<sup>۲</sup> National Fire Protection Association

ساختمان بلند مطالعه موردی، ارائه گردیده است و در نهایت در بخش پنجم، بحث و نتیجه‌گیری و همچنین برخی زمینه‌های نیازمند تحقیق بیشتر، ذکر شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق

در اختیار داشتن مدل سه‌بعدی از ساختمان با جزئیات مناسب، می‌تواند مسئولین را در مدیریت بحران‌هایی همچون آتش‌سوزی در ساختمان‌های بلندمرتبه، کمک نماید. این مدل‌سازی با استفاده از داده‌ها و به روش‌های گوناگون امکان ایجاد دارد. دینگ و همکاران یک روش جدید برای استفاده در کاداستر سه‌بعدی تحت عنوان 'EABNOF' ارائه داده و به تولید مدل هندسی و توپولوژی ساختمان پرداختند [۲۸]. پین و همکاران ابتدا پلان‌های دوبعدی معماری را به فرمت قابل‌شناسایی برای Autodesk (ADT) تبدیل نمودند. سپس برای ایجاد مدل سه‌بعدی، خروجی مرحله قبل را به محیط Autodesk Revit که یک نرم‌افزار مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) است، وارد کردند [۲۶]. بارکی و همکاران با ترکیب نقشه‌های دوبعدی و تصاویر حاصل از اسکن داخل ساختمان توسط دوربین دیجیتال، سعی بر تولید مدل BIM برای آسمان‌خراش‌ها داشتند [۲۷].

در مقاله [۴] یک سیستم تعامل‌پذیر به‌منظور مدیریت اطلاعات کاداستر سه‌بعدی مناطق مسکونی با استفاده از بانک‌های اطلاعات مکانی PostgreSQL و PostGIS ارائه شد. تمرکز اصلی این پژوهش در به‌کارگیری فنون مدل‌سازی سه‌بعدی بود و سعی داشتند یک بلوک شهری را در سطح جزئیات LoD2 تحت استاندارد CityGml، بصری سازی نمایند. درنهایت یک فایل CityGML و چندین فایل KML/COLLADA (ارائه بلوک‌های ساختمانی تحت چهار نوع نمایش همانند Google Earth) خروجی کار معرفی شد.

در تحقیق [۲۹] با استفاده از نرم‌افزارهای GIS و تکنیک‌های بصری‌سازی سه‌بعدی، عناصر موجود در برنامه‌ریزی شهری نمایش داده شد. بدین منظور از داده‌های لیزر اسکنر زمینی به‌صورت ابر نقاط و نرم‌افزارهای

اطلاعات مکانی ArcGIS، CityEngine و Google SketchUp استفاده گردید.

در تحقیقی که الله‌بیگ و عبدالرحمن انجام دادند [۱۲]، مدل‌سازی سه‌بعدی ساختمان را به‌گونه‌ای انجام دادند که نمایشی چند مقیاسی<sup>۴</sup> داشته باشد. ایشان یک استراتژی سه مرحله‌ای دربرگیرنده ساده‌سازی، گردآوری و بازسازی برای تولید مدل CityGML ارائه دادند و در این راستا از داده‌های LoD1، که از خطوط خارجی مدل ساختمان در LoD3 استخراج شده است، بهره گرفته شد و هدف از این اقدام، کاهش داده‌های مورداستفاده در تولید مدل‌های شهری، از سطوح جزئیات بالا به سطوح جزئیات پایین بیان گردید.

به‌منظور بررسی گسترش و انتشار دود در چاه آسانسور، تحقیق [۲۱] با استفاده از روش‌های عددی مبتنی بر CFD انجام گرفت. در تحقیق [۳۰] نیز با استفاده از روش‌های عددی CFD، وضعیت جریان هوا و گسترش دود در ساختمان با معرفی یک طبقه به‌عنوان پناهگاه و همچنین تأثیر نیروی شناور بر روی سرعت و حرکت دود مورد ارزیابی قرار گرفت.

دو برنامه رایانه‌ای COSMO و CONTAM جهت بررسی حرکت دود، تعیین جریان هوا، آزمون‌های فشار هوا به ترتیب در تحقیقات [۲۰ و ۳۱-۳۳] و [۳۴-۳۶] موردتوجه قرارگرفته‌اند. همچنین در مقاله [۳۷] به مقایسه این دو برنامه در قابلیت‌های مشترکی که دارند (برنامه CONTAM می‌تواند غلظت گازهای سمی احتراق را اندازه‌گیری بگیرد درحالی‌که COSMO قادر به این اندازه‌گیری نیست)، پرداخته شد.

وانگ و همکاران [۳۸] از مدل CUsmoke برای شبیه‌سازی دود با نرخ آزادسازی گرما<sup>۵</sup> به‌صورت ثابت، تغییر خطی و تغییرات غیرخطی در یک ساختمان ۱۰ طبقه استفاده کردند. لی و همکاران [۲۴] نیز در یک مطالعه موردی خطر آتش‌سوزی را با استفاده از عملکرد مدل CUsmoke تحلیل کردند؛ از بین رفتن حائل آتش<sup>۶</sup>، گسترش آتش‌سوزی، تأثیر آن بر روی سلامت افراد و همچنین بررسی نقش سامانه‌های اطفاء حریق همچون Sprinkler ازجمله مسائلی بود که در تحقیق نامبرده به

<sup>۴</sup> Multiscale  
<sup>۵</sup> Heat Release Rate (HRR)  
<sup>۶</sup> Fire Barrier

<sup>۱</sup> Extrusion Approach Based on Non-Overlapping Footprints  
<sup>۲</sup> Architectural Desktop (Autodesk)  
<sup>۳</sup> Building Information Modeling

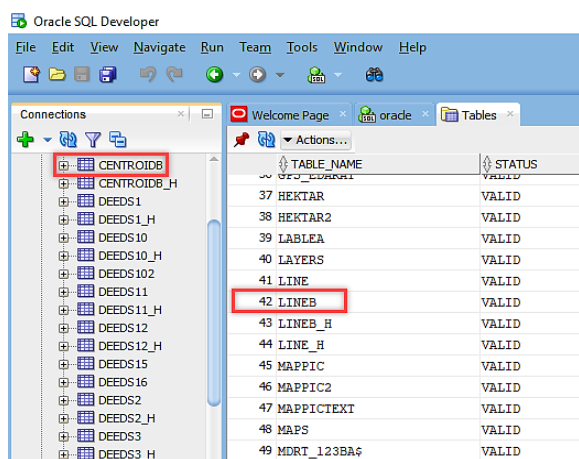
### ۳- مواد و روش تحقیق

#### ۳-۱- مطالعه موردی

مطالعه موردی این پژوهش، ساختمانی ۱۷ طبقه واقع در منطقه یک تهران، دربرگیرنده ۱۳ طبقه و ۳ طبقه زیرزمین است. این مجموعه ساختمانی از سه برج جداگانه تشکیل شده که در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. این ساختمان با مساحت اعیان ۴۷۴۶ مترمربع دربرگیرنده نمازخانه، سالن اجتماعات، سالن ورزشی، تعداد ۳۷۳ واحد پارکینگ اعم از تجاری، مسکونی و معلول، تعداد ۳۰۰ باب انباری مسکونی، تعداد ۳۰۰ دستگاه واحد مسکونی، تعداد ۲ باب واحد تجاری و بیش از ۳۰ داکت و تعداد ۶ آسانسور، است.

#### ۳-۲- پایگاه داده کاداستر دوبعدی نقشه ساختمان

در سال‌های اخیر اداره کاداستر کشور با همکاری سازمان نظام‌مهندسی ساختمان، اقدام به تولید نقشه‌های رقومی کاداستر تفکیک آپارتمان نموده است. در پایگاه داده مربوطه، حدود ۶۰ جدول پیش‌بینی شده است که هرکدام از آن‌ها اطلاعات مختلفی را درون خود دارند. شکل ۱-نمایی از چندین جدول موجود را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- برخی از جداول موجود در پایگاه داده اوراکل و ذخیره شده در Tablespace با نام GIS\_DEED

در این تحقیق از دو جدول CENTROIDB و LINEB بهره گرفته شد. جدول LINEB دربردارنده هرگونه خط موجود در ساختمان به همراه تعدادی ویژگی از قبیل نام

آن پرداخته شد. در تحقیق [۳۹] به‌منظور بررسی و ارزیابی ویژگی‌های حرکت دود برآمده از آتش‌سوزی و تخمین نرخ انتشار گرما در آتش‌سوزی‌های واقعی، نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل رایانه‌ای CUsmoke و نتایج تجربی به دست آمده در یک برج ۱۰ طبقه مقایسه شد. مدل CUsmoke یک مدل جامع تحلیل آتش‌سوزی است که توسط دانشگاه کارلتون کانادا [۴۰] ارائه شده است.

ژائو و همکاران [۴۱]، ۱۲ سناریو مختلف جهت بررسی حرکت و انتشار دود در یک ساختمان ۱۲ طبقه را با به‌کارگیری شبیه‌سازی‌های عددی ارائه دادند. در پژوهش [۲۵] یک مدل پویا از گسترش آتش در ساختمان ارائه داد که به‌راحتی می‌تواند برای هر نوع از ساختمان، حتی ساختمان‌های بلندمرتبه مورداستفاده قرار گیرد؛ بدین منظور محاسبات مربوط به گسترش آتش‌سوزی در یک ساختمان اداری ۲ طبقه انجام گرفت و درنهایت مدت‌زمان حریق، زمان اتفاق افتادن Flashover و احتمال گسترش آتش از یک محدوده به قسمت دیگر بررسی شد. در پژوهش انجام‌شده [۴۲] شبیه‌سازی انتشار آتش‌سوزی و دود برآمده از آن در یک ساختمان ۵ طبقه با مقیاس ۱:۲ انجام گرفت؛ ساختمان مذکور دارای دو راه‌پله بود و سناریوهای مختلفی بر پایه مکان شروع آتش‌سوزی و چندین نوع از شرایط تهویه در نظر گرفته شد؛ مواد اولیه آتش‌سوزی نیز الوار و نفت سفید اعلام گردید و درنهایت سرعت جریان، دما، فشار هوا و غلظت عناصر گوناگون موجود در دود اندازه‌گیری شد.

علی‌رغم انجام در خارج کشور، موضوع مقاله حاضر کمتر توسط محققین درون کشور مورد توجه قرار گرفته است. همچنین نقشه دوبعدی تفکیک ساختمان که با همکاری سازمان نظام مهندسی ساختمان و ادارات کاداستر در دست تهیه می‌باشد، مجموعه داده نسبتاً جدیدی است که ارزیابی قابلیت استفاده از آن در زمینه های گوناگون از جمله تولید مدل سه بعدی ساختمان و کاربرد آن در مسائل گوناگون از قبیل شبیه‌سازی انتشار دود برآمده از آتش‌سوزی در ساختمان‌های بلند، موضوع جدیدی است که نیازمند انجام تحقیق در کشور است و در مقاله حاضر به آن پرداخته شده است.

طبقه، مختصات ابتدا و انتهای خط، کد برچسب و یا بافت<sup>۱</sup> (در جدول ۳ برخی از این برچسبها آورده شده)، و غیره است. در جدول CENTROIDB برچسب مربوط به هر چندضلعی به همراه چند ویژگی آورده شد که در جدول ۴ تعدادی از این برچسبها بیان گردیده است.

جدول ۲ - بررسی پارامترهای مدل رابطه‌ای برای دو جدول GIS.CENTROIDB و GIS.LINEB

نام جدول	هستنده	برخی ویژگی‌ها
GIS.LINEB	نقاط برداشت شده	مختصات نقاط، شماره طبقه، cms و ...
GIS.CENTROID	چندضلعی‌ها	ویژگی‌های هر چندضلعی، طبقه، cms و ...

جدول ۳ - چند نمونه بافت مربوط به حد فاصل‌ها به کاربرده شده در جدول LINEB به همراه کد آن‌ها

کد بافت	توضیح بافت
۲۱	دیواربست
۳۱	درب و دیوار و پنجره‌ای است
۳۲	خط فرضی است
۳۴	درب و دیوار و لبه بالکن
۴۴	دیوار تمام شیشه‌ای
۷۶	دیوار و درز انقطاع به عرض هشت سانتی‌متر است

جدول ۴ - چند نمونه بافت مربوط به کاربری فضاهای ساختمان موجود در جدول CENTROIDB به همراه کد آن‌ها

کد بافت	توضیح بافت
۱۲۱	داکت
۱۲۳	آسانسور
۲۱۸	سالن اجتماعات
۲۵۳	آپارتمان مسکونی
۳۱۲	پارکینگ مسکونی
۳۱۴	انباری مسکونی
۳۱۹	نمازخانه
۴۳۰	محوطه بازی کودکان

### ۳-۳- ابزار PyroSim

رابط کاربری گرافیکی<sup>۲</sup> PyroSim یک نرم‌افزار مدل‌سازی و ارزیابی سناریوهای گوناگون در روبرو با آتش‌سوزی‌های پیچیده همچون آتش‌سوزی در ساختمان‌های بلندمرتبه است که از شبیه‌سازی رفتار

دینامیکی آتش (FDS)<sup>۳</sup> بهره می‌گیرد و حرکت و رفتار دود و گازهای سمی حاصل از آتش‌سوزی را با سرعت و دقت بالا اندازه‌گیری می‌کند. FDS یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌منظور بررسی جریان سیالات حامل آتش است. در مدل‌های CFD، پارامترهای گوناگون یک سیال همچون سرعت، چگالی، دما و فشار موردبخت و اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی جریان دود به‌عنوان یک ماده سیال، ابتدا یک مدل ریاضی تعریف‌شده و با استفاده از یک روش عددی، ویژگی‌های گوناگون مربوط به حرکت و انتشار دود محاسبه می‌گردد. در شبیه‌سازی FDS از معادلات نویر استوکس<sup>۴</sup> به‌عنوان مدل ریاضی توصیف‌کننده دود، استفاده می‌شود [۴۳].

PyroSim از انواع مدل‌های طراحی مبتنی بر رایانه (CAD)<sup>۵</sup> همچون فایل‌های FBX و OBJ و کلاس‌های IFC<sup>۶</sup> پشتیبانی می‌کند. در FDS تنها یک مجموعه کُد CFD برای بیان حرکت و ویژگی‌های سیال تعریف می‌شود، درحالی‌که در PyroSim یک مجموعه ابزار به همراه نوع مواد به‌کاررفته در ساختمان و بافت‌های گوناگون وجود دارد که امکان طراحی مناسب مدل را به کاربر می‌دهد [۴۴].

بصری‌سازی دود در PyroSim، به غلظت و چگالی دوده سیاه‌رنگ حاصل از دود و ضریب خاموشی نور مخصوص یک جسم وابسته است و این ارتباط در روابط (۱) و (۲) مشخص شده‌اند.

$$K = k_m \times \rho_s \quad (1)$$

$$S = C/K \quad (2)$$

در رابطه (۱)، K ضریب خاموشی نور،  $k_m$  ضریب خاموشی مخصوص یک جسم و  $\rho_s$  چگالی دود (دوده) و در رابطه (۲)، S پدیداری (میدان دید) و C یک عدد ثابت است. مقدار پیش‌فرض در نظر گرفته‌شده برای C در شبیه‌سازی‌های FDS، برابر ۳ در نظر گرفته می‌شود [۴۵].

در نرم‌افزار PyroSim ایجاد عامل گرما، با تعریف یک سطح سوزنده<sup>۷</sup> و با تعیین نرخ آزادسازی گرما (HRR)<sup>۸</sup> از

<sup>۳</sup> Fire Dynamics Simulator (FDS)

<sup>۴</sup> Navier-Stokes Equations

<sup>۵</sup> Computer-Aided Design

<sup>۶</sup> Industry Foundation Classes

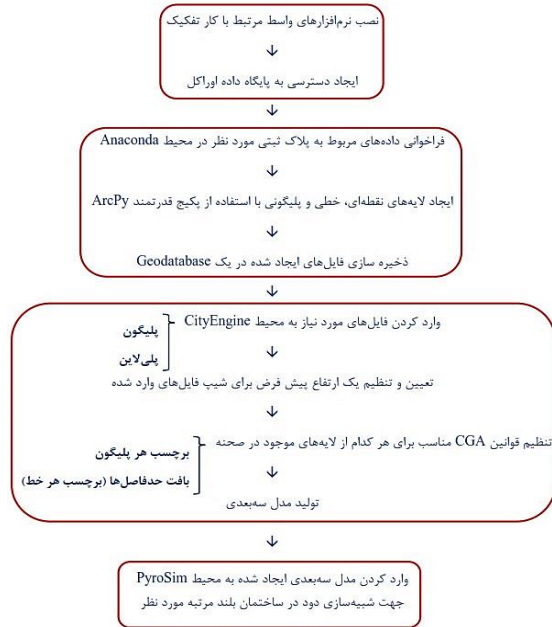
<sup>۷</sup> Burner Surface

<sup>۸</sup> Heat Release Rate

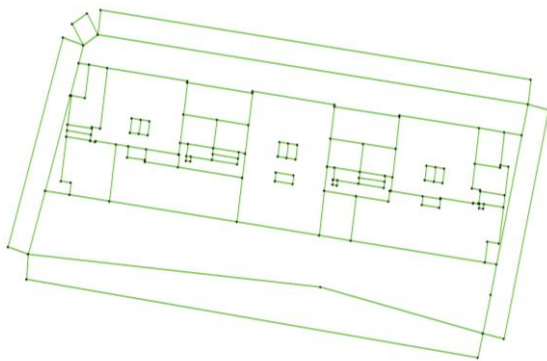
<sup>۱</sup> Texture

<sup>۲</sup> Graphical User Interface (GUI)

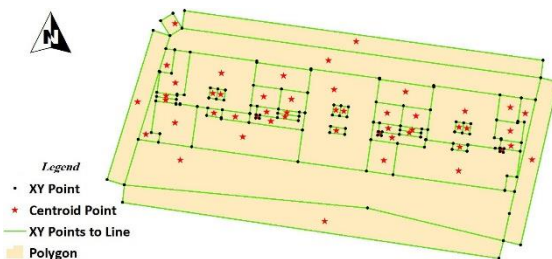
ارتفاع پایه برای هر طبقه، قوانین CGA<sup>۳</sup> مناسب به لایه‌های موجود نسبت داده می‌شود. قوانین CGA به‌عنوان دستور زبان برای اشکال حاضر در صحنه تنظیم می‌شود که به‌موجب آن می‌توان مدل‌سازی را به‌صورت خودکار انجام داد.



شکل ۲ - روند کلی انجام تحقیق



شکل ۳ - فایل خطی مربوط به پلان دوبعدی طبقه همکف در نرم‌افزار ArcMap



شکل ۴ - پلان دوبعدی طبقه همکف به همراه نقاط حداقل، خطوط حداقل، نقاط مراکز چندضلعی و چندضلعی‌های تشکیل‌شده در نرم‌افزار ArcMap

سطح معرفی‌شده، انجام می‌گیرد. HRR به‌عنوان نیرو محرکه آتش، یک متغیر مهم در آتش‌سوزی است و تأثیرات نامطلوب آتش‌سوزی همچون دود و دیگر خطرات برآمده از احتراق رابطه مستقیم با میزان انتشار گرما دارد. برای سوخت و ماده اکسیدکننده، یک واکنش<sup>۱</sup> در محیط نرم‌افزاری ساخته می‌شود که امکان تنظیم مقادیر و محصولات سوختی را دارد.

### ۳-۴- روش تحقیق

روند کلی انجام تحقیق مطابق شکل ۲ است. در مرحله نخست این تحقیق، داده‌های تفکیک ساختمان مورد مطالعه که در پایگاه داده اوراکل ذخیره‌سازی شده است، در قالب جداول موردنیاز (جدول ۲) فراخوانی و عملیات پیش‌پردازش بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد. در گام دوم، پلان‌های دوبعدی طبقات ساختمان که از مرحله قبل به‌دست آمده، برای ایجاد مدل سه‌بعدی به نرم‌افزار CityEngine وارد می‌شود. در مرحله سوم، به‌منظور بررسی وضعیت گسترش دود در ساختمان بلندمرتبه، شبیه‌سازی انتشار دود با استفاده از نرم‌افزار PyroSim تحت ۷ سناریوهای گوناگون در مدل سه‌بعدی ایجادشده در مرحله قبل، انجام می‌گیرد.

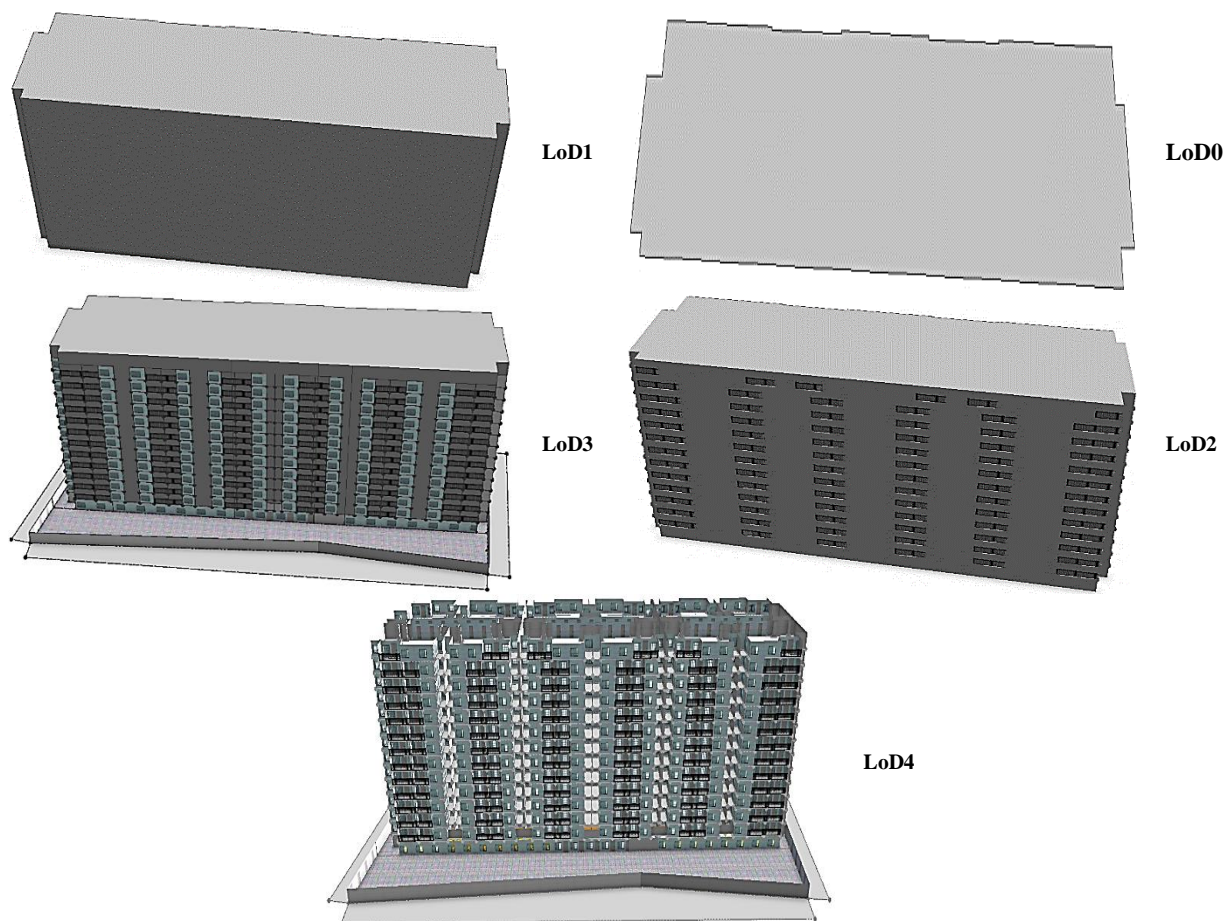
در گام نخست، پس از ایجاد دسترسی و اتصال به پایگاه داده اوراکل، داده‌های موردنیاز از پایگاه داده واکنشی و پلان دوبعدی هر طبقه از ساختمان، ایجاد می‌گردد. به‌منظور خودکار نمودن این فرایند از نرم‌افزار Anaconda ۰.۲ استفاده شد. Anaconda یک محیط (IDE)<sup>۲</sup> جهت توسعه زبان‌های برنامه‌نویسی Python و R بوده که قابلیت همگام‌سازی با ArcGIS از طریق پکیج ArcPy را دارد. پس از فراخوانی داده‌های دوبعدی از جداول LINEB و CENTROIDB و ترسیم آن‌ها در نرم‌افزار ArcMap به‌صورت فایل نقطه‌ای، عملیات آماده‌سازی بر روی آن‌ها انجام می‌شود و فایل‌های خطی و چندضلعی در قالب یک پایگاه‌داده مکانی ذخیره می‌گردد (شکل ۳ و ۴).

در گام دوم و به‌منظور نمایش مدل سه‌بعدی ساختمان در نرم‌افزار CityEngine، پس از وارد نمودن فایل‌های خطی و پلی‌گونی مربوط به طبقات در محیط نرم‌افزار و تنظیم

<sup>۱</sup> Reaction

<sup>۲</sup> Integrated Development Environment

<sup>۳</sup> Computer Generated Architecture



شکل ۴ - پنج سطح جزئیات ساخته شده از ساختمان مورد مطالعه

طبقات دیگر تعریف می‌شود. از این روی جزئیات و پارامترهای شبیه‌سازی دود در مدل سه‌بعدی ساختمان ایجاد شده مطابق با مراتب ذیل تعیین گردید. لازم به ذکر است تمامی مدل‌های بکار گرفته شده جهت استفاده در سناریوهای گوناگون توسط نرم‌افزار CityEngine و تحت فرمت‌های FBX و OBJ خروجی گرفته شده‌اند.

نخستین اقدام جهت آماده‌سازی مدل برای شبیه‌سازی دود، تعریف زیر دامنه از سلول‌ها (Cells) با ابعاد مشخص جهت معرفی شبکه یا Mesh است. تعریف شبکه برای مدل‌سازی‌های CFD از اهمیت بالایی برخوردار است چراکه اندازه هر یک از سلول‌های شبکه باید متناسب با مساحت و جزئیات مدل، هدف، دقت، زمان و حافظه تعیین گردد و هرچقدر اندازه سلول‌ها کوچک و تعداد آن‌ها زیاد باشد، محاسبات و اندازه‌گیری‌ها با دقت بالاتری ولیکن با حجم محاسباتی بیشتر، به دست خواهند آمد [۵۲، ۵۳]. در این مدل‌سازی، ابعاد شبکه برای هر بلوک  $10 \times 8 \times 10 m^3$  و  $17 \times 17 \times 17 cm^3$  تعیین شد. پارامتر تأثیرگذار در انتخاب اندازه

جهت نمایش سه‌بعدی یک ساختمان، میزان نمایش جزئیات حائز اهمیت است. در بحث مدل‌سازی شهری سه‌بعدی در استاندارد CityGML از عبارت سطح جزئیات<sup>۱</sup> و در مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) از مفهوم سطح توسعه<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. تعیین LoD مطلوب با توجه به هدف، نیاز، هزینه، زمان و غیره صورت می‌گیرد. برای تولید و بیان عوارض موجود در استاندارد CityGML، سطوح جزئیات در دسته‌بندی‌های متفاوتی ارائه شده است؛ ۴ سطح [۴۶]، ۵ سطح [۴۷]، [۴۸] و [۴۹]، ۶ سطح [۵۰]، [۵۱]. شکل نمایش ساختمان مورد مطالعه تا سطح جزئیات چهار را ارائه می‌دهد.

در گام سوم و باهدف شبیه‌سازی دود در ساختمان، سناریوهای گوناگون به‌منظور بررسی نقش راه‌پله‌ها، داکت‌ها، نورگیرهای مشاعی و دود بندها<sup>۳</sup> در انتقال دود به

<sup>۱</sup> Level of Detail (LoD)

<sup>۲</sup> Level of Development (LoD)

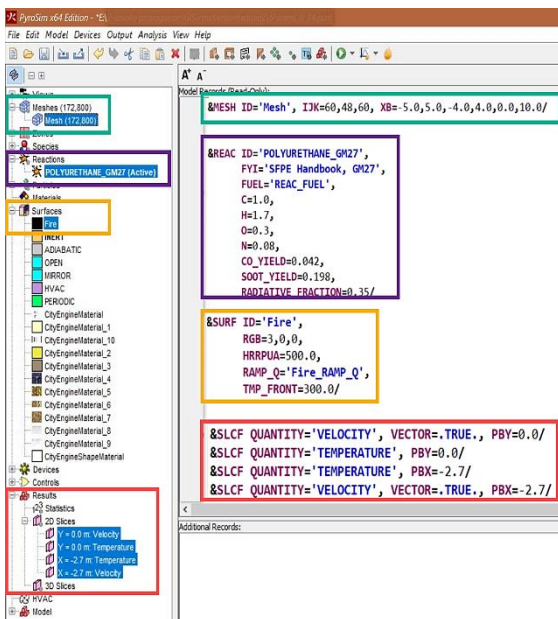
<sup>۳</sup> دود بند از جنس شیشه سکوریت است و بین لابی و راه‌پله طبقات نصب می‌شود. طبق مقررات ملی ساختمان و مبحث حفاظت ساختمان در مقابل حریق، نصب دود بند برای ساختمان‌های بلندمرتبه ضروری است.



باشد. در سناریو ۶ و ۷ با بسته در نظر گرفتن تمام درب‌ها و باز شدن درب ورود/خروجی و نورگیر محل شروع دود، پس از یک مدت‌زمان مشخص، سعی می‌شود تا وضعیت انتشار دود در حالت پدیده باز افروختگی<sup>۲</sup> (انفجاری ناگهانی است که در اثر ورود اکسیژن به یک محیط بسته و دارای مواد اشتعال‌زا داغ و گازی شکل، اتفاق می‌افتد) شبیه‌سازی گردد. جزئیات نحوه تعریف هر سناریو، در جدول ۵ بیان گردیده است.

جدول ۵ - جزئیات سناریوهای شبیه‌سازی دود به همراه محل اصلی انتشار آن

سناریو شماره	نوع	بسته	درب	دودبندها	داکت‌ها	نورگیر
۱	A	۱	باز	بسته	باز	باز
۲	A	۱	باز	بسته	باز	بسته
۳	C	۴	باز	بسته	بسته	باز
۴	B	۴	باز	باز	بسته	بسته
۵	B	۴	باز	باز	بسته	باز
۶	B	۴	بسته	باز	بسته	بسته
۷	B	۴	بسته	بسته	بسته	بسته



شکل ۶ - تنظیمات مربوط به مدل شبیه‌سازی سناریو ۶؛ ابعاد و تنظیمات شبکه مش بندی (مستطیل سبز)، تعریف واکنش شیمیایی (مستطیل بنفش)، تنظیمات جسم سوزنده (مستطیل نارنجی) و لایه‌های اندازه‌گیر گازی در مختصات تعیین‌شده (مستطیل قرمز)

شکل ۷ نمایشی از مدل و لایه‌های اندازه‌گیر گازی در  $X = 5.9 \text{ m}$  و  $Y = -0.8 \text{ m}$  با تفاوت

سلول، عبارت بدون یکای  $D^*/\delta x$  (مقادیر قابل قبول برای این نسبت در بازه ۴ تا ۱۶ قرار دارند) است که  $D^*$  قطر مشخصه آتش و  $\delta x$  اندازه اسمی هر سلول است.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (3)$$

$D^*$  مطابق با رابطه (۳) به دست می‌آید که در این رابطه  $\dot{Q}$  نرخ آزادسازی گرما،  $\rho_{\infty}$  چگالی هوا،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه هوا،  $T_{\infty}$  دمای محیط و  $g$  شتاب گرانش زمین تعریف می‌شود. در این شبیه‌سازی  $\dot{Q}=960 \text{ (kW)}$ ،  $\rho_{\infty}=1.204 \text{ (kg/m)}$ ،  $c_p=1.005 \text{ (kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1})$ ،  $T_{\infty}=293 \text{ (K)}$  و  $g=9.81 \text{ (m/s}^2)$  در نظر گرفته شد که در نهایت مقدار  $D^* = 0.943$  و  $\delta x = 0.167$  در نهایت نسبت  $D^*/\delta x = 5.647$  به دست آمد.

پس از تعریف شبکه برای مدل، نوبت به تعریف رابطه (واکنش) شیمیایی جهت فراهم نمودن محیطی مناسب برای انجام شبیه‌سازی است. POLYURETHAN\_GM37 یکی از واکنش‌های گازی موجود در کتابخانه PyroSim است که در این شبیه‌سازی انتخاب شد. برای شروع آتش‌سوزی و ایجاد دود در ساختمان نیاز است یک جسم (مانند مبل) به‌عنوان جسم سوزنده در نظر گرفته شود. برای این کار یک سطح سوزنده با ابعاد  $0.8 \times 0.6 \times 0.25 \text{ m}^3$  تعریف شد و مقدار  $500 \text{ kW/m}^2$  به‌عنوان پارامتر نرخ آزادسازی گرما در واحد سطح (HRRPUA) آن تنظیم شد. این مقدار مربوط به یک جسم با جنسی مرکب از چوب، پلاستیک و سلولز همانند یک مبل است [۵۴]. موارد ذکرشده در این بخش، در محیط PyroSim مطابق شکل ۶ تنظیم شده‌اند.

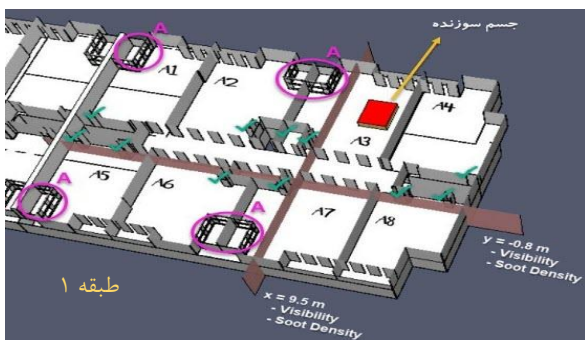
با توجه به هدف این تحقیق، ۷ سناریو برای بررسی چگونگی حرکت دود در ساختمان، تعیین گردید. باز یا بسته بودن (تمام یا بخشی از) درب‌ها، دود بندها، داکت‌ها و نورگیرها، المان‌های اصلی در تعریف این سناریوها هستند. در ۵ سناریو نخست، تمام درب‌ها باز هستند؛ به این خاطر که دود بتواند در قسمت‌های گوناگون ساختمان حرکت کند و امکان بررسی نقش داکت‌ها، دودبندهای ابتدای هر طبقه و نورگیرها در گسترش دود وجود داشته

<sup>۲</sup> Backdraft

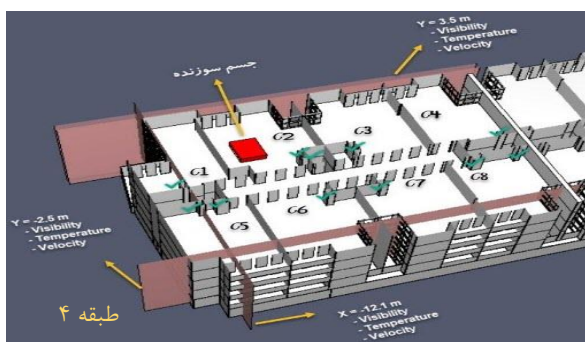
<sup>۱</sup> Heat Release Rate Per Unit Area

دودبندهای این طبقه شناسایی خواهد شد. دودبندهای طبقه ۱۲ نیز پس از ۳ دقیقه اجازه عبور دود به داخل طبقه را می دهند. در نهایت درب ورود/خروج واحدهای B2, B3, B6 و B7 طبقه ۱۲ با سی ثانیه تأخیر نسبت به تغییر وضعیت دودبندهای این طبقه، باز می شود. علاوه، نورگیرهای طبقات ۳، ۴، ۵، ۶ و ۱۲ باز هستند و اجازه ورود دود به ساختمان و خروج از آن را فراهم می کنند.

یکی از شاخص های مهم هنگام انتشار دود، میزان دید و تشخیص اشیاء خواهد بود که در این تحقیق، وضعیت و حالات گوناگون اضطرار بر پایه این معیار سنجیده شد. بدین منظور با استفاده از حسگرها و لایه های گازی، مقادیر Soot Visibility که در واقع حداکثر فاصله (در واحد متر) جهت تشخیص یک شی است مشخص شده و طبق جدول ۶ راهنمای وضعیت هر قسمت از ساختمان (دربگیرنده گازهای سمی برآمده از دود) تعیین می شود.



شکل ۷ - مدل وارد شده در نرم افزار PyroSim به همراه لایه ها و جسم سوزنده در واحد A3، سناریوهای ۱ و ۲

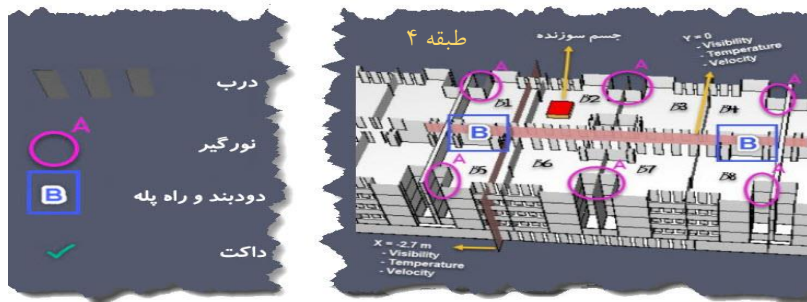


شکل ۸ - مدل وارد شده در نرم افزار PyroSim به همراه لایه ها و جسم سوزنده در واحد C2، سناریو ۳

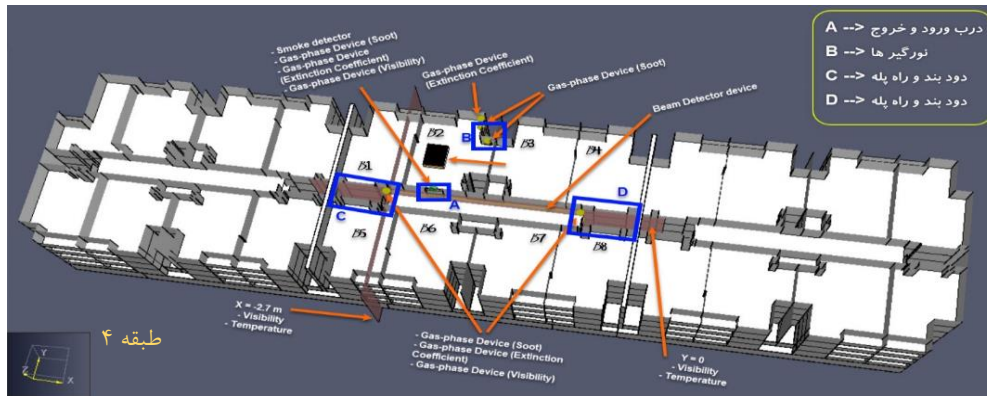
در باز یا بسته بودن نورگیرها را ارائه می دهد. در شکل ۸ مدل و لایه های اندازه گیر گازی در  $Y=3.5\text{ m}$ ,  $Y=-2.5\text{ m}$  و  $X=9.5\text{ m}$  برای سناریو ۳ نشان داده شده است. در سناریوهای ۴ و ۵ مدل و لایه های اندازه گیر گازی در  $Y = 0$  و  $X = -2.7\text{ m}$  طبق شکل ۹ معین شد.

مطابق شکل ۱۰، سناریوی آتش سوزی در محل آپارتمان B2 اتفاق می افتد. دولاپه اندازه گیر گازی در  $Y = 0$  و  $X = -2.7\text{ m}$  و چندین حسگر و اندازه گیر نقطه ای مجازی در محل درب ورودی/خروجی، نورگیرها و دود بندها قرار داده شد. با استفاده از حسگر مجازی تشخیص دهنده دود که در نزدیکی درب ورودی/خروج تعبیه شد، می توان تعیین کرد در چه زمانی پس از تشخیص دود، درب و نورگیرها باز شوند و دود در بیرون و داخل ساختمان شروع به حرکت کند. برای سناریو ۶ پس از گذشت ۶۰ ثانیه و ۱۸۰ ثانیه از تشخیص دود توسط حسگر مربوطه، به ترتیب نورگیرها و درب ورودی/خروج واحد اصلی انتشار دود (واحد B2) باز شده و دود به سمت راهرو و راه پله ها حرکت و در نهایت وارد طبقات دیگر می شود. در شکل ۱۰ محل درب ورودی/خروج، نورگیرها و دودبندهای طبقه ۴ (طبقه مربوط به منشأ انتشار دود) نشان داده شد. از طرف دیگر در طبقات گوناگون، برخی نورگیرها و درب ورودی/خروج واحدهای B2 و B4 باز نگاه داشته شد که عبارتند از: نورگیرهای واحد B2 در طبقات ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۷، ۱۱ و ۱۲؛ درب ورودی/خروج واحد B2 در طبقات ۷، ۹ و ۱۱؛ درب ورودی/خروج واحد B4 در طبقات ۶، ۸ و ۱۰. همچنین تعدادی حسگر و آشکارساز نقطه ای مجازی در طبقات ۳، ۵، ۶ و ۱۲ قرار گرفت.

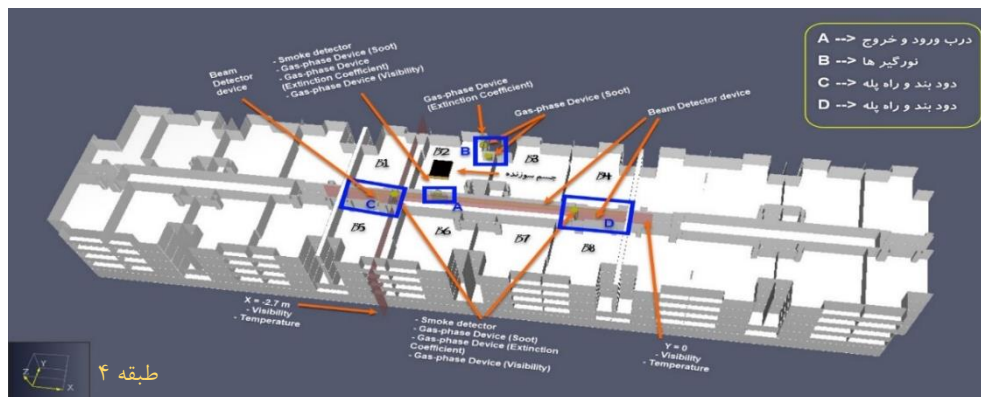
راه های انتقالی واحد B2 در سناریو ۷ همانند سناریو ۶ تنظیم شد. تفاوت شکل با شکل ۱۰ قرار دادن دو حسگر دود در نزدیکی دودبندهای طبقه ۴ و اضافه کردن یک حسگر دیگر در قسمت راه پله ها، از طبقه همکف تا طبقه ۱۲ است. در سناریو ۷ هنگامی که دود توسط حسگرهای مجازی تعیین شده در نزدیکی دودبندهای طبقه ۴ شناسایی شد، به مدت ۳ دقیقه بعد از آن، مقاومت دود بندها از بین خواهد رفت و گازهای سمی انباشته شده در راهرو طبقه ۴ به سمت راه پله سایر طبقات حرکت خواهد کرد. سپس دود به پشت دودبندهای طبقه ۱۲ خواهد رسید و توسط حسگرهای دود تعبیه شده در پشت



شکل ۹ - مدل وارد شده در نرم افزار PyroSim به همراه لایه‌ها و جسم سوزنده در واحد B2، سناریوهای ۴ و ۵؛ راهنمای اشکال بکار رفته در مدل‌های مرتبط با سناریوهای ۱ تا ۵



شکل ۱۰ - مدل وارد شده در نرم افزار PyroSim به همراه لایه‌ها، حسگرهای نقطه‌ای و جسم سوزنده در واحد B2، سناریوهای ۶



شکل ۱۱ - مدل وارد شده در نرم افزار PyroSim به همراه لایه‌ها، حسگرهای نقطه‌ای و جسم سوزنده در واحد B2، سناریو ۷

#### ۴- پیاده‌سازی مدل و نتایج

##### ۴-۱- ساخت مدل سه‌بعدی ساختمان

در ابتدا با استفاده از داده‌های دوبعدی تفکیک آپارتمان ساختمان ۱۷ طبقه‌ی مطالعه موردی، مدل سه‌بعدی آن ایجاد گردید (شکل ۱۲). شکل ۱۲-الف لایه‌های موجود در نرم‌افزار CityEngine (طبقات ساختمان با در نظر گرفتن و تنظیم ارتفاع) قبل از اعمال قوانین CGA و شکل ۱۲-ب مدل سه‌بعدی ساختمان بعد از اعمال قوانین CGA را نشان می‌دهند. همچنین لایه مربوط به طبقه همکف ساختمان برای نمونه در شکل ۱۲-ج آورده شده است.

به‌عنوان نمونه اگر وضعیت (میزان خطر) یک واحد با

عبارت زیاد ثبت شود، به این مفهوم است که در این محدوده‌اشیایی که در شعاع حداکثر ۸ متری هستند را می‌توان دید و تشخیص داد.

جدول ۶ - دسته‌بندی وضعیت اضطراری هر قسمت از ساختمان بر

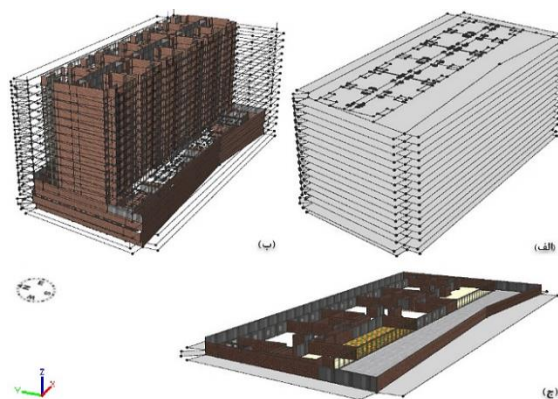
پایه Soot Visibility

نماد	مقدار (بازه)	میزان خطر
High (H)	۸-۱ متر	زیاد
Medium (M)	۱۲-۸ متر	متوسط
Low (L)	۲۰-۱۲ متر	کم
Few (F)	۲۰ متر به بالا	ناچیز

## ۴-۲- شبیه سازی انتشار دود در مدل سه بعدی ساختمان

شبیه سازی دود در طبقات بالای سطح زمین، در مدل سه بعدی تولید شده از ساختمان مورد مطالعه، تحت هفت سناریو ذکر شده در بخش قبل (جدول ۶)، صورت گرفت. هدف این شبیه سازی بررسی نقش داکت ها، نورگیرها و دود بندها در انتشار دود در سرتاسر یک بلوک از ساختمان بلندمرتبه، تعریف گردید تا غلظت دود و زمان رسیدن آن به راهروها، راه پله ها، واحدهای مجاور و طبقات بالا، مشخص شود.

نتایج حاصل از شبیه سازی هر کدام از سناریو ها، اعم از مدت زمان لازم جهت اجراء، مدت زمان شبیه سازی و تعداد گام های زمانی<sup>۱</sup> در جدول ۷ آورده شده است. همچنین زمان های ثبت شده از حضور دود در قسمت های گوناگون ساختمان و ارائه بصری از روند کلی حرکت و انتشار آن در قالب تصاویر، جداول و چارت ها ارائه شده است.



شکل ۱۲ - الف: لایه های طبقاتی ساختمان مورد مطالعه قبل از اعمال قوانین CGA؛ ب: مدل سه بعدی ساختمان در نرم افزار CityEngine؛ ج: مدل سه بعدی طبقه همکف مدل سه بعدی طبقه همکف

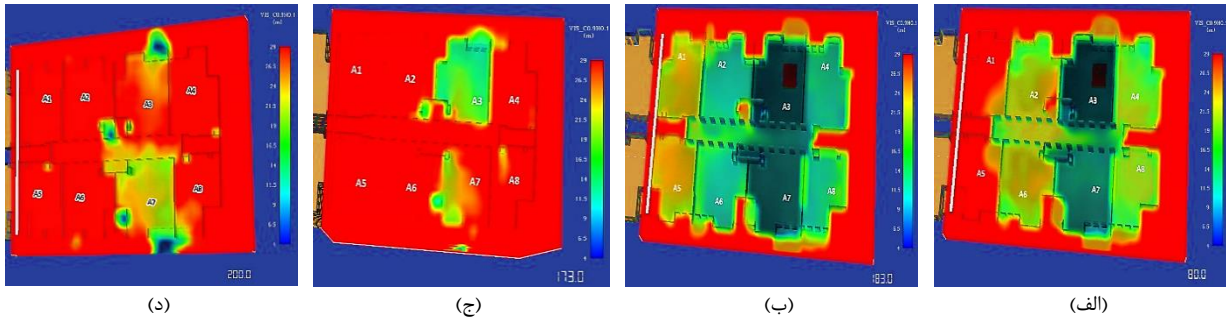
در شکل های ۱۳ تا ۱۶ نتایج حاصل از شبیه سازی انجام گرفته در FDS برای سناریو های شماره ۲، ۳، ۵ و ۷ آورده شده است. در شکل های ۱۸ و ۲۰ نتایج SmokeView به دست آمده مربوط به سناریو ۷، نمایش داده شده است. مطابق شکل ۱۹، بالاترین میزان آزاد سازی گرما و حجم سوخت کلی در ثانیه ۱۰۰ اتفاق افتاده است که به ترتیب مقادیر ۱۲ kW و ۰,۰۰۰۶ kg در دو نمودار قابل مشاهده است. در شکل ۲۰، نمودارهای مربوط به

حسگرهای دود واقع در نقاط گوناگون ساختمان در سناریوی شماره ۷، ارائه شده است.

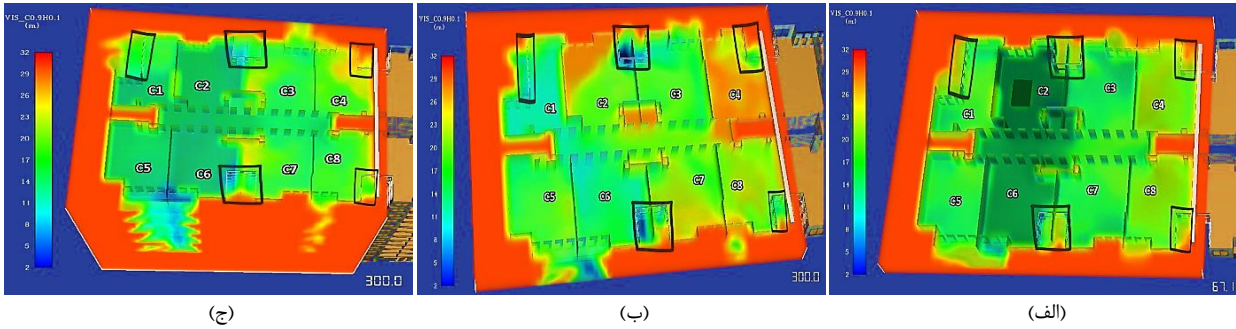
جدول ۷ - نتایج شبیه سازی هفت سناریوی ارزیابی انتشار دود برآمده از آتش سوزی

سناریو	زمان اجرا (دقیقه)	زمان شبیه سازی	گام های زمانی	هدف سناریو
۱	۲۹۴	۲۰۰ ثانیه	۲۴۴۴	بررسی نقش داکت و نورگیر در انتقال گازهای برآمده از دود به سایر طبقات
۲	۲۹۰	۲۰۰ ثانیه	۲۴۱۰	تمرکز بر روی عملکرد داکت ها در حرکت و انتشار دود در ساختمان
۳	۴۲۹	۳۰۰ ثانیه	۳۹۵۹	تمرکز بر روی عملکرد نورگیرها در حرکت و انتشار دود در ساختمان
۴	۴۳۹	۳۰۰ ثانیه	۳۶۰۰	تمرکز بر روی عملکرد دود بندها در حرکت و انتشار دود در ساختمان
۵	۴۳۷	۳۰۰ ثانیه	۳۶۰۰	بررسی نقش دود بند و نورگیر در انتقال گازهای برآمده از دود به سایر طبقات
۶	۱۲۶۸	۸۰۰ ثانیه	۹۶۱۱	بررسی وضعیت Backdraft با تمرکز بر روی عملکرد دود بندها (باز بودن)
۷	۱۴۲۵	۸۰۰ ثانیه	۹۷۰۴	بررسی وضعیت پدیده باز آفرستگی با تمرکز بر روی عملکرد دود بندها (بسته بودن)

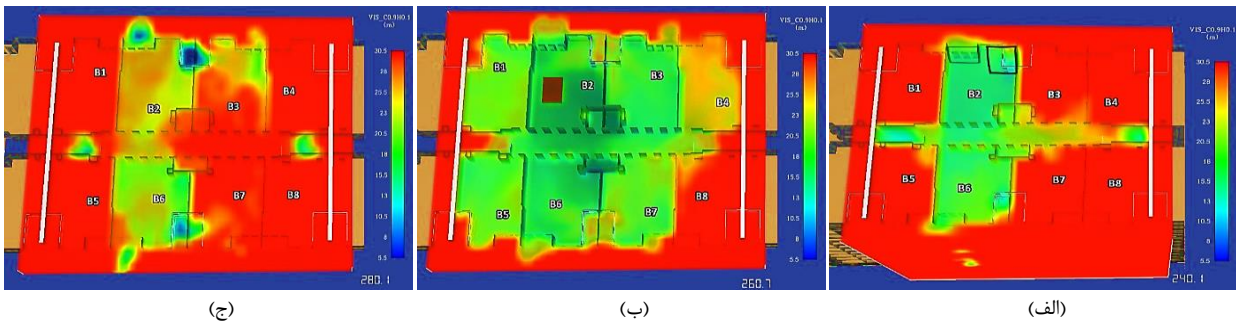
<sup>۱</sup> Time Step



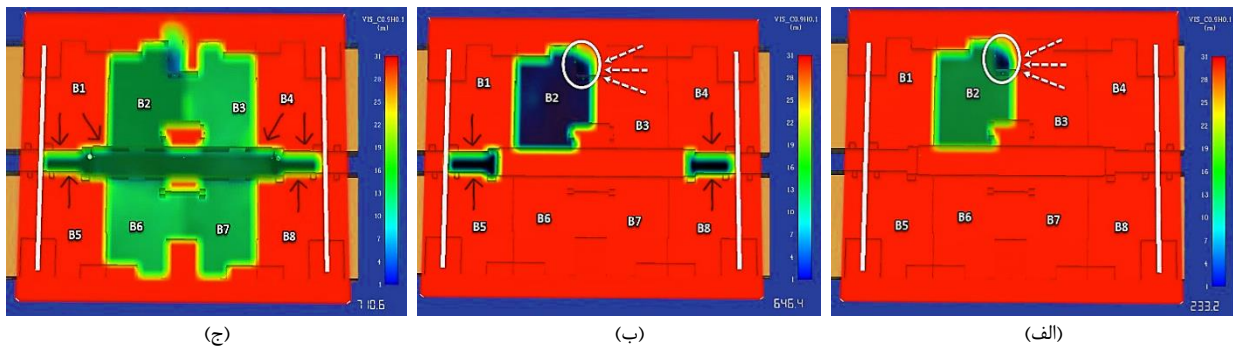
شکل ۱ - نتایج FDS حاصل از سناریو ۲، انتشار دود در (الف) طبقه ۱ پس از ۸۰ ثانیه؛ (ب) طبقه ۱ پس از ۱۸۳ ثانیه؛ (ج) طبقه ۱۲ پس از ۱۷۳ ثانیه؛ (د) طبقه ۲ پس از ۲۰۰ ثانیه



شکل ۲ - نتایج FDS حاصل از سناریو ۳، انتشار دود در (الف) طبقه ۴ پس از گذشت ۶۷ ثانیه؛ (ب) طبقه ۴ پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه؛ (ج) طبقه ۱۲ پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه



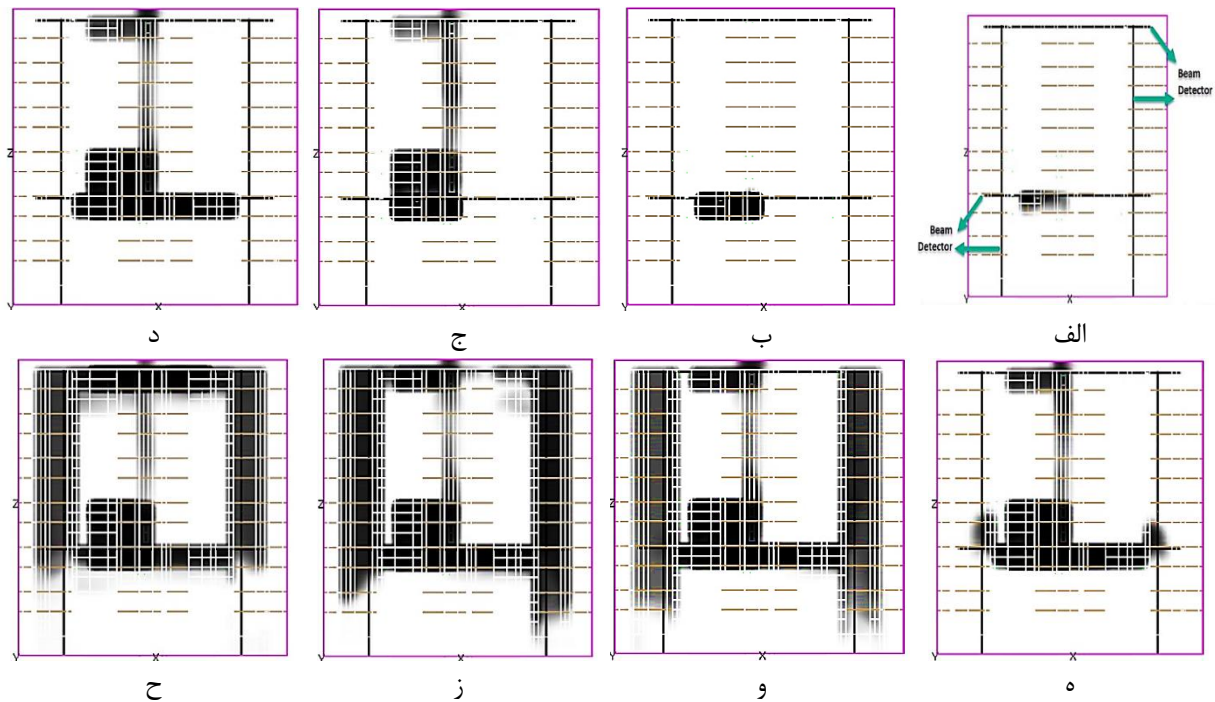
شکل ۳ - نتایج FDS حاصل از سناریو ۵، انتشار دود در (الف) طبقه ۱۲ پس از گذشت ۲۴۰ ثانیه؛ (ب) طبقه ۴ پس از گذشت ۲۶۱ ثانیه؛ (ج) طبقه ۵ پس از گذشت ۲۸۰ ثانیه



شکل ۴ - نتایج FDS حاصل از سناریو ۷، انتشار دود در (الف) طبقه ۶ پس از گذشت ۲۳۳ ثانیه؛ (ب) طبقه ۵ پس از گذشت ۶۴۶ ثانیه؛ (ج) طبقه ۱۲ پس از گذشت ۷۱۱ ثانیه



شکل ۵ - راهنمای مقادیر رنگی نتایج FDS (هر مقدار بیان کننده حداکثر فاصله (متر) است که در ناحیه رنگی مربوطه، امکان تشخیص یک شی وجود دارد).

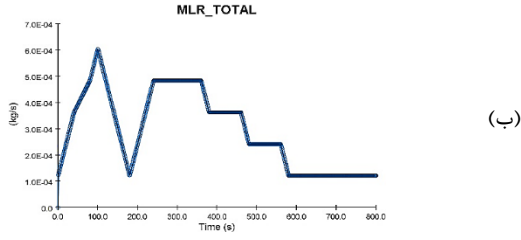


شکل ۶ - نتایج SmokeView سناریو ۷، وضعیت انتشار دود در طبقات ساختمان در ثانیه‌های (الف) ۱۰ و  $hrr=3.5 \text{ kW}$  (ب) ۷۵ و  $hrr=9.1 \text{ kW}$  (ج) ۱۷۵ و  $hrr=3.2 \text{ kW}$  (د) ۲۹۰ و  $hrr=9.6 \text{ kW}$  (ه) ۴۰۰ و  $hrr=2.4 \text{ kW}$  (و) ۳۹۰ و  $hrr=7.2 \text{ kW}$  (ز) ۵۵۰ و  $hrr=4.8 \text{ kW}$  (ح) ۸۰۰ و  $hrr=2.4$

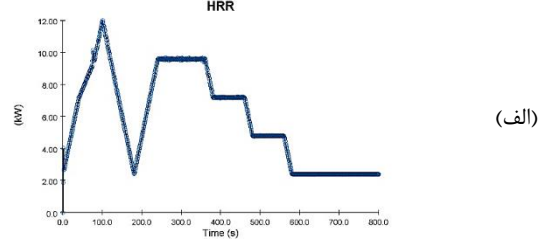
جدول ۸ - جزئیات حضور دود در قسمت‌های گوناگون ساختمان در سناریو ۷

محل اصلی انتشار دود: بلوک B - طبقه ۴ - واحد B2					
زمان (ثانیه)	مکان	طبقه	راه نفوذ	وضعیت (میزان خطر)	پیشامد
۷۴	نورگیرهای B2	۴	-	-	گشایش
۷۴	ابتدای B2	۵	نورگیر	کم	-
۸۵	ابتدای B2	۱۲	نورگیر	کم	-
۱۹۴	درب ورود/خروج B2	۴	-	-	گشایش
۲۳۳	تمام B2	۶	نورگیر	متوسط	-
۲۳۳	قسمت عمده B2	۵	نورگیر	زیاد	-
۲۸۴	دود بند	۴	-	-	گشایش
۲۸۴	رسیدن پشت دود بند	۵	نورگیر	کم	-
۲۹۳	رسیدن پشت دود بند	۸ و ۷، ۶	نورگیر	کم	-
۳۰۱	رسیدن پشت دود بند	۹	نورگیر	کم	-
۳۰۳	رسیدن پشت دود بند	۳	نورگیر	کم	-
۳۰۵	رسیدن پشت دود بند	۲	نورگیر	کم	-
۳۰۶	رسیدن پشت دود بند	۱۰	نورگیر	کم	-
۳۱۱	رسیدن پشت دود بند	۱۱	نورگیر	کم	-
۳۱۳	رسیدن پشت دود بند	۱	نورگیر	کم	-
۳۱۴	رسیدن پشت دود بند	۱۲	نورگیر	کم	-
۵۱۹	دود بند	۱۲	-	-	گشایش
۵۴۹	درب ورود/خروج B2، B3، B6 و B7	۱۲	-	-	گشایش
۵۴۹	راه‌پله‌ها	۳ و ۲، ۱	-	-	حرکت و انتقال دود به سمت بالا
۶۰۰	کل	۲ و ۱	-	-	عاری از دود
۶۴۶	تمام B2	۶ و ۵	نورگیر	زیاد و متراکم	-
۷۱۰	تمام راهرو و راه‌پله	۱۲	نورگیر، راه‌پله و درب	زیاد	-
۷۱۰	تمام B2، B3، B6 و B7	۱۲	نورگیر، راه‌پله و درب	متوسط و متراکم	-

شکل ۲۰ - سناریو ۷، نمودارهای مربوط به حسگرهای نقطه‌ای واقع در (الف) نزدیکی دود بند طبقه ۴؛ (ب) نزدیکی دود بند طبقه ۱۲؛ (ج) نزدیکی نورگیر طبقه ۳؛ (د) نزدیکی نورگیر طبقه ۱۲؛ (ه) نزدیکی نورگیر طبقه ۴؛ (و) نزدیکی نورگیر طبقه ۱۵؛ (ز) نزدیکی نورگیر طبقه ۶؛ (ح) نزدیکی نورگیر طبقه ۱۲؛ (ط) Door Visibility واقع در نزدیکی دود بند طبقه ۴؛ (ی) Door Visibility واقع در نزدیکی دود بند طبقه ۱۲. دود بند طبقه ۱۲؛ و حسگرهای خطی بکار گرفته‌شده در (ک) راهرو طبقه ۱۲؛ (ل) راهپله سمت چپ از طبقه ۱ تا طبقه ۱۲.

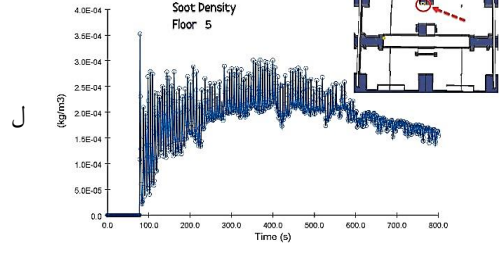
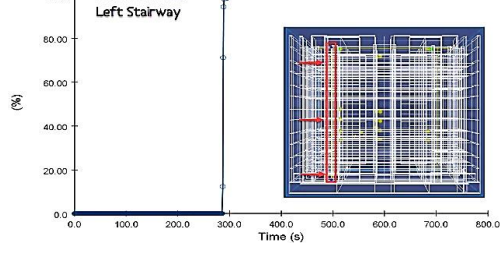
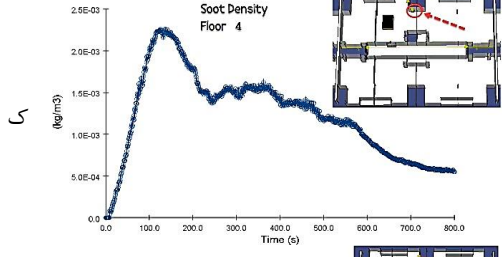
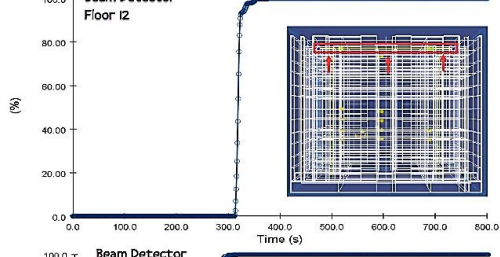
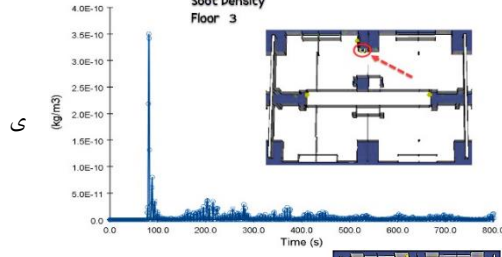
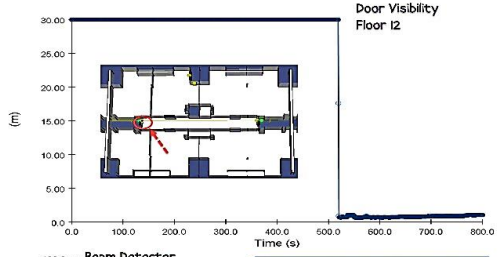
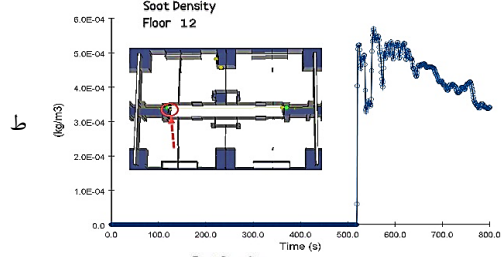
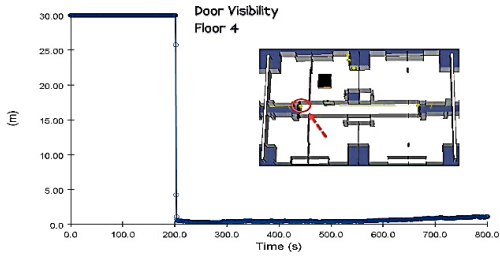
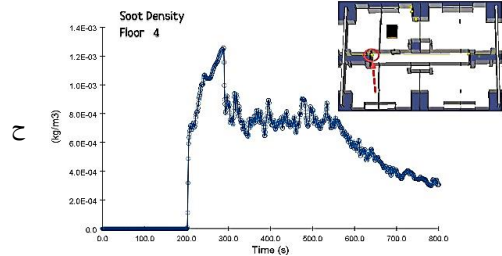
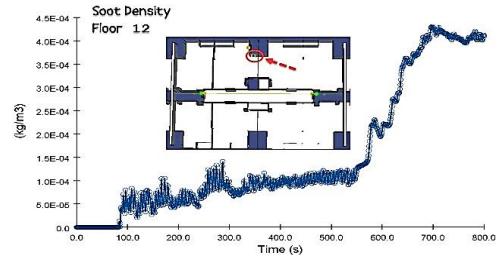
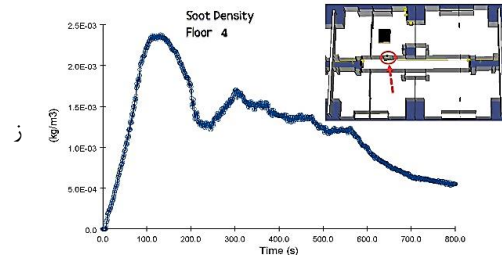
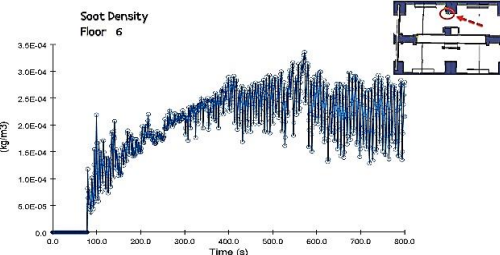


(ب)



(الف)

شکل ۷ - سناریو ۷، نمودارهای مربوط به (الف) نرخ گرمای آزاد شده (ب) نرخ آزادسازی حجمی سوخت کلی در واحد زمان



#### ۳-۴- نتایج سناریوهای شبیه سازی انتشار دود

با توجه به نتایج حاصل از سناریوهای ۱ و ۲، دود در کمتر از ۳۰ ثانیه از طریق داکت به طبقه آخر می‌رسد. این موضوع اهمیت بسته بودن داکت‌های بکار رفته در ساختمان را بیان می‌کند. باز بودن نورگیرهای ساختمان سبب گردید دود به طبقات بالا نفوذ کند و علاوه بر تحت تأثیر قرار دادن قسمت‌های بیشتری از ساختمان، غلظت دود در این نواحی را نیز افزایش دهد. از طرف دیگر، با بسته بودن نورگیرها دود در مدت‌زمان تقریبی ۶ دقیقه، تمام واحدها و راهرو طبقه اصلی وقوع آتش را فراگرفت.

سناریوهای ۳ و ۵، تأثیر نورگیرها در انتقال و انتشار دود به طبقات بالا را روشن‌تر نمایش دادند؛ چراکه حتی در وضعیت بسته بودن داکت‌ها، انتقال دود به طبقات بالا و انتشار آن در سطح هر طبقه، همچنان با سرعت قابل‌ملاحظه‌ای انجام گرفت.

وجود یا عدم وجود دود بندها نیز در گسترش و انتشار دود در راه‌پله‌های مجاور آن‌ها، مؤثر تعیین گردید. نتایج شبیه‌سازی سناریو ۴ بیان می‌کند که در فاصله زمانی ۴۰ ثانیه پس از شروع آتش‌سوزی، گازهای سمی انتشار دود از طریق راه‌پله به طبقه آخر رسیده‌اند.

عملکرد راه‌های انتقال دود در داخل و خارج ساختمان را می‌توان در نتایج حاصل از سناریوهای ۶ و ۷، به‌وضوح مشاهده کرد. پس از محبوس ماندن دود در یک واحد از ساختمان، ناگهان نورگیرهای آن طبقه فرومی‌ریزد و گازهای سمی در عرض ۲ دقیقه واحدهای مشابه در طبقات بالای خود (که نورگیرهای آن‌ها باز است) را بشدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. درنهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریو ۷ ضرورت وجود دود بند در ابتدای ورودی طبقات را آشکار ساخت؛ چراکه تا هنگام بسته ماندن دود بندها، دود در راه‌پله‌ها حرکت می‌کند و وارد طبقه‌ی دیگری نمی‌شود.

#### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

تولید مدل سه‌بعدی از یک ساختمان بلندمرتبه با بهره‌گیری از داده‌های دوبعدی تفکیک آپارتمان، نخستین هدف این تحقیق بود؛ داده‌هایی که به‌آسانی و با کمترین هزینه در دسترس هستند و با به‌کارگیری برخی از ابزارها و فنون در سامانه‌های اطلاعات مکانی، این امکان فراهم گردید که با استفاده از این داده‌ها، مدل سه‌بعدی

ساختمان با جزئیات مناسب برای شبیه‌سازی گسترش دود برآمده از وقوع آتش، پیاده‌سازی شود. فرایند اتخاذشده در این تحقیق، امکان استفاده پلان دوبعدی طبقات در جهت تولید مدل سه‌بعدی ساختمان در سطح جزئیات LoD4 را فراهم آورد.

شبیه‌سازی انتشار دود در مدل سه‌بعدی ساختمان و تحت هفت سناریو، تأثیر و اهمیت راه‌های انتقال دود، چه در داخل و چه در خارج از ساختمان، بر روی انتشار گازهای سمی برآمده از آن را نشان داد. نتایج به‌دست‌آمده، بیانگر آن است که اطمینان از بسته بودن داکت‌ها، یکی از عوامل کنترل‌کننده انتشار دود به سایر طبقات است. همچنین وضعیت نورگیرها، تأثیر شایانی در انتقال و انتشار گازهای سمی به طبقات بالا دارد. از طرف دیگر دود بندها به‌عنوان مانعی جهت گسترش دود در سطح طبقات، به‌ویژه پس از اتفاق افتادن پدیده باز فروختگی، نقش بسزایی دارد. نورگیرها، دود بندها و داکت‌ها از مهم‌ترین مسیرهای مستعد جهت انتشار دود در ساختمان‌های بلندمرتبه به شمار می‌آیند.

اگرچه داده‌های نقشه‌های تفکیک آپارتمان‌های کاداستر، قابلیت مناسبی در ایجاد مدل سه‌بعدی ساختمان دارد، ولیکن این داده‌ها با کاستی‌هایی مواجه‌اند. قسمت مربوط به بافت خطوط (جدول) با فقدان اطلاعاتی همچون ضخامت دیوارها، جنس<sup>۱</sup> مواد بکار رفته شده، مکان دقیق اجزا (درب و پنجره) بر روی دیوارها و غیره روبرو است. این موارد در نتایج شبیه‌سازی انتشار دود تأثیرگذار هستند و لذا توسعه یک مدل سه‌بعدی ساختمان حاوی اطلاعات جزئی‌تر در خصوص مشخصات و مواد بکار رفته در دیوارها و بخش‌های گوناگون ساختمان، لازم است در تحقیقات آینده، موردتوجه قرار گیرد.

همچنین استفاده از نتایج شبیه‌سازی انتشار دود، می‌تواند در کاربردهای گوناگون، از جمله مدلسازی تخلیه اضطراری در هنگام وقوع آتش‌سوزی در ساختمان، همراه با دخیل نمودن سایر اطلاعات از جمله تعداد و مشخصات ساکنین در بخش‌های گوناگون ساختمان و همچنین کاربری هر واحد در ساختمان، در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد. کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی چندعامله می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در تحقیقات آتی مد نظر قرار گیرد.

<sup>۱</sup> Material



## تقدیر و تشکر

و مساعدت سازمان ثبت اسناد و املاک کشور، حاصل شد که از همکاری این عزیزان کمال تشکر را داریم.

داده‌های دوبعدی تفکیک آپارتمان مورد استفاده در این تحقیق، با همکاری صمیمانه جناب آقای مهندس شاکری

## مراجع

- [1] Craig, W.J. and S.A. Elwood, How and why community groups use maps and geographic information. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1998. 25(2): p. 95-104.
- [2] Gröger, G., et al., OpenGIS city geography markup language (CityGML) encoding standard, version 1.0. 0. 2008.
- [3] Stadler, A. and T.H. Kolbe. Spatio-semantic coherence in the integration of 3D city models. in *Proceedings of the 5th International ISPRS Symposium on Spatial Data Quality ISSDQ 2007 in Enschede, The Netherlands, 13-15 June 2007*. 2007.
- [4] Preka, D. and A. Doulamis, 3D BUILDING MODELING IN LOD2 USING THE CITYGML STANDARD. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016. 42.
- [5] Steinmann, R., A. Krek, and T. Blaschke. Analysis of online public participatory GIS applications with respect to the differences between the US and Europe. in *Proceedings of Urban Data Management Symposium*. 2004.
- [6] Wu, H., Z. He, and J. Gong, A virtual globe-based 3D visualization and interactive framework for public participation in urban planning processes. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010. 34(4): p. 291-298.
- [7] El-Mekawy, M., Integrating BIM and GIS for 3D city modelling: The case of IFC and CityGML. 2010, KTH.
- [8] Jazayeri, I., Trends in 3D land information collection and management. 2012, Centre for Spatial Infrastructures, Land Administration, Department of ....
- [9] Różycki, S., Trójwymiarowe modele miast–tworzenie i zastosowania. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 2007. 17.
- [10] Klejnberg, H., The use of three-dimensional visualisations of spatial development plans in public consultations. *Man Environ*, 2010. 34: p. 27-42.
- [11] Tsiliakou, E., T. Labropoulos, and E. Dimopoulou. Transforming 2D cadastral data into a dynamic smart 3D model. in *Int Arch Photogrammetry, Remote Sensing Spat Inf Sci, ISPRS 8th 3DGeoInfo conference and WG II/2 workshop*. 2013.
- [12] Baig, S.U. and A.A. Rahman, A three-step strategy for generalization of 3D building models based on CityGML specifications. *GeoJournal*, 2013. 78(6): p. 1013-1020.
- [13] Kobes, M., et al., Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*, 2010. 45(1): p. 1-11.
- [14] Ronchi, E. and D. Nilsson, Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research. *Fire science reviews*, 2013. 2(1): p. 7.
- [15] de Vries, D.A., Emerging issues in high-rise building egress. *Fire Protection Engineering*, 2006. 31: p. 16.
- [16] Lay, S., Alternative evacuation design solutions for high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2007. 16(4): p. 487-500.
- [17] Association, N.F.P., NFPA 92: standard for smoke control systems. 2012, Quincy: National Fire Protection Association.
- [18] NFPA, NFPA 204 guide for smoke and heat venting-1998 edition. 1998, National Fire Protection Association.
- [19] Huang, H., et al., Optimum design for smoke-control system in buildings considering robustness using CFD and Genetic Algorithms. *Building and Environment*, 2009. 44(11): p. 2218-2227.
- [20] Black, W., Smoke movement in elevator shafts during a high-rise structural fire. *Fire Safety Journal*, 2009. 44(2): p. 168-182.
- [21] He, Q., et al. CFD simulation of smoke spread through elevator shafts during fires in high rise buildings. in *ASME 2015 international mechanical engineering congress and exposition*. 2015. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

- [22] DeHaan, J.D. and D.J. Icove, Forensic fire scene reconstruction. 2003: Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- [23] Hadjisophocleous, G., Z. Fu, and G. Lougheed. A computational and experimental study of smoke movement in a 10-storey building using a two-zone model. in InterFlam 2001: 9 th International Fire Science & Engineering Conference. 2001.
- [24] Li, X., et al., Effects of Fire Barriers on Building Fire Risk-A Case Study Using CURisk. Procedia Engineering, 2016. 135: p. 445-454.
- [25] Cheng, H. and G.V. Hadjisophocleous, Dynamic modeling of fire spread in building. Fire Safety Journal, 2011. 46(4): p. 211-224.
- [26] Yin, X., P. Wonka, and A. Razdan, Generating 3d building models from architectural drawings: A survey. IEEE computer graphics and applications, 2008. 29(1): p. 20-30.
- [27] Barki, H., et al., BIM models generation from 2D CAD drawings and 3D scans: an analysis of challenges and opportunities for AEC practitioners. Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations, 2015. 149: p. 369-380.
- [28] Ding, Y., et al., Extrusion Approach Based on Non-Overlapping Footprints (EABNOF) for the construction of geometric models and topologies in 3D cadasters. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017. 6(8): p. 232.
- [29] Litwin, U., M. Pluta, and B. Mitka, Improving the Perception in Urban Planning by 3D Modelling and 3D Visualization. Land Ownership and Land Use Development: he Integration of Past, Present, and Future in Spatial Planning and Land Management Policies, 2017: p. 209.
- [30] Lo, S., et al., A CFD study of buoyancy effects on smoke spread in a refuge floor of a high-rise building. Journal of Fire Sciences, 2002. 20(6): p. 439-463.
- [31] Black, W., Pressurization of Floors to Improve Life Safety During a High-Rise Fire. ASHRAE Transactions, 2009. 115(2).
- [32] Black, W., COSMO—Software for designing smoke control systems in high-rise buildings. Fire Safety Journal, 2010. 45(6-8): p. 337-348.
- [33] WZ Black PhD, P., Computer modeling of stairwell pressurization to control smoke movement during a high-rise fire. ASHRAE Transactions, 2011. 117: p. 786.
- [34] Walton, G. and W. Dols, CONTAMW 2.4 user manual. Gaithersburg, MD, USA, National Institute of Standards and Technology, 2008. 286.
- [35] Ferreira, M.J. and S.M. Strege, Smoke Management Systems. 2005: US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of ....
- [36] Klote, J.H., Smoke management applications of CONTAM/Discussion. ASHRAE Transactions, 2002. 108: p. 827.
- [37] Wang, L.L., W.Z. Black, and G. Zhao, Comparison of Simulation Programs for Airflow and Smoke Movement during High-Rise Fires. ASHRAE Transactions, 2013. 119(2).
- [38] Wang, Y., G. Hadjisophocleous, and E. Zalok, Smoke movement in multi-storey buildings using CUsMOke. Safety science, 2013. 52: p. 13-27.
- [39] Wang, Y., A study of smoke movement in multi-storey buildings using experiments and computer modelling. 2008, Carleton University.
- [40] Hadjisophocleous, G. and Z. Fu, Development and case study of a risk assessment model CURisk for building fires. Fire Safety Science, 2005. 8: p. 877-887.
- [41] Zhao, G., T. Beji, and B. Merci, Study of FDS simulations of buoyant fire-induced smoke movement in a high-rise building stairwell. Fire Safety Journal, 2017. 91: p. 276-283.
- [42] Zhong, M., et al., Experimental study on fire smoke movement in a multi-floor and multi-room building. Science in China Ser. E Engineering & Materials Science, 2005. 48(3): p. 292-304.
- [43] Currie, I.G., Fundamental mechanics of fluids. 2016: CRC press.
- [44] McGrattan, K., et al., Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model. NIST special publication, 2013. 1018(1): p. 175.
- [45] McGrattan, K., et al., Fire dynamics simulator user's guide. NIST special publication, 2013. 1019(6).
- [46] Kolbe, T.H., G. Gröger, and L. Plümer, CityGML: Interoperable access to 3D city models, in Geo-information for disaster management. 2005, Springer. p. 883-899.

- [47] Ying, S., et al. The conversion from CityGML to 3D property units. in Proceedings of 4th International Workshop on 3D Cadastres. The 4rd International Workshop on FIG 3D Cadastre Workshop. Dubai, Unit Arab Emirates. 2014.
- [48] Gröger, G. and L. Plümer, CityGML–Interoperable semantic 3D city models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012. 71: p. 12-33.
- [49] Benner, J., et al. Enhanced LOD concepts for virtual 3D city models. in ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Proceedings of the ISPRS 8th 3D GeolInfo conference & WG II/2 workshop. 2013.
- [50] Bandrova, T. and S. Bonchev. 3D Maps–Scale, Accuracy, Level of Detail. in Proceedings of the 26th international cartographic conference. 2013.
- [51] Biljecki, F., et al., Formalisation of the level of detail in 3D city modelling. Computers, Environment and Urban Systems, 2014. 48: p. 1-15.
- [52] Ma, T. and J. Quintiere, Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations. Fire Safety Journal, 2003. 38(5): p. 467-492.
- [53] Friday, P., Comparison of FDS model predictions with FM/SNL fire test data. 2001., 2001.
- [54] Hietaniemi, J. and E. Mikkola, Design fires for fire safety engineering. Technical Research Centre, Helsinki, Finland, 2010.