

بررسی مدل‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی در ساختمان‌ها

علیرضا صادقیان^۱، بابک امیدوار^۲، اسماعیل صالحی^۳

۱. نویسنده مسئول: کارشناس ارشد مدیریت در سوانح طبیعی، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، ایران.

Email:sadeghian0105@ut.ac.ir

۲. دانشیار دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، ایران.

۳. دانشیار دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، ایران.

دریافت: ۹۱/۱۰/۲۳ پذیرش: ۹۲/۹/۱

چکیده

مقدمه: آتش‌سوزی یکی از مهم‌ترین مباحث تأثیرگذار در هر سه مقوله ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست است. استفاده از روش‌های مناسب ارزیابی ریسک آتش‌سوزی با شناسایی خطرات موجود و به‌کارگیری اقدامات فنی و مدیریتی لازم برای کنترل یا کاهش احتمال وقوع حوادث و اثرات آنها خسارات مختلف ناشی از حریق را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. لذا این تحقیق بر آن است، با بررسی و مقایسه مدل‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی شرایط استفاده از مدل‌ها را مشخص کند.

روش: به منظور دستیابی به هدف اصلی تحقیق، ابتدا مدل‌های موجود ارزیابی ریسک آتش‌سوزی شناسایی و سپس، با استفاده از روش تحلیلی-توصیفی به بررسی این مدل‌ها و کاربرد آنها پرداخته شد.

یافته‌ها: با توجه به نتایج بررسی‌های انجام شده، در مدل‌های مبتنی بر روش‌های ارزیابی ریسک - هزینه همچون مهندسی ریسک و ایمنی زیست‌محیطی^۱، ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه^۲ و

سیستم ارزیابی ریسک آتش‌سوزی^۳، به دلیل پیچیدگی و عدم شناخت کافی از پدیده آتش‌سوزی و رفتار انسانی، فرضیات معینی در نظر گرفته شده است. بنابراین، از آنجا که این مدل‌ها برای ارزیابی مقایسه‌ای و انتخاب یک سیستم ایمنی مقرون به صرفه در برابر آتش‌سوزی در نظر گرفته می‌شوند، نمی‌توانند برای ارزیابی مطلق ریسک آتش‌سوزی استفاده شوند. در ضمن، حوزه مدل محاسبه شاخص‌های ریسک با روش‌های شبیه‌سازی^۴ محدود به ساختمان‌های مسکونی دو طبقه است و لذا کاربرد این مدل در ساختمان‌های پیچیده منوط به رعایت ضوابط احتیاطی بیشتر است. در نهایت دشواری‌های موجود در توسعه و بسط اصطلاحات تحلیلی مناسب و فاکتورهای عدم قطعیت، از جمله چالش‌های مطرح در استفاده از روش ارزیابی ریسک کمی لوند می‌باشند.

نتیجه‌گیری: در تحقیق حاضر، مدل‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی بررسی شد. بر این اساس، مدل‌های توسعه یافته برای ساختمان‌های خاص، فقط در همان ساختمان‌ها قابل استفاده هستند و به سادگی امکان بسط به ساختمان‌های دیگر را ندارند. این موضوع عمدتاً به علت فرض‌های ساده و ساده‌سازی‌های است که در کدهای کامپیوتری انجام می‌گیرد. موضوع مهم دیگر، میزان پذیرش روش‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی برای طرح‌های ایمن در برابر آتش‌سوزی است. دلایل این امر، مشکل اعتبار کامل مدل‌ها و کمبود دانش و تکنولوژی آموزش این مدل‌ها به طراحان و بازرسان است.

کلمات کلیدی: آتش‌سوزی، ساختمان، ارزیابی ریسک آتش‌سوزی، مدل‌های ارزیابی ریسک.

³ Fire Evaluation and Risk Assessment System (FIERA System)

⁴ Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP)

¹ Centre for Environmental Safety and Risk Engineering (CESARE)

² Fire Risk Evaluation and Cost Assessment Model (FIRECAM)

مقدمه

تعریف ریسک از یک منطقه به منطقه دیگر و حتی در میان اعضای یک منطقه متغیر است. واتز و هال^۱ (۱) از این تعریف برای ریسک استفاده کرده‌اند: «ریسک، پتانسیل ایجاد پیامدهای ناخواسته و مضر برای زندگی، سلامتی، اموال یا محیط‌زیست است». میچم^۲ (۳ و ۲)، تعریف جامعی از ریسک آتش‌سوزی ارائه می‌دهد که آن عبارت است از «ریسک آتش‌سوزی ناخواسته در یک موقعیت نامعین که در آن ممکن است چیزهای با ارزش از جمله جان، اموال، کسب و کار، میراث یا محیط‌زیست از بین برود یا دچار زیان شود». بنابراین تجزیه و تحلیل ریسک آتش‌سوزی در یک ساختمان عبارت خواهد بود از فرایند درک و مشخص کردن خطر آتش‌سوزی در یک ساختمان، پیامدهای ناخواسته‌ای که ممکن است از یک آتش‌سوزی به وجود آید، و احتمال آتش‌سوزی و نتایج ناخواسته‌ای که به وقوع می‌پیوندد (۲). اما هزینه‌های محافظت در برابر آتش‌سوزی تقریباً مشخص است و می‌تواند مانند دیگر هزینه‌های ساختمان محاسبه گردد، لیکن محاسبه سود آن بسیار سخت است (۵).

لذا به منظور افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری طرح‌های محافظت در برابر آتش‌سوزی، یک روند جهانی برای تغییر از آیین‌نامه‌های تجویزی به آیین‌نامه‌های عملکرد-محور وجود دارد. آیین‌نامه‌های عملکرد-محور شامل یک سری اهداف ایمنی آتش، ملزومات کارکردی سیستم‌ها یا اجزای ایمنی آتش و روش‌های دستیابی به این اهداف

است. برای تسهیل انتقال از آیین‌نامه‌های تجویزی به آیین‌نامه‌های عملکرد-محور، معمولاً این آیین‌نامه‌ها دارای مفادی لازم‌الاجرا هستند که روش‌هایی برای فراهم کردن راه‌حل‌های قابل قبول براساس راه‌حل‌های تجویزی هستند. برخلاف آیین‌نامه‌های تجویزی مزایای آیین‌نامه‌های عملکرد-محور این است که موجب افزایش انعطاف‌پذیری، برابری و بهره‌وری می‌شوند (۱۰، ۹، ۴). در طرح‌های ایمنی در برابر آتش‌سوزی عملکرد-محور، باید یک معیار عددی معین از ایمنی در برابر آتش‌سوزی در طراحی ساختمان لحاظ شود. انتخاب طبیعی برای این معیار، ریسک آتش‌سوزی جانی یا مالی است. بنابراین ارزیابی ریسک آتش‌سوزی می‌تواند نقش مهمی در طرح جلوگیری از بروز آتش‌سوزی اجرا-محور داشته باشد (۵). از طرفی آمار نشان می‌دهد که قریب ۷۵ تا ۸۰ درصد آتش‌سوزی‌ها قابل پیش‌بینی و پیشگیری هستند (۸). از این رو، استفاده از روش‌های مناسب ارزیابی ریسک آتش‌سوزی از طریق شناسایی خطرات موجود و به‌کارگیری اقدامات فنی و مدیریتی لازم برای کنترل و یا کاهش احتمال وقوع حوادث و اثرات آنها می‌تواند خسارات مختلف ناشی از حریق را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. بنابراین هدف از این تحقیق ارزیابی انواع مدل‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و مقایسه آنها و بررسی شرایط استفاده از هر یک از مدل‌هاست.

روش تحقیق

به منظور دستیابی به هدف اصلی تحقیق، ابتدا مدل‌های موجود ارزیابی ریسک آتش‌سوزی شناسایی شد. سپس با استفاده از روش تحلیلی-

^۱Watts & Hall^۲Meacham

کرد. جزء اول شامل ایجاد درخت واقعه^۲ برای شرح شرایط ساختمان است. با در نظر گرفتن وقوع هر سناریو، از مدل‌های قطعی^۳ برای محاسبه محیط پیرامون، تخلیه و واکنش ساکنان و تعداد تلفات احتمالی استفاده می‌شود. بنابراین ریسک جانی ساکنان در یک سناریوی آتش‌سوزی از روی تلفات جانی مربوط به آن سناریو، ضرب در احتمال وقوع آن مشخص می‌شود. کل ریسک جانی مورد انتظار^۴ از آتش‌سوزی‌ها برای یک ساختمان برابر با مجموع ریسک جانی مورد انتظار برای تمامی سناریوها در طول عمر مفید مورد انتظار برای ساختمان است. به طور مشابه، کل هزینه مورد انتظار آتش‌سوزی^۵ برابر است با جمع تمام سرمایه‌گذاری‌ها در سیستم ایمنی آتش‌سوزی به اضافه خسارت به اموال مورد انتظار ساختمان در طول عمر مفید ساختمان. مجزا کردن ریسک جانی و هزینه‌های حفاظتی به منظور جلوگیری از مشکل تخصیص ارزش پولی به جان انسانی و فراهم کردن امکان مقایسه مجزای ریسک و هزینه‌ها صورت می‌گیرد (۱۳، ۱۴).

مدل ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه شورای تحقیقات ملی^۶ کانادا با همکاری سازمان کارهای عمومی و خدمات دولتی کانادا یک برنامه کامپیوتری ایجاد کرده به نام مدل ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه، که می‌تواند برای مشخص کردن طرح‌های مقرون به صرفه ایمنی در برابر آتش‌سوزی در آپارتمان‌ها و ساختمان‌های

توصیفی به بررسی مدل‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و کاربرد آنها پرداخته شد. در این تحقیق از مدل‌های ارزیابی ریسک مختلفی بهره گرفته شد که عبارتند از: مدل مهندسی ریسک و ایمنی زیست-محیطی، مدل ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه و سیستم ارزیابی ریسک آتش‌سوزی که در استرالیا و کانادا توسعه یافته، مدل محاسبه شاخص‌های ریسک با روش‌های شبیه‌سازی و روش ارزیابی ریسک کمی^۱ که در انگلیس و دانشگاه لوند سوئد توسعه پیدا کرده اند.

مدل مهندسی ریسک و ایمنی زیست‌محیطی

این مدل، یک مدل ارزیابی ریسک است که توسط مرکز مهندسی ریسک و محیط‌زیست در استرالیا به وجود آمده است تا عملکرد سیستم ایمنی آتش‌سوزی ساختمان را محاسبه کند (۶). توسعه این مدل با اجرای آیین‌نامه اجرا-محور ساختمان استرالیا (BCA, 1996) مرتبط است که اولین مجموعه از مقررات اجرا-محور بود که باید به طور تدریجی در هر ایالت یا منطقه اتخاذ می‌شد (۱۱). BCA96 براساس چهار سطح سلسله مراتبی استوار است که شامل اهداف، بیانیه‌های کارکردی، ملزومات اجرایی و قوانین حسن انجام کار و روش‌های تأیید آن می‌باشد. از این روش‌های تأیید می‌توان برای اثبات اینکه راه‌حل جایگزین با ملزومات اجرایی سازگار است استفاده کرد.

این مدل بر این اصل استوار است که مدل‌سازی پیشرفت و گسترش آتش در یک ساختمان و تعامل آن با خروج ساکنان را می‌توان به دو جزء تقسیم

^۱Quantitative Risk Analysis (QRA)

^۲ Event Tree

^۳Deterministic Models

^۴Expected Risk to Life (ERL)

^۵Fire Cost Expectation (FCE)

^۶The National Research Council in Canada (NRCC)

این مدل ارزیابی، به عنوان ابزاری طراحی شده است که می‌توان از آن برای انجام طرح‌های مهندسی حفاظت در برابر آتش‌سوزی اجرا-محور استفاده کرد.

سیستم ارزیابی ریسک آتش‌سوزی، گزینه‌های محاسباتی مختلفی را ارائه می‌دهد که به کاربر امکان استفاده از همبستگی‌های مهندسی استاندارد، اجرای زیر مدل‌ها به صورت جداگانه، انجام تجزیه و تحلیل خطر، یا انجام تجزیه و تحلیل ریسک را می‌دهد. همبستگی‌های مهندسی استاندارد مجموعه-ای از مدل‌ها و معادلات نسبتاً ساده است که برای انجام سریع محاسبات ساده مهندسی حفاظت در برابر آتش‌سوزی از قبیل روش‌های محاسبه نواحی عمومی گسترش آتش‌سوزی، دینامیک دود، حرکت دود، خروج، شدت آتش‌سوزی و احتراق اشیای مجاور استفاده می‌شود. در این مدل، با اجرای فقط یک زیر مدل مانند مدل آشکارساز به طور مجزا، می‌توان یک بخش از سیستم حفاظتی را ارزیابی کرد. به علاوه، با استفاده از مدل‌های ارائه شده در این سیستم می‌توان تجزیه و تحلیل کاملی از خطر یا ریسک انجام داد.

مدل محاسبه شاخص‌های ریسک با روش‌های شبیه‌سازی

این مدل، ابزاری برای ارزیابی ریسک آتش‌سوزی براساس مدل‌های شبیه‌سازی و روش‌های مونت کارلو در پایگاه تحقیقات آتش‌سوزی توسعه یافته می‌باشد. این مدل شامل مکانیزم‌های نشان‌دهنده فرایندهای فیزیکی و شیمیایی گسترش آتش‌سوزی و نیز رفتار افرادی است که سعی در فرار از آتش‌سوزی دارند. از روش‌های آماری مونت کارلو

اداری به کار رود این مدل سطح ایمنی مورد نظری را فراهم می‌کند که مطابق با ملزومات آیین‌نامه ساختمان کانادا می‌باشد (۱۹).

مفهوم اصلی مدل ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه از کار "بک" در استرالیا نشأت گرفته است. این مدل، تعداد تلفات مورد انتظار و خسارت آتش‌سوزی برای هر سناریو را محاسبه می‌کند. این مقادیر در پایان با احتمالات وقوع سناریوها ترکیب می‌شود تا دو پارامتر تصمیم‌گیری زیر به دست آید: (۱) ریسک جانی مورد انتظار، که به عنوان تعداد تلفات مورد انتظار در طول عمر مفید ساختمان تقسیم بر جمعیت ساختمان و عمر مفید ساختمان تعریف شده است.

(۲) هزینه آتش‌سوزی مورد انتظار که به عنوان کل هزینه مورد انتظار آتش‌سوزی تعریف شده است که برابر با جمع کل هزینه‌های سیستم حفاظتی فعال و غیر فعال، هزینه حفظ و نگهداری سیستم‌های حفاظتی فعال، خسارات مورد انتظار حاصل از احتمال گسترش آتش‌سوزی در ساختمان تقسیم بر هزینه ساختمان و تمام محتویات آن می‌باشد.

این مدل ارزیابی، شامل تعدادی زیر مدل است که تعامل دینامیکی بین پیشرفت آتش‌سوزی، گسترش دود، واکنش ساکنان و مداخله آتش‌نشانی را شبیه‌سازی می‌کند.

مدل سیستم ارزیابی ریسک آتش‌سوزی

این سیستم، یک مدل کامپیوتری جدید است که در شورای تحقیقات ملی در کشور کانادا ایجاد شده تا سیستم‌های حفاظتی آتش‌سوزی در ساختمان‌های صنعتی را با تأکید بر انباری‌ها و آشیانه هواپیماها محاسبه کند.

نتایج ارزیابی خطرپذیری اجتماعی معمولاً به صورت منحنی فراوانی^۱ تعداد تلفات یا پروفایل ریسک در نمودار لگاریتمی است. از این منحنی فراوانی برای مقایسه طرح راه‌حل‌های متفاوت با یکدیگر و یا تعیین سازگاری یک طرح با سطوح ریسک قابل قبول استفاده می‌شود. ریسک قابل قبول را می‌توان به عنوان خط مرزی در منحنی فراوانی تعریف کرد که معمولاً همراه با یک ناحیه خاکستری است که در ریسک قابل قبول است، اما ترجیحاً باید کاهش یابد. مقیاس دیگر برای ارائه نتایج ریسک اجتماعی تبدیل اطلاعات در پروفایل ریسک به عدد است. میانگین ریسک اجتماعی امکان انجام مقایسه بین طرح‌های مختلف را آسان می‌کند. میانگین ریسک اساساً مجموع احتمالات و پیامدها در تمامی زیرسناریوهاست.

بحث

پس از بررسی مدل‌های مذکور، زیر مدل‌های هر یک از روش‌های فوق استخراج و نقاط قوت و ضعف هر کدام به تفصیل بررسی شد، که در ادامه توضیح داده می‌شود.

مدل مهندسی ریسک و ایمنی زیست‌محیطی

الف) روش احتمالاتی: در این مدل، درخت واقعه تشکیل می‌شود تا شرایط ساختمان را توضیح دهد. اما اگر تمام عوامل مؤثر بر ایمنی آتش‌سوزی یک ساختمان را در نظر بگیریم، تعداد سناریوها بی‌نهایت خواهد بود. برای حل این مشکل، این مدل فقط عوامل خیلی مهم را لحاظ می‌کند که تعداد تلفات جانی را به طرز معنی‌داری تحت تأثیر قرار می‌دهد.

برای برخورد با پارامترهای تصادفی استفاده می‌شود. زیرمدل‌های نشان‌دهنده اشیای فیزیکی شامل اتاق‌ها، درب‌ها، آشکارسازها، مبلمان، لایه‌های دود گرم و افراد است. ویژگی‌های تصادفی شامل شرایط اولیه مانند باز یا بسته بودن درها و پنجره‌ها، تعداد، نوع و محل افراد در ساختمان، محل آتش‌سوزی و نوع ماده سوختنی می‌شود. معمولاً خروجی مطالعات به شکل یک توزیع، نشان‌دهنده خسارت آتش‌سوزی یا تعداد تلفات است. با استفاده از این مدل، امکان بررسی ریسک برای ساکنان در شرایط گوناگون وجود دارد (۱۲،۵).

روش ارزیابی ریسک کمی لوند

دانشگاه لوند برای ارزیابی ریسک آتش‌سوزی دو روش ارزیابی ریسک کمی استاندارد و ارزیابی ریسک کمی توسعه‌یافته را بسط داده است. ارزیابی ریسک کمی استاندارد، بیشترین کاربرد را در شرح ریسک در صنایع تولیدی، زیرساخت‌ها و همچنین در زمینه مهندسی ایمنی آتش‌سوزی دارد، اما به عنوان بخشی از یک سیستم جامع ارزیابی ریسک آتش‌سوزی مانند ایمنی در تونل‌های خط آهن استفاده می‌شود. ارزیابی ریسک کمی استاندارد به طور صریح شامل تجزیه و تحلیل نامعلوم‌ها نمی‌شود. برای بررسی تأثیر نامعلوم‌ها در احتمالات یا متغیرها باید از ارزیابی ریسک کمی توسعه‌یافته استفاده کرد. مزیت استفاده از روش‌های ارزیابی ریسک کمی این است که تعداد زیادی از حوادث را می‌توان بررسی کرد. به علاوه، در روش ارزیابی ریسک کمی توسعه‌یافته عدم قطعیت ذاتی هر متغیر به طور هم‌زمان بررسی می‌شود (۷، ۱۰، ۳۲).

¹Frequency-number Curve

این عوامل مهم در شش گروه شرایط ساختمان، آغازگرهای آتش، محتوای ساختمان، پروفایل ساکنان، شرایط ساکنان و آتش‌نشانی دسته‌بندی شده‌اند. در حال حاضر سه نوع آتش‌سوزی از جمله سوختن و دود کردن^۱، آتش‌سوزی بدون شعله^۲ و آتش‌سوزی با شعله^۳ بررسی می‌شود.

یک نکته مشکل‌ساز این است که آتش، اساساً فرایندی تصادفی است. شکست یک مانع تا زمانی که آتش نمایان نشده معلوم نخواهد شد، درحالی‌که، شکست یک مانع در افزایش آتش‌سوزی مؤثر است. در آتش‌سوزی‌های از نوع سوختن و دود کردن، و آتش‌سوزی بدون شعله، فرض بر این است که آتش از اتاقی که در آن آتش‌سوزی صورت گرفته به بیرون انتشار نمی‌یابد. بنابراین درخت واقعه برای سناریوی آتش‌سوزی حالت ثابتی دارد. اما در آتش‌سوزی‌های شعله‌دار، درخت واقعه برای سناریوها به دلیل گسترش آتش می‌تواند تغییر کند. سناریوهای اولیه برای آتش‌سوزی‌های بدون شعله مانند سناریوهای آتش‌سوزی‌های شعله‌دار است، که در آن شرایط بازبودن درها و نشکستن موانع در نظر گرفته می‌شود. به هر حال، در حالت شکست مانع، برخی سناریوهای اضافی در نظر گرفته می‌شوند. در مهندسی ریسک و ایمنی زیست‌محیطی، از یک مدل شکست مانع وابسته به زمان برای پیش‌بینی احتمال و زمان شکست مانع استفاده می‌شود (۱۵). در تلاش برای بیان ماهیت ذاتی فرایند تصادفی، از ساختار دینامیکی برای نشان دادن درخت واقعه برای سناریوهای آتش‌سوزی استفاده می‌شود. یعنی،

درخت واقعه با شکست موانع یا گسترش آتش‌سوزی تغییر می‌یابد.

ژائو و بک^۴ (۱۶) روشی را توضیح می‌دهند که برای ساختن ساختار دینامیکی سناریوهای آتش‌سوزی ساختمان‌های عمومی به کار می‌رود. برای وارد کردن تاثیر توزیعی متغیرهای غیروابسته، مانند بار سوخت، روی شدت آتش‌سوزی، مهندسی ریسک و ایمنی زیست‌محیطی از یک روش سه‌مفهومی برای آپارتمانی که آتش‌سوزی در آن به وقوع پیوسته استفاده می‌کند. در این روش، مقادیر انتخابی برای هر متغیر تصادفی مطابق با μ و σ $\pm 1.2\sigma$ انتخاب می‌شود که در آن μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار متغیر تصادفی هستند. ثابت شده است که تخمین سه-مفهومی میزان خطا را در مقایسه با روش تک-مفهومی تا حد زیادی کاهش می‌دهد. متغیر تصادفی شدت آتش‌سوزی، از قبل با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو با در نظر گرفتن توزیع تمامی پارامترهای ورودی مشخص شده است. به علاوه، در مدل رفتار انسانی، مهندسی ریسک و ایمنی زیست‌محیطی از روش واکنش مورد انتظار استفاده می‌کند تا تعداد تلفات را محاسبه کند. مزیت این روش این است که تعداد سناریوهای رفتار انسانی صرف نظر از تعداد سرنخ‌ها همیشه یکی است.

ب) مدل‌های پیشرفت آتش و گسترش دود: مدل مهندسی ریسک و ایمنی زیست‌محیطی از مدل پیشرفت آتش‌سوزی شورای تحقیقات ملی کانادا استفاده می‌کند که به دلیل ویژگی سادگی، کارایی و قدرتمندی آن است (۱۷). پیش‌بینی‌های حاصل از

¹Smoldering

²Flaming non-Flashover

³Flaming Flashover

⁴Zhao & Beck

دنبال خروج از ساختمان هستند. به هر حال این روش حرکت می‌تواند با شرایط دود تغییر کند که می‌تواند ساکنان را مجبور به جست‌وجوی مسیرهای خروجی دیگری کند. در صورت نبود این خروجی‌ها، ساکنان سعی می‌کنند به آپارتمان‌های خود بازگردند.

از آنجا که ساکنان دارای پارامترهای واکنشی متفاوتی از قبیل احتمالات، طول مدت واکنش و سرعت واکنش هستند، با استفاده از اطلاعات آماری جمعیت استرالیا، ساکنان به چند گروه تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین با شناخت اهمیت سن، استفاده از مواد مخدر و الکل و معلولیت‌های حرکتی در تلفات ناشی از آتش‌سوزی، گروه‌بندی‌های بیشتری تعریف شده‌اند. شرایط ساکنان در سه حالت سکون، سیار و ناتوان یا مرگ تعریف شده است.

ت) مدل آتش‌نشانی: برای تعیین تأثیر آتش‌نشانی، شورش‌های آتش‌نشانی استرالیا، یک مدل مداخله آتش‌نشانی^۲ توسعه داده است. این مدل که به عنوان یک درخت واقعه شناخته می‌شود، برای تخمین زمان ورود آتش‌نشانی به محفظه اصلی آتش‌سوزی، به عنوان تابعی از اعلام زمان و روش‌های عملیاتی، وجود منابع و قابلیت‌ها استفاده می‌شود. به علاوه، عملیات‌هایی مانند کنترل و اطفای حریق، جست‌وجو و نجات نیز به عنوان تابعی از شرایط آتش‌سوزی، تعداد و توزیع ساکنان به دام افتاده، روش عملیاتی آتش‌نشانی، قابلیت و در دسترس بودن منابع، مدل‌سازی می‌شوند.

مدل پیشرفت آتش این شورش‌های تحقیقات با نتایج تجربی به دست آمده از شرایط مختلف آتش‌سوزی مانند سوختن با دود کردن و آتش‌سوزی با شعله مقایسه شده است. اصلاحاتی در مدل این شورش‌های تحقیقات در نظر گرفته شده است تا فاصله میان نتایج مورد انتظار و سنجیده شده را کم کند.

این مرکز یک مدل گسترش دود در ساختمان‌های مسکونی بزرگ به نام مدل CESARE-SMOKE با استفاده از مفهوم منطقه و روش شبکه‌ای ساخته است (۱۸). این مدل با مدل پیشرفت آتش‌سوزی شورش‌های تحقیقات ملی کانادا ترکیب شده تا حرکت دود به هر محفظه در یک ساختمان را پیش‌بینی کند.

پ) مدل رفتار انسانی: هدف مدل رفتار انسانی^۱ CESARE، تخمین تعداد افراد در محل‌های مختلف یک ساختمان آپارتمانی در ساعات مختلف در هنگام حادثه آتش‌سوزی است. این مدل شامل یک زیر مدل واکنش است که به رفتار ساکنان تا هنگام تخلیه می‌پردازد که با ترک ساکنان از آپارتمان آغاز می‌شود در واقع این یک زیر مدل تخلیه است که به حرکت ساکنان در ساختمان توجه دارد. مدل واکنش انسانی به همراه مدل‌های پیشرفت آتش و گسترش دود برای تخمین تجمعی وابسته به زمان در معرض قرارگیری ساکنان به مواد سمی و اثرات گرمایی استفاده می‌شوند.

زیر مدل تخلیه، یک مدل شبکه‌ای دینامیکی است که برای تخمین توزیع فضایی تعداد ساکنان مورد انتظار به عنوان تابعی از زمان به کار می‌رود. فرض بر این است که وقتی ساکنان، آپارتمان را ترک می‌کنند به

²Fire Brigade Intervention Model (FBIM)

¹CESARE-Human Behavior Model

می‌شود. درهای محل آتش‌سوزی ممکن است باز یا بسته باشد.

احتمال وقوع هر طرح آتش‌سوزی، با فرض اینکه آتش‌سوزی رخ داده است، بر اساس داده‌های آماری است. مثلاً، در کانادا آمار نشان می‌دهد که در ۲۴ درصد تمامی آتش‌سوزی‌های ادارات، آتش شعله‌ور شده و به آتش‌سوزی کاملاً توسعه یافته‌ای تبدیل می‌شود، ۵۴ درصد آتش‌سوزی‌ها به حد شعله‌ور شدن نمی‌رسند و ۲۲ درصد دیگر، دود کردن و سوختن بدون آتش گرفتن هستند که به مرحله شعله‌ور شدن نمی‌رسند (۲۱). اگر آب‌پاش نصب شده باشد، مدل چنین فرض می‌کند که برخی آتش‌سوزی‌های همراه با شعله و بدون شعله، بسته به قابلیت اطمینان و بهره‌وری سیستم آب‌پاشی، منجر به مرگ نمی‌شوند.

ب) مدل گسترش آتش‌سوزی و حرکت دود: این مدل، توسعه شش نوع طرح آتش‌سوزی را در محل اصلی آتش‌سوزی پیش‌بینی می‌کند. این مدل یک مدل تک منطقه‌ای می‌باشد که سرعت اشتعال، دمای اتاق، و تولید و تراکم گازهای سمی را به عنوان تابعی از زمان محاسبه می‌کند. با این محاسبات، این مدل زمان وقوع پنج رخداد مهم را مشخص می‌کند: زمان نشانه آتش‌سوزی، زمان فعال شدن آشکارساز دود، زمان فعال شدن آشکارساز حرارت یا آب‌پاش، زمان شعله‌ور شدن آتش‌سوزی و زمان تمام شدن آتش‌سوزی. این مدل همچنین میزان دبی جرمی، دما، و غلظت گازهای دی‌اکسیدکربن و منواکسیدکربن در گازهای گرم خروجی محفظه آتش‌سوزی را محاسبه می‌کند که این گازها در مدل حرکت دود برای محاسبه گسترش آتش‌سوزی در

ث) عملکرد موانع: برای تخمین عملکرد وابسته زمانی موانع تحت شرایط آتش‌سوزی واقعی، مدل CESARE-FIRE Barrier ساخته شده است تا زمان و احتمال خرابی (شکست) موانع را تخمین بزند. از زیر مدل‌های جبری وابسته به زمان، شدت آتش‌سوزی، واکنش ساختاری-حرارتی و معیار خرابی برای تخمین زمان شکست یک مانع در سناریوی آتش‌سوزی و شرایط بارگذاری واقعی استفاده می‌شود. از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای انجام آزمایشات شبیه‌سازی عددی چندگانه برای مشخص کردن اینکه آیا شکست مانع رخ می‌دهد یا نه استفاده می‌شود. از این اطلاعات برای تخمین احتمال تراکمی زمان شکست استفاده می‌شود.

مدل ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه

الف) روش احتمالاتی: همان‌طور که در بالا شرح داده شد، این مدل، عملکرد ایمنی آتش‌سوزی یک طرح را براساس دو پارامتر تصمیم‌گیری ارزیابی می‌کند: ریسک جانی مورد انتظار و هزینه مورد انتظار آتش‌سوزی، مدل ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه با استفاده از شش طرح آتش‌سوزی در محل اصلی آتش‌سوزی، و گسترش آتش‌سوزی و دود برای ارزیابی ریسک جانی و هزینه‌های حفاظت از آپارتمان‌ها و ساختمان‌های اداری استفاده می‌کند. این شش طرح، طیف وسیعی از انواع آتش‌سوزی، ترکیب سه حالت آتش‌سوزی و دو حالت برای درهای محل اصلی آتش‌سوزی را در بر می‌گیرد. این سه نوع آتش‌سوزی شامل سوختن و دود کردن، آتش‌سوزی بدون شعله، و آتش‌سوزی با شعله

برابر آتش‌سوزی را با حمله گرمایی یک آتش‌سوزی واقعی مقایسه می‌کند تا احتمال شکست المان را محاسبه کند. حمله آتش در آتش‌سوزی‌های واقعی بر اساس بار آتش‌سوزی، منطقه آتش‌سوزی و دریاچه‌های تهویه استوار است.

مدل‌های گسترش آتش‌سوزی احتمال گسترش آتش‌سوزی به هر نقطه از ساختمان را براساس احتمال شکست المان‌های مرزی و مؤثر بودن آتش‌نشانی محاسبه می‌کند. این مدل غیر وابسته به زمان است که در آن فرض می‌شود گسترش آتش‌سوزی به هر نقطه از ساختمان در زمان پایان آتش‌سوزی در منطقه آتش‌سوزی رخ دهد.

ت) مدل‌های واکنش ساکنان و تخلیه: این مدل، احتمال واکنش ساکنان در قسمت‌های مختلف ساختمان را محاسبه می‌کند. این مدل از مفهوم حالت‌های آتش‌سوزی و فریم‌های زمانی استفاده می‌کند. حالت‌های آتش‌سوزی زمان‌های به وقوع پیوستن رخداد‌های مهم در هنگام گسترش آتش‌سوزی هست. پنج حالت آتش‌سوزی متفاوت وجود دارد: نشانه آتش‌سوزی، فعال شدن آشکارساز دود، فعال‌شدن آشکارساز حرارت، آتش‌سوزی شعله‌دار و پایان آتش‌سوزی. احتمال واکنش بر اساس هشدارهای دریافتی از نشانه آتش‌سوزی، هشدار دهنده‌های محلی، هشدار دهنده‌های مرکزی، هشدار دهنده‌های صوتی، هشدارهای دیگران و هشدارهای آتش‌نشانان محاسبه می‌شود (۲۸).

ث) مدل‌های واکنش و عملیات اداره آتش‌نشانی: این مدل، مؤثر بودن آتش‌نشانی و امداد و نجات را بر اساس زمان رسیدن اداره آتش‌نشانی، زمان

سراسر ساختمان به عنوان تابعی از زمان استفاده خواهند شد. به علاوه، گسترش آتش‌سوزی بر اساس احتراق نوع سوخت، کف پلی‌اتان برای ساختمان‌های مسکونی و قسمت‌های چوبی برای ساختمان‌های اداری محاسبه خواهد شد (۱۷).

این مدل حرکت دود، گسترش آتش‌سوزی و گازهای سمی به قسمت‌های مختلف ساختمان را به عنوان تابعی از زمان محاسبه می‌کنند. این مدل همچنین زمان بحرانی را که راه‌پله‌ها غیر قابل تصرف هستند، محاسبه می‌کند. این زمانی است که ساکنان باقی مانده که ساختمان را تخلیه نکرده‌اند نمی‌توانند از راه‌پله‌ها برای تخلیه استفاده کنند و به عنوان افرادی که در ساختمان گیر کرده‌اند تلقی می‌شوند. این مدل همچنین خطر دود (احتمال مرگ به دلیل گازهای سمی) در هر قسمت ساختمان را در زمان ورود آتش‌نشانی محاسبه می‌کند. اگر پاسخی از سوی آتش‌نشانی دریافت نشود، این مدل خطر دود را در زمان پایان آتش‌سوزی در محفظه آتش‌سوزی محاسبه می‌کند (۲۲).

پ) مدل‌های شکست المان مرزی و گسترش آتش‌سوزی: این مدل‌ها، احتمال شکست المان‌های مرزی (مانند دیوار، کف ساختمان، و در) در یک ساختمان را هنگام قرار گرفتن در معرض طرح آتش‌سوزی شعله‌دار محاسبه می‌کند که ممکن است در یک ساختمان رخ دهد. ویژگی‌های طرح آتش‌سوزی شعله‌دار از طریق مدل گسترش آتش‌سوزی به دست می‌آید. این مدل بر پایه مفهوم بار گرمایی نرمال شده استوار است. این مدل حمله گرمایی روی المان مرزی در تست میزان مقاومت در

شعله‌ور شدن که با استفاده از مدل گسترش آتش محاسبه می‌شود و منابع آتش‌نشانی که به صحنه رسیده‌اند محاسبه می‌کند. میزان مؤثر بودن امداد و نجات بعدها در مدل تخلیه برای کاهش تعداد ساکنان گیر افتاده در ساختمان و مقدار مؤثر بودن آتش‌نشانی در مدل گسترش آتش‌سوزی برای کاهش احتمال گسترش آتش استفاده شوند.

ج) مدل‌های اقتصادی و هزینه: مدل برآورد هزینه آتش‌سوزی، برآورد کل هزینه آتش‌سوزی را با استفاده از سرمایه و هزینه‌های حفظ و نگهداری سیستم‌های حفاظتی به دست آمده از مدل اقتصادی، برآورد خسارات آتش‌سوزی برای هر سناریوی به دست آمده از مدل خسارت اموال، و احتمال وقوع هر سناریو از مدل طرح آتش‌سوزی محاسبه می‌کند. برای یک سناریوی آتش‌سوزی خاص، میزان خسارت احتمالی آتش‌سوزی با ضرب کردن خسارات ناشی از آتش‌سوزی در احتمال وقوع آن سناریو محاسبه می‌شود. این مقدار به دست آمده به هزینه سیستم‌های حفاظتی و هزینه‌های سالیانه ساختمان و طرح سیستم حفاظتی افزوده شده و با هزینه سازه ساختمان و محتوای آن نرمالیزه می‌شود تا برآورد هزینه آتش‌سوزی به دست آید.

ح) مدل‌های خطرات جانی: مدل تعداد تلفات مورد انتظار، احتمال تلفات جانی در هر قسمت از ساختمان را بر اساس مقادیر خطرات دود به دست آمده از مدل حرکت دود و مقادیر گسترش آتش‌سوزی به دست آمده از مدل گسترش آتش‌سوزی محاسبه می‌کند. در این مدل، ریسک جانی در صورت وجود سرپناه در نزدیکی مانند بالکن که ساکنان می‌توانند برای جلوگیری از خطر

استفاده کنند کاهش می‌یابد. بنابراین، این مدل تعداد تلفات جانی مورد انتظار برای هر سناریو را بر اساس جمعیت باقیمانده در ساختمان که از مدل تخلیه به دست آمده و مقادیر احتمالی تلفات جانی محاسبه می‌کند. از تعداد تلفات مورد انتظار در مدل ریسک جانی مورد انتظار برای برآورد ریسک جانی کل استفاده می‌شود.

مدل سیستم ارزیابی ریسک آتش‌سوزی

الف) مدل‌های گسترش آتش و حرکت دود: در حال حاضر مدل‌های موجود در این سیستم برای سناریوهای آتش‌سوزی انبار مایعات، آتش‌سوزی انبار کالا، و آتش‌سوزی‌های T شکل می‌باشد. هر یک از مدل‌های گسترش آتش‌سوزی مقادیر مشخص‌کننده آتش‌سوزی (میزان حرارت آزاد شده، دما، و تشعشعات حرارتی شار گرمایی) را به عنوان توابع زمانی در نظر می‌گیرد.

تشعشعات حرارتی شار گرمایی در یک آتش‌سوزی استخری با ارتفاع یک متری از زمین در فواصل مختلف با استفاده از مدل آتش‌سوزی جامدات مودان و کروس^۱ (۲۴) استفاده می‌شود. ارتفاع یک متری به دلیل نمایش نصف ارتفاع یک فرد انتخاب شده است. در هر مرحله زمانی، تشعشع گرمایی در بیرون هر یک از حلقه‌های قرار گرفته از مرکز اتاق واقع شده در مرکز آتش‌سوزی محاسبه می‌شود. از این تشعشعات گرمایی در مدل خطرات جانی برای محاسبه احتمال مرگ ناشی از قرارگرفتن در معرض تشعشعات گرمایی استفاده می‌شود (۲۵).

مدل حرکت دود، یک مدل دو منطقه‌ای برای محاسبه تولید و گسترش دود در محفظه آتش‌سوزی

¹The Solid Flame Model of Mudan & Croce

نشان‌دهنده قابلیت وسایل اطفای حریق اتوماتیک برای خاموش کردن سناریوی آتش‌سوزی مورد بررسی است وارد کند. از این مقدار برای اصلاح میزان انتشار گرمای آتش، قطر، تشعشعات حرارتی شار گرمایی و دمای دود استفاده می‌شود.

پ) شکست المان ساختمان: زمان شکست المان‌های سازه‌ای و موانع در ساختمان با استفاده از مدل شکست المان ساختمان تخمین زده می‌شود. این برنامه می‌تواند این زمان را برای تیرها و ستون‌های فولادی، دال‌های بتنی، تیرها و ستون‌های چوبی، کف‌ها و دیوارهای دارای قاب چوبی محاسبه کند. در این محاسبات از همبستگی‌های استاندارد مهندسی حفاظت در برابر آتش‌سوزی یا روش‌های عددی مانند مدل‌های انتقال حرارت تفاضل محدود برای برخی المان‌های سازه‌ای استفاده می‌کند. خروجی این مدل‌ها شامل زمان مورد انتظار شکست المان یا موانع و در برخی حالت‌ها تنش تسلیم و مدول‌های الاستیک در دماهای بالاست. از زمان پیش‌بینی شکست المان‌های ساختمانی در مدل گسترش آتش‌سوزی برای محاسبه گسترش آتش‌سوزی از محل اصلی آتش‌سوزی به قسمت‌های دیگر ساختمان استفاده می‌شود.

ت) واکنش و کارایی اداره آتش‌نشانی: این مدل برای مشخص کردن واکنش مورد انتظار و زمان مداخله اداره آتش‌نشانی به کار می‌رود که با استفاده از زمان مورد انتظار برای اعلام، اعزام و آمادگی، طی مسیر و استقرار محاسبه می‌شود. این محاسبات بر اساس عواملی مانند سناریوهای آتش‌سوزی انتخاب شده توسط کاربر و زمان فعال شدن آشکارسازها در

در یک ساختمان است. برای هر یک از این دو منطقه، معادلات دیفرانسیل بر اساس جرم، انرژی و حفاظت اجزای حل شده و بر اساس (داده‌های) ورودی کاربر در معرض شرایط مرزی و اولیه قرار می‌گیرند. این معادلات فرایند احتراق، جریان تخلیه، حرکت دود، و هدایت، همرفت و انتقال تشعشعات گرمایی را مد نظر قرار می‌دهد. خروجی این زیر مدل اطلاعاتی در مورد دما و غلظت لایه‌های دود و تراکم اجزا در ساختمان فراهم می‌کند. تشعشعات حرارتی شار گرمایی لایه دود در هر بخش از ساختمان نیز با این مدل محاسبه می‌شود (۲۶).

ب) مدل‌های کارایی آشکارسازی و اطفای حریق: زمان فعال شدن آشکارسازهای حرارتی، آشکار سازهای دود، و آب‌پاش‌ها با استفاده از مدل آشکارساز آتش‌سوزی مشخص می‌شود. از همبستگی‌های مهندسی استاندارد برای پیش‌بینی دما و سرعت در قسمت‌های مختلف دود آتش‌سوزی، جت (فواره) سقفی، و لایه دود استفاده می‌شود. بنابراین از این اطلاعات برای محاسبه دمای تمامی المان‌های آشکارسازی در زمان خاص استفاده می‌شود. از دمای وابسته زمانی هر المان آشکارساز برای تعیین زمان فعال شدن هر آشکارساز گرمایی و آب‌پاش در محل استفاده می‌شود. از اطلاعات لایه دود برای پیش‌بینی زمان فعال شدن آشکارساز دود در محل استفاده می‌شود (۲۷).

مدل اطفای حریق تأثیر سیستم‌های اطفای حریق اتوماتیک را روی آتش‌سوزی در ساختمان محاسبه می‌کند. در این مدل لازم است که کاربر مقدار کارایی اطفای حریق را که بین ۰ و ۱ است و

ج) مدل‌های خطر جانی و تعداد تلفات مورد انتظار: مدل خطر جانی مدل سیستم ارزیابی ریسک آتش‌سوزی، احتمال وابسته زمانی مرگ ساکنان در یک محفظه را به دلیل اثرات قرارگرفتن در معرض شار گرمایی بالا و گازهای سمی یا گرم محاسبه می‌کند. مدل خطر جانی از داده‌های دیگر مدل‌های سیستم ارزیابی ریسک آتش‌سوزی استفاده می‌کند که شار گرمایی (مدل‌های گسترش آتش و حرکت دود) و ترکیب دمایی و شیمیایی گازهای گرم (مدل حرکت دود) را توضیح می‌دهند (۲۹).

احتمال وابسته زمانی مرگ به دلیل قرار گرفتن در معرض تشعشعات حرارتی بالای شار گرمایی در یک قسمت از یک محفظه با استفاده از حاصل جمع شارهای حرارتی آتش‌سوزی (محاسبه شده به وسیله مدل حرکت دود) و لایه دود گرم (به دست آمده از مدل حرکت دود) محاسبه می‌شود. از مدل اصلاح شده آسیب‌پذیری تساو و پری^۱ (۳۰) برای محاسبه احتمال مرگ در اثر داده‌های شار گرمایی استفاده می‌شود. احتمال مرگ بر اثر استنشاق گازهای سمی با همان روش که در اصل برای مدل ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه ایجاد شده بود محاسبه می‌شود.

مدل تعداد تلفات مورد انتظار، تعداد مرگ ساکنان مورد انتظار در هر قسمت یک محفظه در مدت زمان را در اثر قرار گرفتن در معرض تشعشعات حرارتی و گازهای گرم و سمی محاسبه می‌کند. این محاسبات بر اساس تعداد افراد باقی‌مانده در هر محفظه که به وسیله مدل تخلیه محاسبه شده و

ساختمان است. همچنین وجود هشداردهنده‌ها در ساختمان (و اتصال مستقیم آنها به اداره آتش‌نشانی)، واکنش ساکنان به نشانه‌های آتش‌سوزی و دیگر علامت‌های هشدار دهنده، موقعیت ساختمان نسبت به اداره آتش‌نشانی و پیش‌آمدگی نیز در محاسبات مد نظر قرار می‌گیرند.

با شروع فعالیت‌های اداره آتش‌نشانی، کارایی این فعالیت‌ها به وسیله مدل کارایی اداره آتش‌نشانی بر اساس اطلاعات گسترش آتش‌سوزی در زمان آغاز اطفای حریق و منابع موجود (مانند تجهیزات، آب و منابع انسانی) اداره آتش‌نشانی تخمین زده می‌شود. عواملی مانند ماهیت اداره آتش‌نشانی (مانند حرفه‌ای، داوطلبانه، یا ترکیبی از هر دو)، تجربه و آموزش آتش‌نشانان نیز در این محاسبات لحاظ می‌شوند.

ث) واکنش ساکنان و تخلیه: مدل‌های واکنش ساکنان و تخلیه برای رهگیری جابه‌جایی ساکنان در ساختمان در سناریوهای انتخاب شده بر اساس ویژگی‌های ساکنان که توسط کاربر وارد می‌شوند استفاده می‌شوند. این محاسبات فرایند آگاهی (آگاه‌شدن ساکنان از آتش‌سوزی به وسیله درک مستقیم علائم آتش‌سوزی، هشداردهنده‌ها و دیگران)، تفسیر (تصمیم‌گیری ساکنان برای واکنش) و واکنش (مانند زنگ زدن به آتش‌نشانی، کشیدن هشدار دهنده، شروع به تخلیه و غیره) را در نظر می‌گیرد. با واکنش نشان دادن ساکنان به آتش‌سوزی، زیر مدل حرکت آنها را بر اساس محل، ویژگی‌ها، گسترش آتش‌سوزی و حرکت دود محاسبه می‌کند (۲۸).

¹ The revised vulnerability model of Tsao and Perry

احتمال مرگ در آن محفظه که به وسیله مدل خطر جانی محاسبه شده است می‌باشد. در هر مرحله زمانی، تعداد تلفات مورد انتظار با ضرب ریسک مرگ در آن لحظه در تعداد افراد زنده باقیمانده در آن لحظه در ساختمان محاسبه می‌شود. تعداد کل تلفات برای هر سناریو آتش‌سوزی در مدل ریسک جانی مورد انتظار مورد استفاده قرار می‌گیرد، که همراه با احتمال وقوع هر سناریو برای محاسبه ریسک جانی مورد انتظار استفاده می‌شود.

مدل محاسبه شاخص‌های ریسک با روش‌های شبیه‌سازی

الف) روش احتمالاتی: ویژگی‌های تصادفی به دو دسته فرایندهای تصادفی و شرایط اولیه تصادفی تقسیم می‌شوند. در اصل هر پارامتری می‌تواند با توجه به میزان نامشخص بودن مقدار و حساسیت نتیجه کلی به این مقدار به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شود. این مدل به منظور پرداختن به آتش‌سوزی در خانه‌های بومی دو یا سه طبقه ساخته شده است. تمام آتش‌سوزی‌های ساختمان‌هایی از این نوع بر اساس اینکه آتش‌سوزی در کدام فصل سال و چه ساعتی از روز رخ داده، اتاق محل آتش‌سوزی، و نیز نوع ماده آتش گرفته به گروه‌های بیشتری تقسیم می‌شوند. برای هر تکرار شبیه‌سازی، سناریوی آتش‌سوزی به وسیله روش عدم قبول مونت کارلو² بر اساس چهار پارامتر معین می‌شود. نوع خانواده و محل‌های آشکارسازی دود واقعی برای هر شبیه‌سازی نیز با روش عدم قبول انتخاب می‌شود. پس از آنکه تمامی شرایط (داده‌های

احتمال مرگ در آن محفظه که به وسیله مدل خطر جانی محاسبه شده است می‌باشد. در هر مرحله زمانی، تعداد تلفات مورد انتظار با ضرب ریسک مرگ در آن لحظه در تعداد افراد زنده باقیمانده در آن لحظه در ساختمان محاسبه می‌شود. تعداد کل تلفات برای هر سناریو آتش‌سوزی در مدل ریسک جانی مورد انتظار مورد استفاده قرار می‌گیرد، که همراه با احتمال وقوع هر سناریو برای محاسبه ریسک جانی مورد انتظار استفاده می‌شود.

ح) مدل‌های اقتصادی و توقف عملکرد¹: مدل اقتصادی، هزینه‌ها و خسارات زیر را محاسبه می‌کند: کل هزینه احداث ساختمان، کل هزینه محتوای ساختمان، کل هزینه سیستم‌های حفاظتی، هزینه سالانه حفظ و نگهداری سیستم‌های حفاظتی و فعالیت‌های مربوط به آن، هزینه خسارت ساختمان و محتوای آن هنگام آتش‌سوزی. خسارت وارده به ساختمان و محتوای آن برای هر سناریو آتش‌سوزی با استفاده از اطلاعات زیرمدل‌های گسترش آتش‌سوزی و حرکت دود و حساسیت ساختمان و محتوای آن به وجود دود، گرما و آب که کاربر آنها را وارد می‌کند تخمین زده می‌شود. این تخمین خسارت همراه با اطلاعات هزینه برای تخمین ارزش خسارت اموال هر سناریو به کار می‌رود. همراه با احتمال وقوع هر سناریو مدل سیستم ارزیابی ریسک آتش‌سوزی برآورد کل هزینه آتش‌سوزی را انجام می‌دهد.

مدل توقف عملکرد مدت زمانی را که عملیات در ساختمان بعد از آتش‌سوزی متوقف خواهد شد را بر

² Monte Carlo rejection method

¹Economic and Downtime Models

ورودی تعریف شد، این مدل نحوه پیشرفت سناریو با زمان را تا زمان خاموش شدن آتش سوزی یا فرار ساکنان یا مرگ آنها پیش بینی می کند. شبیه سازی چندین بار تکرار می شود و توزیع تعداد تلفات در برابر فراوانی به دست می آید. میانگین تعداد تلفات، ریسک کلی را با فرض شروع آتش سوزی تعریف می کند. انتخاب سناریو به وسیله روش عدم قبول به طور اتوماتیک این اطمینان را می دهد که به سناریوهای رایج اهمیت بیشتری داده شده است (بیشتر شبیه سازی شده اند). معمولاً، برای تخمین میانگین با دقت بالا نیاز به تکرار زیاد (شبیه سازی) است. ممکن است که از بعضی روش های کاهش واریانس برای کاهش تعداد تکرارهای مورد نیاز استفاده کرد.

ب) روش های جبری^۱: مفهوم اصلی برنامه های شی گرا این است که ممکن است با یک سیستم به عنوان مجموعه ای از اشیاء برخورد شود که به روش های زیادی با یکدیگر تعامل می کنند. CRISP II یک مدل منطقه ای است که در آن هر منطقه با یک شی نمایش داده می شود. طبقه بندی اشیاء در این مدل عبارت از مبلمان، لایه های گاز گرم، لایه های گاز سرد، دریچه ها، دیوارها، اتاق ها، آشکارسازهای دود، آتش نشان و ساکنان می باشد. این اشیاء به طور خلاصه در زیر توضیح داده شده اند.

رفتار یک جسم آتش گرفته دارای سه مرحله است: تبدیل سوخت به حالت تجزیه شیمیایی، تبدیل سوخت تجزیه شده به محصولات آتش سوزی و تبدیل محصولات آتش سوزی به لایه های گرم با هوا

که با دود همراه می شود (۱۲). یک لایه گرم شامل دی اکسید کربن، منواکسید کربن، اکسیژن، گاز، دود و گرما است که به وسیله دود در هر آتش سوزی در اتاق انتقال می یابد. جرم نیز ممکن است بین لایه های گرم لایه های مجاور از طریق منفذها جریان یابند. گرمای لایه های گرم ممکن است از طریق انتقال حرارت از بین برود. دبی جرم^۲ از طریق یک منفذ (در یا پنجره) از طریق انتگرال گیری معادله برنولی در کل مساحت منفذ محاسبه می شود. میزان دبی فقط برای گازهای گرم محاسبه می شود در حالیکه در مورد دبی گازهای سرد چنین فرض می شود که کل حجم گاز در هر اتاق ثابت می ماند. شیشه پنجره های بسته در صورتی که اختلاف دما در دو طرف از ۹۰ درجه سانتیگراد بیشتر شود می شکند. گرمای لایه گرم به راحتی از طریق دیوارها که فرض می شود دارای ظرفیت گرمایی نامحدود باشند جذب می شود. سطح قابلیت تصرف یک اتاق نشان دهنده میزان نامطلوبیت یک ساکن باقی مانده در اتاق است که بین اعداد صحیح ۰ تا ۵ متغیر است. عوامل مؤثر بر سطح قابلیت تصرف شامل میزان تشعشعات، عمق لایه سرد، دما و تیرگی دود، و دشواری تنفس می شود. اگر چگالی نوری دود از حد آستانه گذشت، آشکارساز شروع به آژیر کشیدن می کند. بعد از اینکه آتش نشانان احضار شدند، زمان رسیدن و نصب تجهیزات آنان متغیر خواهد بود. بعد از این زمان، فرض بر این است که هر شخص باقیمانده در ساختمان نجات خواهد یافت. برای رفتار ساکنان، در ابتدا واکنش فیزیولوژیکی شان مورد توجه قرار می گیرد. میزان جذب ترکیبات سمی

² Mass flow¹Deterministic Models

زیادای زیرسناریو و احتمالات تک تک آنها منجر به برآورد احتمالی ریسک می‌شود. در ارزیابی ریسک کمی استاندارد، پیامدها و احتمالات سناریوها با توجه به هدف تجزیه و تحلیل می‌توانند به طور مجزا یا باهم به عنوان یک سیستم مورد بررسی قرار گیرند.

هر نتیجه نهایی در درخت واقعه دارای مجموعه پاسخ‌های خودش است که سه گانه کاپلان و گریک^۳ نامیده می‌شود و از سه متغیر (S_i, P_i, C_i) تشکیل شده است. کلمه S_i حادثه، P_i و C_i احتمال و پیامدهای زیرسناریوها را شرح می‌دهند. از ایده سه-گانه همچنین می‌توان برای موقعیت‌هایی که در آن متغیرها در معرض نامعلومات قرار دارند استفاده کرد. درخت وقایع کوچک را می‌توان با محاسبات دستی مورد ارزیابی قرار داد، اما اگر حوادث بزرگ باشد استفاده از نرم‌افزار توصیه می‌شود. خطرپذیری فردی و خطرپذیری اجتماعی هر دو را می‌توان با استفاده از این روش محاسبه کرد. نتایج ارزیابی خطرپذیری اجتماعی معمولاً به صورت منحنی فراوانی یا پروفایل ریسک در نمودار لگاریتمی نمایش داده می‌شود. این پروفایل اطلاعات موجود در احتمالات P_i و پیامدهای C_i را برای تمامی سناریوها، محل‌ها و اهداف خطرناک نشان می‌دهد (۱۰).

ب) روش جبری: خطرپذیری جانی برای هر سناریو در ارزیابی ریسک کمی لوند با محاسبه حاشیه امنیت یعنی مدت زمان رسیدن به شرایط غیرقابل تصرف منهای زمان تخلیه برای هر سناریو در درخت حادثه

مختلف به صورت دز مؤثر نسبی^۱ برای منواکسید کربن، کمبود اکسیژن، دی اکسید کربن، و گرمای انتقالی تعریف شده است. وقتی دز مؤثر نسبی از آستانه گذشت، فرد بیهوش خواهد شد. افراد همچنان دارای تعدادی ادراک حسی برای آگاه شدن از آتش‌سوزی و دود هستند. افراد بعد از آگاه شدن از آتش‌سوزی کارهای مختلفی انجام می‌دهند. هر عملی نیاز به حرکت به سوی یک اتاق خاص دارد که با تأخیر زمانی تا کامل شدن آن عمل همراه است. اولین مرحله در آغاز یک عمل جدید نیاز به تصمیم‌گیری در مورد مقصد است. برای آسان کردن این فرایند، اطلاعاتی در دسترس افراد قرار می‌گیرد که نباید به آنها دسترسی داشته باشند. مرحله بعدی نیاز به تعیین مسیر است. الگوریتمی که این مسیر را انتخاب می‌کند مسیری را برمی‌گزیند که کمترین میزان سختی^۲ را داشته باشد. مسیرهایی که دارای کمترین میزان سختی یکسان هستند بر اساس میزان کاربردی بودنشان انتخاب می‌شوند. در هر مرحله زمانی، شخص باید تصمیم بگیرد که مسیر را ادامه دهد یا کار دیگری انجام دهد (۳۱).

روش ارزیابی ریسک کمی لوند

الف) روش احتمالاتی: بخش احتمالی روش ارزیابی ریسک کمی لوند بر اساس توصیف درخت واقعه سناریوها می‌باشد. در این روش، مشکل را می‌توان به طور سازمان یافته تجزیه و تحلیل کرد. ارزیابی ریسک کمی استاندارد بر اساس نتیجه برآورد تعداد زیادی زیرسناریوهای جبری می‌باشد، اما این روش هنوز احتمالی محسوب می‌شود. پرداختن به تعداد

¹Fractional Effective Dose (FED)

²Degree of Difficulty (DOD)

³The Kaplan and Garrick triplet

می‌شوند. به علاوه حوزه مدل محاسبه شاخص‌های ریسک با روش‌های شبیه‌سازی محدود به ساختمان‌های مسکونی دو طبقه است و این مدل را در ساختمان‌های پیچیده با رعایت ضوابط احتیاطی بیشتر می‌توان به کار برد. در نهایت محدودیت‌ها و چالش‌های استفاده از روش ارزیابی ریسک کمی لوند مشتمل بر دشواری‌ها در توسعه و بسط اصطلاحات تحلیلی مناسب و فاکتورهای عدم قطعیت است.

همزمان با سریع‌تر شدن کامپیوترها، برخی از این مدل‌ها به‌طور قابل توجهی نسبت به مدل‌های اولیه پیشرفت و بهبود یافته‌اند. به عنوان مثال آخرین نسخه مدل مهندسی ریسک و ایمنی زیست‌محیطی، شامل توزیع برخی متغیرهای مستقل با استفاده از تخمین‌های سه-مفهومی است. علاوه بر این، مدل‌هایی که برای استفاده در ساختمان‌های خاص توسعه یافته‌اند فقط مختص این ساختمان‌ها هستند و به سادگی امکان بسط به ساختمان‌های دیگر را ندارند. این موضوع عمدتاً به علت فرض‌های ساده و ساده‌سازی‌هایی است که در کدهای کامپیوتری انجام می‌گیرد. موضوع مهم دیگر، به میزان پذیرش روش‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی برای طرح‌های ایمن در برابر آتش‌سوزی برمی‌گردد که به دلایل متعدد از جمله کمبود اعتبار کامل مدل‌ها و همچنین کمبود دانش و تکنولوژی لازم در آموزش طراحان و بازرسان، در ارتباط با کاربرد و کارایی‌های این روش‌ها انتقال داده می‌شود.

مشخص می‌شود. به طور تفصیلی، حاشیه امنیت G به این صورت محاسبه می‌شود:

$$G = M_s S - D - R - E$$

M_s نامعلوم بودن مدل، و S, D, R, E به ترتیب (از راست به چپ) زمان‌های رسیدن به شرایط بحرانی در اتاق، زمان آشکار شدن آتش‌سوزی، زمان پاسخ و بیرون رفتن از اتاق هستند. با استفاده از روش رگرسیون، مؤلفان، عبارات‌های S و D را با توجه به سرعت گسترش آتش‌سوزی، ارتفاع و مساحت اتاق به دست آورده‌اند. R به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شود. E با استفاده از یک معادله ساده با در نظر گرفتن تعداد ساکنان در هر متر مربع، مساحت طبقه و عرض محاسبه می‌شود (جدول شماره ۱).

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سعی شد مدل‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی بررسی شود. با توجه به بررسی‌های این تحقیق، در مدل‌های مبتنی بر روش‌های ارزیابی ریسک-هزینه مانند مدل مهندسی ریسک و ایمنی زیست‌محیطی، مدل ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه و ارزیابی ریسک آتش‌سوزی، عدم قطعیت‌های معینی به دلیل پیچیدگی و عدم شناخت کافی از پدیده آتش‌سوزی و رفتار انسانی در نظر گرفته می‌شوند. نتیجه این بود که این مدل‌ها نمی‌توانند برای ارزیابی مطلق ریسک آتش‌سوزی استفاده شوند، این درحالیست که این مدل‌ها برای ارزیابی‌های مقایسه‌ای و انتخاب یک سیستم ایمنی مقرون به صرفه در برابر آتش‌سوزی در نظر گرفته

جدول شماره ۱: مقایسه مدل‌های ارزیابی ریسک آتش‌سوزی

مدل ارزیابی	روش استفاده	کاربرد	مزایا	معایب	توضیحات
مهندسی ریسک و ایمنی زیست-محیطی	درخت واقعه	ساختمان-های مسکونی آپارتمانی	مجزا کردن ریسک جانی و هزینه‌های حفاظتی به منظور جلوگیری از مشکل تخصیص ارزش پولی به جان انسانی و فراهم کردن امکان مقایسه مجزای ریسک و هزینه‌ها.	به دلیل داشتن عدم قطعیت‌های معین نمی‌تواند برای ارزیابی مطلق ریسک آتش‌سوزی استفاده شود.	یک مدل ارزیابی ریسک است که توسط مرکز مهندسی ریسک و محیط‌زیست استرالیا به‌وجود آمده است تا عملکرد سیستم ایمنی آتش یک ساختمان را محاسبه کند.
ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و برآورد هزینه	روش‌های شبیه‌سازی	آپارتمان‌ها و ساختمان-های اداری	تعداد تلفات مورد انتظار و خسارت آتش‌سوزی برای هر سناریو را محاسبه می‌کند.	به دلیل داشتن عدم قطعیت‌های معین نمی‌تواند برای ارزیابی مطلق ریسک آتش‌سوزی استفاده شود.	شامل تعدادی زیر مدل است که تعامل دینامیکی بین پیشرفت آتش‌سوزی، گسترش دود، واکنش ساکنان و مداخله آتش‌نشانی را شبیه‌سازی می‌کند که توسط شورای تحقیقات ملی کانادا ایجاد شده است.
سیستم ارزیابی ریسک آتش‌سوزی	روش‌های عددی	ساختمان-های صنعتی	در این مدل، با اجرای فقط یک زیر مدل به‌طور مجزا، می‌توان بخشی از سیستم حفاظتی را ارزیابی کرد. به علاوه، با استفاده از زیر مدل می‌توان تجزیه و تحلیل کاملی از خطر یا ریسک انجام داد.	به دلیل داشتن عدم قطعیت‌های معین نمی‌تواند برای ارزیابی مطلق ریسک آتش‌سوزی مورد استفاده قرار بگیرد.	سیستم ارزیابی آتش‌سوزی و ریسک، یک مدل کامپیوتری جدید است که سیستم‌های حفاظتی آتش‌سوزی در ساختمان‌های صنعتی را با تأکید بر انباری‌ها و آشپزخانه‌ها محاسبه می‌کند.
محاسبه شاخص‌های ریسک با روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو	شبیه‌سازی مونت کارلو	خانه‌های دو یا سه طبقه	با استفاده از این مدل، امکان بررسی ریسک برای ساکنان در شرایط گوناگون وجود دارد.	محدود به ساختمان‌های دو طبقه می‌باشد.	این مدل شامل مکانیزم‌های نشان‌دهنده فرایندهای فیزیکی و شیمیایی گسترش آتش‌سوزی و همچنین رفتار افرادی است که سعی در فرار از آتش‌سوزی دارند.
ارزیابی ریسک کمی لوند	درخت واقعه	صنایع تولیدی و تونل‌های خط آهن	مزیت استفاده از روش ارزیابی ریسک کمی این است که تعداد زیادی از حوادث را می‌توان مورد بررسی قرار داد. به علاوه، در روش ارزیابی ریسک کمی توسعه یافته عدم قطعیت ذاتی هر متغیر به‌طور همزمان بررسی می‌شود.	دشواری‌های موجود در توسعه و بسط اصطلاحات تحلیلی مناسب و فاکتورهای عدم قطعیت.	مشتمل بر دو روش ارزیابی ریسک کمی استاندارد و توسعه یافته برای ارزیابی ریسک آتش‌سوزی است که در دانشگاه لوند سوئد توسعه پیدا کرده است.

References

1. J.M. Watts and J.R. Hall, *Introduction to fire risk analysis*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 5-1 (2002).
2. B.J. Meacham, *Building fire risk analysis*, SFPEH and book of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp.5-153 (2002).
3. B.J. Meacham, *Addressing risk and uncertainty in performance-based fire protection engineering*, Fire Protection Engineering, Vol. 10, pp. 16-25 (2001).
4. R.W. Bukowski, *Risk and performance standards*, NISTIR 6030, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899-0001, USA (1996)
5. W.G.B. Philips, *Simulation models for fire risk assessment*, Fire Safety Journal, Vol. 23, No. 2, pp. 159-169 (1994).
6. V. Beck, *Performance-based fire engineering design and its application in Australia*, Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, Melbourne, Australia, pp. 23 (1997).
7. Frantzych, Håkan, *Risk analysis and fire safety engineering*, Fire Safety Journal, Vol. 31, No. 4, pp. 313-329 (1998).
8. H. Setareh, A. Kuhpayi, A. Nikpey. *Developing of hazard analysis methods in fire risk assessment*. 1st National Conference on Safety in Ports. (2005). [In Persian]
9. J.R. Mehaffey, *Performance-based design for fire resistance in wood-frame buildings*, Proceedings of Interflam '99, pp. 293 (1999).
10. S.E. Magnusson, *Risk assessment*, Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, Melbourne, Australia, pp. 41 (1997).
11. Australian Building Codes Board, *Performance- Based Building Code of Australia*, Canberra, Australia (1996).
12. J.N. Fraser-Mitchell, *An object-oriented simulation (CRISP II) for fire risk assessment*, Proceedings of the 4th International Symposium on Fire Science, pp. 793, Ottawa, Canada (1994).
13. V.R. Beck, *A cost-effective decision-making model for building fire safety and protection*, Fire Safety Journal, Vol. 12, No. 2, 121-138 (1987).
14. V.R. Beck and D. Yung, *The development of a risk-cost assessment model for the evaluation of fire safety in buildings*, Proceedings of the 4th International Symposium on Fire Safety Science, Ottawa, Canada, pp. 817 (1994).
15. P. Clancy, *Sensitivity study of variables affecting time-of failure of wood framed walls in fire*, Proceedings of the International Wood Engineering Conference, New Orleans, Louisiana, October 1996, pp. 263
16. L. Zhao and V. Beck, *The definition of scenarios for the CESARE-Risk model*, Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, Melbourne, Australia, pp. 655 (1997).
17. H. Takeda and D. Yung, *Simplified fire growth models for risk-cost assessment in apartment buildings*, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 53-66 (1992).
18. Y. He and V. Beck, *Smoke spread in multi-story buildings*, Proceedings of the First International Conference on Fire Science and Engineering AsiaFlam-95, Hong Kong, pp. 507, March (1995).
19. D. Yung, G.V. Hadjisophocleous and G. Proulx, *Modeling concepts for the risk-cost assessment model FiRECAM and its application to a Canadian government office building*, Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, Melbourne, Australia, pp. 619 (1997).
20. G.V. Hadjisophocleous and D. Yung, *Parametric study of the NRCC fire risk-cost assessment model for apartment and office buildings*, Proceedings of the 4th International Symposium on Fire Safety Science, Ottawa, Canada, pp. 829 (1994).
21. J. Gaskin and D. Yung, *Canadian and U.S.A. fire statistics for use in the*

- risk-cost assessment model*, IRC Internal report no.637, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, January (1993).
22. G.V. Hadjisophocleous and D. Yung, *A model for calculating the probabilities of smoke hazard from fires in multi-story buildings*, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 67-80 (1992).
 23. G.V. Hadjisophocleous, N. Bénichou, D.A. Torvi and I. Reid, *Evaluating compliance of performance-based designs with fire safety objectives*, Proceedings of the 3rd International Conference Safety Design Methods, Lund, Sweden, pp. 307 on Performance-Based Codes and Fire (2000).
 24. K.S. Mudan and P.A. Croce, *Fire hazard calculations for large open hydrocarbon pool fires*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd edition, National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 3-197 (1995).
 25. D.A. Torvi, G.V. Hadjisophocleous and J. Hum, *A new method for estimating the effects of thermal radiation from fires on building occupants*, Proceedings of the ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, FL (2000).
 26. Z. Fu and G.V. Hadjisophocleous, *A two-zone fire growth and smoke movement model for buildings*, Fire Safety Journal, Vol. multicompartments, No. 3, pp. 257-285 (2000).
 27. B. Yager and G.V. Hadjisophocleous, *FIERA system theory report: Detection model*, IRC Internal report No. 794, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, ON (2000).
 28. G. Proulx, *Evacuation time and movement in apartment buildings*, Fire Safety Journal, Vol. 24, No. 3, pp. 229-246 (1995).
 29. D.A. Torvi, D.W. Raboud and G.V. Hadjisophocleous, *FIERA system theory report: Life hazard model*, IRC Internal report No. 81, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa (1999).
 30. C.K. Tsao and W.W. Perry, *Modifications to the vulnerability model: A simulation system for assessing damage resulting from marine spills (VM4)*, Report CG-D-38-79, U.S. Coast Guard Office of Research and Development, Washington, DC (1979).
 31. J. Fraser-Mitchell, *Risk assessment of factors related to fire protection in dwellings*, Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, Melbourne, Australia, pp. 631 (1997).
 32. Frantzych, Håkan, *Uncertainty and risk analysis in fire safety engineering*, Lund University Report tvbb-1016, Institute of Technology, Department of Fire Safety Engineering, Sweden (1998).
 33. G.V. Hadjisophocleous and Z. Fu, *A fire risk computer model for commercial timber frame buildings*, Submitted to the International Conference on Building Fire Safety Conference to be held in Brisbane from 20-21 November (2003).
 34. J.M. Watts and E.R. Rosenbaum, *Fire risk assessment for cultural heritage*, Interflam 2001, 9th International Fire Science and Engineering Conference, Edinburgh, September 2001, pp. 203 (2001).
 35. W. Armim, *Accommodating perceptions of risk in performance-based building fire safety code development*, Fire Safety Journal, Vol. 34, No. 3, pp. 297-309 (2000).