هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

روشهای ارزیابی ریسک اثرات دومینو ناشی از حریق در مخازن نفتی: یک مقاله مروری

کاظم صمیمی*[۱]، مصطفی پویاکیان[۲] ، اسماعیل زارعی[۳] و محسن امیدوار[۴]

۱- کمیته تحقیقات دانشجویی ، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی تهران، ایران

۳- استادیار، گروه علوم ایمنی، دانشکده هوانوردی، دانشگاه امبری ریدل آریزونا ، آمریکا

۴- استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی بوشهر، ایران

* **k.n.samimi2000@gmail.com**

چکیده

بروز یک حریق کوچک در مخازن پالایشگاهها، انبارها و ترمینالهای مواد نفتی میتواند با گسترش به مخازن مجاور و بروز پدیده دومینوی حریق باعث خسارات فراوانی گردد. تاکنون روشهای مختلفی برای ارزیابی ریسک این اثرات ارائه شده است که هر کدام از این روشها نقاط قوت و ضعفی دارند. هدف از انجام این مطالعه مروری بر مطالعات گذشته در این زمینه و بیان ویژگی های اصلی این مطالعات می باشد. مطالعات انجام شده در زمینه مدلسازی اثرات دومینو را میتوان در دو بخش " مدلسازی آسیب پذیری" و "ارزیابی ریسک و مدلسازی تکامل" دسته بندی کرد. به منظور مدلسازی آسیب پذیری تجهیزات از سه رویکرد در مطالعات استفاده شده است: روشهای قطعی، روشهای احتمالی و روشهای CFD/FEM. در تعداد دیگری از مطالعات روش‌هایی به منظور ارزیابی ریسک و مدل‌سازی تکامل اثرات دومینو ارائه شده اند. که میتوان آنها را به سه دسته تقسیم نمود: روشهای تحلیلی، گرافیکی و شبیه سازی. به دلیل ماهیت پیچیده حوادث دومینو بسته های نرم افزاری موجود هنوز به صورت تجاری مورد استفاده قرار نمی گیرند و استفاده از آنها در سطح مطالعه و تحقیق پژوهشگران باقی مانده است. رویکردهای تحلیلی و روشهای گرافیکی (به عنوان مثال، درخت رویداد ، شبکه بیزین) به مطالعه پدیده در سطح سیستم کمک می کنند اما در یک مطالعه با ده ها سازه قادر به هندل کردن پیچیدگی های موجود نخواهند بود. لذا به منظور افزایش قابلیت اطمینان روشهای موجود نیازمند تحقیقات بیشتر و عمیق تر در این زمینه هستیم.

واژه‌های کلیدی: اثرات دومینو، حریق، ارزیابی ریسک، مخازن نفتی

مقدمه

افزایش تقاضا برای انرژی در سراسر جهان و لزوم تامین پایدار آن پس از جنگ جهانی دوم در سراسر جهان باعث گسترش فزاینده شرکتهای نفتی و پالایشگاهها و صنایع پتروشیمی و حمل و نقل و ذخیره سازی سوختهای مایع در مخازن چندگانه گردید. این امر باعث ایجاد خطرات حریق و انفجار و انتشار مواد سمی و بروز حوادث بزرگی شد. در این میان آتش سوزی مخازن، شایع ترین نوع حوادث و انفجار، شدید ترین پیامدها را در اینگونه تاسیسات باعث شده است [۱-۳]. بروز یک حریق کوچک در مخازن پالایشگاهها، انبارها و ترمینالهای مواد نفتی میتواند با گسترش به مخازن مجاور و بروز پدیده دومینوی حریق باعث خسارات فراوانی گردد. لذا در برخی از حوادث بزرگی که تاکنون در صنایع شیمیایی و پتروشیمی رخ داده است حوادث دومینو را مسئول شدت خسارات و بروز فاجعه معرفی نموده اند [۴]. در پژوهش انجام شده توسط مرتضوی و همکاران هزینه حوادثی که طی آن رویدادهای دومینو رخ داده است هشت برابر بیشتر از هزینه حوادث بدون اثرات دومینو بوده است [۵]. اولین حادثه مستند دومینو مربوط به سال ۱۹۴۷ است. یک کشتی با بار نیترات آمونیوم در بندر تگزاس

[1] Computational Fluid Dynamics/Finite Element Method

سیتی آمریکا دچار حریق شده و منفجر می شود و منجر به یک واکنش زنجیره ای و انفجار سایر کشتی ها و یک مخزن زمینی ذخیره نفت می شود [۶] .

عموماً رویداد های دومینو به عنوان رویدادهایی بسیار کم فرکانس و در عین حال با پیامدهای بسیار بالا در نظر گرفته می شوند [۷, ۸] اما باید توجه داشت که به دلیل عواقب شدید ناشی از بروز این رویدادها باید توجه ویژه ای به پیش بینی و کنترل آنها داشت.

تاکنون تعاریف مختلفی برای اثرات دومینو در صنایع شیمیایی و فرآیندی ارائه شده است:[۷] یکی از کاملترین تعاریفی که توسط رینیر و کوزانی در سال ۲۰۱۳ از اثرات دومینو ارائه شده است عبارت است از :"پدیده‌ای که در آن یک رویداد ناخواسته اولیه در یک تجهیزات (از لحاظ زمانی) یا/و به تجهیزات نزدیک (از لحاظ مکانی) به‌طور متوالی یا همزمان منتشر می‌شود و یک یا چند رویداد ناخواسته ثانویه را تحریک می‌کند و به نوبه خود احتمالاً باعث ایجاد حوادث ناخواسته ی به مراتب بالاتری می گردد که منجر به عواقب کلی شدیدتر از رویداد اولیه می شود" [۹]. بر این اساس ویژگی های یک رویداد دومینو عبارتند از: یک "رویداد اولیه"، که آغاز کننده اثر دومینو است، بردارهای تشدید که مسئول انتشار احتمالی حادثه هستند، یک یا چند رویداد تصادفی ثانویه و در نهایت پیامد انتهایی که بسیار شدیدتر از پیامدهای رویداد اولیه است.

رویدادهای اولیه را می توان به سه دسته تقسیم کرد: حریق، انفجار و انتشار مواد سمی. انتشارات سمی همیشه نادیده گرفته می شوند زیرا مستقیماً منجر به آسیب تأسیسات ثانویه نمی شوند [۱۰].

این رویدادهای اولیه ممکن است ناشی از رویدادهای تصادفی (مانند خرابی مکانیکی، خطای انسانی، مرور زمان)، بلایای طبیعی (مانند زلزله، سیل، و طوفان) و رویدادهای عمدی (مانند حملات تروریستی، خرابکاری، اقدامات جنایی) باشد. وقایع اولیه ناشی از بلایای طبیعی در کارخانه‌های صنعتی عموماً «Natech»[1] نامیده می‌شوند. رویدادهای اولیه تصادفی و ناتک ها به حوزه ایمنی تعلق دارند در حالی که رویدادهای عمدی در دسته مسائل امنیتی قرار میگیرند [۱۱].

در سال ۲۰۱۱ عبدالحمید زاده و همکاران ۲۲۴ حادثه که از سال ۱۹۱۰ تا ۲۰۰۸ در صنایع فرآیندی رخ داده است، را تجزیه و تحلیل نمودند که نشان می دهد که ۴۳٪ از حوادث دومینوی ثبت شده توسط حریق و ۵۷٪ توسط انفجار رخ داده است. در میان رویدادهای دومینویی که توسط آتش‌سوزی آغاز می‌شود، آتش استخری (۸۰٪) بیشترین سناریویی بود که برای ایجاد رویدادهای دومینویی یافت شد. در بین انفجارها، انفجار ابر بخار[2]شایع ترین علت بوده است.

تاکنون روشهای مختلفی برای ارزیابی ریسک اثرات دومینو ارائه شده است که هر کدام از این روشها نقاط قوت و ضعفی دارند. مقاله حاضر با هدف مروری بر مهم‌ترین مطالعات انجام‌شده در زمینه ارزیابی اثرات دومینو و ویژگی های این مطالعات و روند پیشرفت تحقیقات دراین زمینه ارائه میگردد.

روش کار

با استفاده از کلمات کلیدی، جستجوی مقالات منتشر شده منتهی به سال۲۰۲۲ در زمینه روشهای ارزیابی اثرات دومینو در صنایع فرایندی و مخازن ذخیره و ترمینال های مواد نفتی و هیدروکربنی در پایگاهها و منابع علمی شامل web of science، Scopus، scholar انجام و پس از مطالعه عنوان و چکیده و متن مقالات استخراج شده، مقالات مرتبط انتخاب گردید. پس از شناسایی مطالعات مرتبط، ویژگی های اصلی این مطالعات از نظر نوع متد مورد استفاده، مبنای محاسبه آسیب پذیری، نوع بردار تشدید، کاردینالیتی یا سطوح مختلف اثرات دومینو و هزینه مدلسازی و توانایی روشها در مدلسازی سطوح بالاتر دومینو مورد بررسی قرار گرفت و ویژگی هر کدام از مطالعات و توانایی روشهای ارائه شده به منظور ارزیابی ریسک اثرات دومینو جمع بندی گردید. تعدادی از روشها وابزارهای متعددی که برای ارزیابی ریسک اثر دومینو توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته در جدول ۱ نشان داده شده است.

نتایج

مطالعات انجام شده در زمینه مدلسازی اثرات دومینو را میتوان در دو بخش " مدلسازی آسیب پذیری" و "ارزیابی ریسک و مدلسازی تکامل" دسته بندی کرد.

الف) مدلسازی آسیب پذیری:

سناریوی حادثه اولیه معمولاً زمانی منتشر می شود که بردار تشدید ایجاد شده منجر به شکست سایر تاسیسات شود. بنابراین، مطالعه سناریوهای دومینو مستلزم تجزیه و تحلیل توانایی یک واحد یا کارخانه فرآیندی برای شروع یا تشدید اثرات بالقوه آبشاری است که به عنوان «آسیب پذیری» تعریف می شود [۱۲].

به منظور مدلسازی آسیب پذیری تجهیزات از سه رویکرد در مطالعات استفاده شده است:

روشهای قطعی ، روشهای احتمالی و روشهای CFD/FEM

الف-۱) روشهای قطعی

اولین رویکرد تحلیل آسیب‌پذیری برای ارزیابی آسیب به تاسیسات از "آستانه تشدید" بر اساس آزمایش‌ها یا داده‌های حادثه استفاده می‌کند [۱۳]. مقادیر آستانه، حداقل شدت اثرات فیزیکی را ارائه می دهد که می تواند باعث تشدید شود، که ممکن است به طور موثر به عنوان

[1] Natural Hazards Triggering Technological Disasters
[2] VCE (vapor cloud Explosion)

ابزار غربالگری برای ارزیابی اولیه سناریوهای تشدید احتمالی استفاده شود [۹]. بدین صورت که اگر مقادیر بردار تشدید در محل تجهیز بیش از مقادیرآستانه تشدید باشد پیش بینی می شود آن تجهیز دچار شکست خواهد شد. در نتیجه، حداقل فاصله بین دو تاسیسات خطرناک مورد نیاز برای جلوگیری ازرخداد تشدید «فاصله ایمنی» یا «فاصله اثر» نامیده می شود [۷, ۱۴]. با این حال، آسیب پذیری تاسیسات نه تنها به پیچیدگی بردارهای تشدید بستگی دارد، بلکه به ویژگی های تاسیسات هدف نیز بستگی دارد. به عبارت دیگر، عدم قطعیت گسترده ای در مقادیر آستانه برای تشدید دومینو وجود دارد، زیرا یک مقدار آستانه ممکن است فقط از یک شرایط خاص مشتق شود. در نتیجه، مقادیر آستانه متفاوت و ظاهرا متناقضی برای آسیب تجهیزات ناشی از فشار بیش از حد یا تشعشع در مقالات و دستورالعملهای فنی وجود دارد [۱۵–۱۸]. لذا، فاصله ایمنی تعیین شده از طریق مقایسه نتیجه تحلیل پیامد سناریوهای اولیه با مقادیر آستانه ممکن است قابل اطمینان نباشد. اگرچه عدم قطعیت فواصل ایمنی ناشی از آستانه ها و سناریوهای اولیه اجتناب ناپذیر است، اما در طراحی ایمنی ذاتی [۱۹, ۲۰] ودستورالعمل های فنی [۲۱, ۲۲] به دلیل سادگی و شفافیت رویکرد پذیرفته شده است. در نتیجه، آستانه ها و فواصل ایمنی توصیه شده در مقررات و دستورالعملهای فنی مختلف با یکدیگر متفاوت است. به عنوان مثال، مقادیر آستانه توصیه شده و فواصل ایمنی در میان کشورهای مختلف اتحادیه اروپا به دلیل عدم وجود یک رویکرد هماهنگ برای ارزیابی خطرات حوادث بزرگ در کشورهای اروپایی، متفاوت است [۲۳].

الف-۲) روش های احتمالی

به منظور پرداختن به عدم قطعیت اثرات دومینو و پشتیبانی از ارزیابی کمی ریسک (QRA) اثرات دومینو، از مدل‌های احتمالی به تفکیک زیر برای ارزیابی آسیب‌پذیری تاسیسات استفاده می‌شود.

۱. Overpressure

Bagster and Pitblado در سال ۱۹۹۱ یک رویکرد احتمالی را پیشنهاد کردند که تابع احتمال آسیب را بر اساس فاصله از مرکز سناریوی اولیه و فاصله ایمن تعریف می‌کند [۱۵]. Khan and Abbasi در سال ۱۹۹۸یک رویکرد تابع پروبیت برای مدل‌سازی احتمال آسیب ناشی از فشار بیش از حد، با در نظر گرفتن فشار بیش از حد پیک (فشار استاتیک) و فشار دینامیکی ارائه نمودند [۶].

Cozzani و Salzano به جای استفاده از یک مدل کلی برای همه تجهیزات، مدل های پروبیت را برای هر دسته از تجهیزات (اتمسفریک، تحت فشار، کشیده و کوچک) توسعه دادند [۲۴]. مدل‌های ویژه تجهیزات به‌طور قابل‌توجهی خطاهای ناشی از مدل پروبیت عمومی را کاهش دادند و تفاوت قابل ملاحظه ای را بین احتمال آسیب و آستانه آسیب دسته‌های مختلف تجهیزات نشان دادند.

این کار با تشخیص میزان آسیب و تعیین یک رابطه خطی بین مقدار پروبیت و آستانه های مشاهده شده برای هر دسته از آسیب ارتقاء یافت [۲۵]. در سال ۲۰۱۷ Mukhim و همکاران ،کار ژانگ و جیانگ (۲۰۰۸) را با طبقه بندی تجهیزات به ۱۱ دسته و توسعه یک مدل پروبیت برای هر دسته از تجهیزات بهبود بخشیدند. مدل‌های پروبیت با مدل‌های محاسباتی ساده‌شده برای فشار بیش از حد پیک همراه شدند تا یک رویکرد ساده برای تخمین فواصل ایمنی ناشی از امواج انفجار و احتمال آسیب به عنوان تابعی از فاصله درجه بندی شده ایجاد کنند [۲۶]. علاوه بر این، Salzano و Cozzani در سال ۲۰۰۶ شدت از دست دادن مهار را به دنبال برهم کنش موج فشار بیش از حد با تجهیزات فرآیند با استفاده از تجزیه و تحلیل مجموعه فازی، بر اساس داده های حادثه، برای ارزیابی تشدید سطح دوم مورد مطالعه قرار دادند [۲۷].

۲. Heat radiation

در مقایسه با آسیب ناشی از فشار بیش از حد، مکانیسم آسیب تابش گرما (یا برخورد آتش) ممکن است پیچیده تر باشد زیرا آسیب ناشی از تشعشع یک فرآیند تدریجی است، یعنی تاسیسات در معرض تابش گرما فوراً خراب نمی شوند. با گذشت زمان، آسیب‌پذیری تاسیسات در معرض به دلیل افزایش دما/فشار افزایش می‌یابد و زمانی که مهار از دست داده شود، به عنوان یک شکست در نظر گرفته می شود. فاصله زمانی بین شروع آتش و خرابی تجهیزات مورد نظر «زمان تا شکست» (ttf) نامیده می شود [۱۳]. بنابراین نحوه واکنش اضطراری علاوه بر شدت تابش حرارتی (آستانه) تأثیر زیادی بر آسیب پذیری تأسیسات دارد.

۳- fragment

چندین سناریو اولیه تصادفی می‌تواند منجر به خطر پرتاب قطعات شود، مانند انفجار بخار در حال انبساط مایع در حال جوش (BLEVE)[1] ، انفجارهای فیزیکی، انفجارهای محدود و واکنش‌های فرار، و غیره. داده‌های حوادث گذشته نشان می‌دهد که رویدادهای BLEVE در بیشتر حوادث صنعتی شامل پرتاب قطعه و معمولاً باعث عواقب بسیار شدید می شود [۲۸].

Gubinelli و همکاران یک مدل احتمالی با توجه به توالی رویداد برای ارزیابی احتمال آسیب ناشی از پرتاب قطعات پیشنهاد کردند [۲۹].

الف-۳) CFD/FEM methods

در سال‌های اخیر، روش‌های عددی پیشرفته مانند دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و روش المان محدود (FEM) به دلیل نقاط قوت خود در شبیه‌سازی اثر فیزیکی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. این روش‌های پیشرفته به عنوان یک ابزار امیدوار کننده برای پشتیبانی از ارزیابی سناریوهای تصادفی پیچیده، مانند آتش‌سوزی‌های سه‌بعدی استخری و آتش‌سوزی‌های جت در نظر گرفته می‌شوند

[1] Boiling liquid expanding vapor explosion

[۳۰]. Landucci و همکاران در سال ۲۰۰۹ شکست مخازن ذخیره‌سازی در معرض آتش‌سوزی را با استفاده از یک کد FEM تجاری مدل‌سازی کردند. مدل FEM می‌تواند پارامترهای مکانیکی و حرارتی پوسته‌های مخزن را تحت تابش گرمایی، مانند تابش گرمایی، دمای دیواره و تنش شبیه‌سازی کند [۳۱].

ب) ارزیابی ریسک و مدل‌سازی تکامل

روش‌های موجود ارزیابی آسیب‌پذیری مرور شده در بخش قبل می‌توانند مدل‌های قابل اعتمادی را برای برآورد امکان و احتمال تشدید رویدادهای اولیه فراهم کنند که گامی مهم در ارزیابی خطر اثرات دومینو است. در این بخش روش‌های جاری ارزیابی ریسک و مدل‌سازی تکامل اثرات دومینو شامل ارزیابی احتمال اثرات دومینو، ارزیابی خطر اثرات دومینو و ارزیابی تکامل اثرات دومینو ارائه می‌شود.

روشهای موجود را می توان به سه دسته تقسیم نمود: روشهای تحلیلی و روشهای گرافیکی و روشهای شبیه سازی

ب-۱) روش‌های تحلیلی

اگر چه ارزیابی ریسک کمی (QRA) به طور معمول در صنایع فرآیندی برای تعیین کمیت ریسک‌های «حوادث عمده» استفاده می‌شود، QRA برای اثرات دومینو هنوز هم به دلیل پیچیدگی و عدم قطعیتی که با حوادث دومینویی ارتباط دارند، بسیار چالش برانگیز است [۱۵, ۲۴]. به منظور ارزیابی احتمال اثرات دومینو Bagster وPitblado در سال ۱۹۹۱ برنامه ای بر پایه رویکرد مبتنی بر فاصله توسعه دادند که به انتشار مرتبه بالاتر، بردارهای تشدید چندگانه و جهت آسیب بردارهای تشدید می پردازد [۱۵].مکانیزم‌های فیزیکی بردارهای تشدید مختلف به طور کامل در نظر گرفته نشده است زیرا از یک تابع کاهش مربع (تابع محدب) برای تمام بردارهای تشدید استفاده شده‌است.

خان و عباسی در سال ۱۹۹۶ برای ارزیابی پیامدهای بالقوه یک کارخانه شیمیایی یا مجتمع صنعتی بر روی سایت و محیطزیست اطراف، بسته نرم‌افزاری به نام MAXCRED را براساس تحلیل محتمل ترین حوادث معرفی کردند. مدل‌های پروبیت برای ارزیابی پتانسیل آسیب سناریوهای مختلف حادثه مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج نشان داد که «انفجار ابر بخار محدود» به دنبال آتش‌سوزی استخری بدترین سناریوی حادثه خواهد بود و دارای حداکثر پتانسیل تحریک اثرات دومینو غیر عمدی است. علاوه بر این، یک رویکرد تحلیلی برای مدل‌سازی سناریوهای مختلف اثر دومینو در صنایع فرآیند شیمیایی، از جمله آتش‌سوزی، انفجار، انتشار مواد سمی، اثرات همزمان و متقابل آتش‌سوزی و انفجار ارائه شده‌است [۶]. این کار با یک نرم‌افزار کاربر پسند (DOMIFFECT) برای تحلیل اثر دومینو کدگذاری شد [۳۲]. این نرم‌افزار برای تخمین خطرات احتمالی از دست دادن مهار تا انفجار شامل مدیریت تعامل بین سناریوهای مختلف حادثه دومینو؛ ارزیابی احتمال سناریوهای مختلف اثر دومینو و برآورد پیامدهای بالقوه آن مورد استفاده قرار گرفت.

کوزانی و سالزانو در سال ۲۰۰۴ یک روش ارزیابی کمی برای «فشار بیش از حد» براساس مدل‌های پروبیت خاص تجهیزات ایجاد کردند [۲۴]. پس از این کار، یک روش سیستماتیک برای ارزیابی کمی ریسک ناشی از اثرات دومینو توسعه داده شد [۳۳]. از آنجا که مدل‌های پروبیت برای آتش‌سوزی و فشار بیش از حد و یک مدل احتمالی برای پرتاب قطعات در این چارچوب QRA درگیر هستند، این روش می‌تواند بردارهای تشدید اصلی را در نظر بگیرد. پیامدهای کلی اثر دومینو بر ریسک فردی، ریسک اجتماعی و شاخص بالقوه "life index" با در نظر گرفتن تمام ترکیبات معتبر وقایع ثانویه که ممکن است توسط هر سناریوی اولیه ای شروع شوند، به دست آمد. چارچوب QRA در یک ابزار نرم‌افزاری مبتنی بر GIS به نام air par - GIS اجرا شد [۳۴, ۳۵]. استفاده از این نرم‌افزار در تاسیسات واقعی می‌تواند به طور خودکار اهداف احتمالی تشدید را شناسایی کند و همچنین به طور مستقیم شاخص‌های خطر فردی و اجتماعی ناشی از سناریوهای احتمالی دومینو را محاسبه کند. با ترکیب روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری برای تاسیسات در معرض رویدادهای ناتک، این روش ممکن است برای تجزیه و تحلیل اثرات دومینو ناشی از رویدادهای ناتک گسترش یابد [۳۶, ۳۷]. شرکتTNO یک ابزار QRA برای ایمنی خارجی کارخانه‌های صنعتی در معرض خطر غبارات قابل اشتعال بر اساس دومینوی یک مرحله ای به وسیله فواصل ایمنی توسعه داد [۳۸]. Zhang و chen در سال ۲۰۱۳یک روش QRA را براساس تجزیه و تحلیل مکانیزم شکست برای کمی کردن اثر دومینو پیشنهاد کردند و از تصویر تجسمی ابر خطر برای نشان دادن خطر نواحی مختلف استفاده کردند [۳۹].

ب-۲) روش‌های گرافیکی

مناطق صنعتی شیمیایی از تاسیسات خطرناک مختلفی با پتانسیل‌های اثر دومینو مختلف تشکیل شده‌اند. در برخی از تاسیسات احتمال شروع حوادث دومینو بالاست در حالی که در برخی دیگر انتشار حوادث دومینو احتمال بیشتری دارند. در مقایسه با روش‌های تحلیلی، مدل‌های گرافیکی این امکان را دارند که چارچوبی برای تکامل اثرات دومینو، مقابله با سناریوهای دومینو پیچیده و گسترش مرتبه بالاتر فراهم کنند. انواعی از کاربرد روشهای گرافیکی در مدلسازی اثرات دومینو که در متون علمی به کار رفته اند شامل موارد زیر است:

ب-۲-۱) مدل‌های نمودار / شبکه

رینیرز و دولرت در سال ۲۰۰۷ ابتدا با استفاده از یک گراف جهت‌دار G، اثرات دومینو را در مناطق صنعتی شیمیایی به صورت "معادله (۱)" مدل‌سازی کردند:

$$G = (NA) \qquad (۱)$$

N نشان‌دهنده مجموعه‌ای از گره‌ها (برای مثال، تاسیسات شیمیایی) ، A نشان‌دهنده مجموعه‌ای از کمان‌ها بین هر جفت منظم از گره‌ها است، که به عنوان ماتریسی از N×N نشان‌داده شده‌است. وزن هر کمان نشان‌دهنده احتمال انتشار از سمت انتهای یک تجهیز به سمت ابتدای تجهیز دیگر است. از آنجایی که مقادیر آستانه موجود یا مدل‌های پروبیت همیشه سازگار نیستند، یک ماتریس مبتنی بر فاصله به نام Domino Danger Unites Matrix (DDU) به عنوان وزن کمان‌ها تعریف شد که سناریوهای حادثه احتمالی را از یک تجهیز به تجهیز دیگر مشخص می‌کند. (Reniers and Dullaert, 2007) با استفاده از این رویکرد، تاسیسات خطرناک در یک منطقه صنعتی را می توان به طور کلی از نظر خطری که آن‌ها برای یکدیگر ایجاد می‌کنند مدل کرد. بنابراین، این روش می‌تواند با شناسایی تاسیسات بحرانی که احتمال بالایی از شروع یا انتشار اثرات دومینو دارند ، به اتخاذ تصمیمات پیش‌گیرانه کمک نماید [۴۰].

ب-۲-۲) معیارهای گراف

خاکزاد و رینیرز آسیب‌پذیری صنایع فرایندی را در زمینه آثار دومینو با استفاده از معیارهای گراف مانند بینابینی، نزدیک بودن بیرونی و نزدیک بودن درونی در گراف‌های جهت‌دار و نزدیک بودن در گراف‌های غیر مستقیم ارزیابی کردند. این روش قادر به شناسایی تاسیسات بحرانی یا آسیب‌پذیرترین تاسیسات در نواحی صنعتی فرآیند می‌باشد [۱۲].

ب-۲-۳) نمودارهای دینامیک

چن و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک رویکرد نموداری پویا برای مدل‌سازی تکامل مکانی-زمانی حوادث دومینو ایجاد کردند و بر محدودیت «مدل پروبیت»که تنها قادر به تخمین احتمال آسیب انتشار سطح اول است غلبه کردند. اثرات هم افزایی و اثرات موازی تکامل فضایی، و همچنین اثرات تجمعی تکامل زمانی که احتمالا در فرآیندهای پیچیده تکامل دومینو رخ می دهد، در این مطالعه در نظر گرفته شده است [۴۱].

به نظر می‌رسد رویکرد گراف پویا قادر به مدل‌سازی تکامل پویای اثرات دومینو (توالی تشدید) باشد در حالی که گراف ایستا تنها یک تصویر کلی از کل فرآیند را در یک زمان فراهم می‌کند.

ب-۲-۴) شبکه بیزی

شبکه بیزی یک ابزار گرافیکی احتمالاتی قدرتمند است که به طور گسترده در زمینه ارزیابی ایمنی و ریسک و هوش مصنوعی برای مدل‌سازی دانش و وابستگی نامشخص در سیستم‌های احتمالی استفاده [۴۲-۴۴]. خاکزاد و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک روش شبکه بیزی (BN) برای مدلسازی تکامل اثر دومینو و برآورد احتمال اثر دومینو در سطوح مختلف تشدید معرفی کرد، با در نظر گرفتن اثرات هم افزایی ممکن که وقتی چندین سناریوی سطح پایین‌تر سناریوی سطح بالاتری را شروع می‌کنند، اتفاق می‌افتد [۴۵].

ب-۲-۵) شبکه بیزی پویا

متفاوت از شبکه بیزی معمولی، خاکزاد (۲۰۱۵) یک مدل شبکه بیزی پویا (DBN) را برای در نظر گرفتن تشدید فضایی و زمانی اثرات دومینو توسعه داد. روش بهبود یافته به طور صریح وابستگی‌های زمانی را در نظر می‌گیرد و محتمل‌ترین توالی حوادث را شناسایی می‌کند که ویژگی‌های یک اثر دومینو را بسیار بهتر از محتمل‌ترین ترکیب حوادث ارائه‌شده توسط BN معمولی منعکس می‌کند [۸]. برای مدل‌سازی عدم قطعیت توالی رویدادها در طول یک سناریوی دومینو، یک مدل DBN جدید با یک ساختار پیچیده‌تر توسط خاکزاد و همکاران در سال ۲۰۱۸ پیشنهاد شده‌است [۴۶]. علاوه بر این، یک روش ترکیب DBN با یک سیستم استنتاج فازی نیز برای مقابله با عدم قطعیت اثرات دومینو توسعه داده شد. [۴۷]. اخیرا، DBN برای تجزیه و تحلیل گسترش حریق در مرز مشترک صنعت و طبیعت و اثرات دومینو ناشی از آن به کار گرفته شد [۴۸, ۴۹].

ب-۲-۶) مدل‌های پتری نت

شبکه های پتری را می توان به عنوان یک گراف جهت دار، متشکل از دو مجموعه گره در نظر گرفت: مجموعه مکان هایی که اشیاء سیستم را نشان می دهند و مجموعه ای از رویدادها یا انتقال ها که پویایی سیستم را تعیین می کنند. شبکه‌های پتری همیشه برای تحلیل و شبیه‌سازی سیستم‌های همزمان استفاده می‌شوند [۵۰, ۵۱]. Zhou و Reniers در سال ۲۰۱۷یک مدل شبکه پتری را برای تجزیه و تحلیل اثرات دومینوی ناشی از انفجار ابرهای بخار پیشنهاد کردند [۵۲]. کمیل و همکاران در سال ۲۰۱۹ تعامل پیچیده و وابستگی های زمانی بین واحدها را در طول تکامل اثرات دومینوی ناشی از حریق با استفاده از شبکه پتری مدل کردند [۵۳].

ب-۳) روشهای شبیه سازی

عبدالحمیدزاده و همکاران در سال۲۰۱۱ یک رویکرد شبیه سازی مبتنی بر روش مونت کارلو برای ارزیابی احتمال اثرات دومینو و فرکانس خرابی تاسیسات، اجتناب از پیچیدگی تکنیک های تحلیلی مورد استفاده توسط رویکردهای QRA پیشنهاد کردند [۵۴] . بعدها، این روش شبیه‌سازی برای توسعه قابلیت‌های آن در چند بعد و سناریو و مقیاس‌های بالاتر بهبود یافت. راد و همکاران در سال ۲۰۱۴ روش شبیه‌سازی برای تکامل فضایی حوادث دومینو ارائه کردند اما نقص آشکار آن زمان بر بودن است [۵۵]. علاوه بر این، مشابه با روش QRA، [۳۳] این روش یک ابزار صرفا احتمالاتی براساس اعداد ایجاد شده تصادفی، صرف‌نظر از مکانیسم‌های انتشار حادثه واقعی است. یک ابزار شبیه‌سازی مبتنی بر عامل با در نظر گرفتن حالت‌های تاسیسات برای تجزیه و تحلیل گسترش سطح بالاتر و وابستگی‌های زمانی پیشنهاد شد [۵۶].

دسته ای از ابزارهای مربوط به ارزیابی اثرات دومینو در مطالعه عبدالحمیدزاده و همکاران به عنوان DSS[1] معرفی شده اند. DSS به طور کلی به عنوان یک سیستم اطلاعاتی کامپیوتری یکپارچه تعریف می شود که از فرایند تصمیم گیری برای افراد و سازمان ها پشتیبانی می کند. یکDSS به تصمیم گیرندگان کمک می کند تا اطلاعات مفید را از داده های خام/ورودی جمع آوری کنند. DSS عمدتا زمانی مورد استفاده قرار می گیرد که کاربر با مشکل بدون ساختار روبرو شود،که در آن چندین گزینه جایگزین وجود دارد و تصمیم گیری کار ساده ای نیست [۵۷]. خان و عباسی روشهای کمی مورد استفاده در برآورد اثرات دومینو را ترکیب کرده و یک نرم افزار به نام DOMIFFECT به منظور برآورد اثر دومینو در شرایط پیچیده تولید کردند [۶, ۳۲]. Reniers و Dullaert نرم افزاری به نام DomPrevPlanning را برای کمک به فرایند تصمیم گیری در مورد موانع ایمنی برای جلوگیری / کاهش اثرات دومینو در تاسیسات شیمیایی پیچیده، که با در در نظر گرفتن چندین سناریوی دومینو اتفاق می افتند، تهیه کردند [۱۴]. عبدالحمیدزاده و همکاران الگوریتمی به نام FREEDOM را بر اساس شبیه سازی مونت کارلو برای ارزیابی اثرات دومینو ایجاد کردند [۵۸, ۵۹].

در جدول شماره ۲ تعدادی از مطالعاتی که در زمینه ارزیابی ریسک اثرات دومینو انجام شده اند مورد مقایسه قرار گرفته اند.

بحث و نتیجه گیری

Graham et al.2011 معایب اصلی روش‌های ارزیابی ریسک کمّی قدیمی را به دو دسته تقسیم مینماید: (۱) تخمین فراوانی ریسک بیش‌ازاندازه بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از چندین دهه گذشته، (۲) رویکرد تجزیه‌وتحلیل ریسک کلاسیک، استاتیک می‌باشد و این رویکرد خود دو ایراد اساسی دارد: اولاً اینکه تعامل دینامیکی وقایع ناایمن را درک نکرده و در شناسایی تغییر ریسک بر اثر انحراف یا تغییر در فرآیند موفق نمی‌باشد و ثانیاً تصویری که از ریسک در یک بازه زمانی ثابت و برای فاز خاصی از چرخه زندگی یک تأسیسات ارائه میدهد همیشه برای دیگر فازها مناسب نمی‌باشد و نیاز به به‌روزرسانی دارد.

همچنین اختصاصاً در موضوع ارزیابی ریسک وقایع دومینو، وقوع همزمان رویدادهای متعدد ممکن است باعث ایجاد اثرات هم افزایی شود که بسته های نرم افزاری موجود قادر به در نظر گرفتن آنها نیستند. علاوه بر رویداد ثانویه همزمان، همیشه امکان افزایش دومینو در سطوح بالاتر وجود دارد. DSS های ارائه شده تاکنون عمدتاً بیش از سناریوهای دومینو سطح دوم را در نظر نمی گیرند. اگرچه از نظر مفهومی برخی از روش ها (مانند DOMIFFECT و نسخه دومینو نرم افزار Aripar-GIS) این قابلیت را دارند که برای در نظر گرفتن دومینوهای سطح بالاتر توسعه داده شوند، اما این گزینه در حال حاضر به دلیل نیاز به منابع محاسباتی و ظرفیت بالای سرورهای مورد نیاز فعلا مورد استفاده قرار نمی گیرد.

به دلیل ماهیت پیچیده حوادث دومینو بسته های نرم افزاری موجود هنوز به صورت تجاری مورد استفاده قرار نمی گیرند و استفاده از آنها در سطح مطالعه و تحقیق پژوهشگران باقی مانده است.

یک مانع در نظر گرفتن اثر دومینو در سطح بالاتر محدودیت مربوط به استفاده از روشهای تحلیلی برای برآورد فرکانس است. روشهای تحلیلی برای ارزیابی احتمال اثرات دومینو در سیستمهای پیچیده با تعداد زیاد واحد، محدودیت های ذاتی دارند. رویکردهای تحلیلی وروشهای گرافیکی (به عنوان مثال ، درخت رویداد ، شبکه بیزین) به مطالعه پدیده در سطح سیستم کمک میکنند اما در یک مطالعه با ده ها سازه قادر به هندل کردن پیچیدگی های موجود نخواهند بود. اگر ده ها مخزن وجود داشته باشد درخت رویداد برای تجزیه و تحلیل اثرات دومینو شاخه های زیادی خواهد داشت. یک ایده ساده این است که شاخه ها را در مرحله اولیه ترسیم درخت رویداد قطع کنیم. با این حال، اولین مانع انجام این کار دشواری تعریف معیارهای برش است. بعلاوه، اگر از معیارهای برش شاخه هایی که احتمال کمی دارند استفاده شود، ممکن است بیشتر شاخه ها قطع شوند زیرا شاخه های زیادی وجود دارد و هر شاخه احتمال بسیار کمی دارد.

علاوه بر این، اگر مجموعه ای از شاخه ها که گرچه هرکدام احتمال کمی دارند اما از یک دسته هستند قطع شوند، احتمال آن دسته به طور چشمگیری تحت تأثیر قرار می گیرد [۶۰].

در کاربردهای با مقیاس بزرگ، مدلDBN[2] به تعداد افزایش ترکیبی احتمالات شرطی نیاز دارد. علاوه بر این، مدل DBN از یک روش زمان بندی گسسته استفاده می کند، که ثابت شده کارآمد نیست. برای این منظور، توسعه مدل های DBN دارای سطح بالایی از پیچیدگی هستند و منابع محاسباتی مربوطه را برای گسترش به موارد واقعی صنعتی شامل تجزیه و تحلیل همزمان ده ها واحد می طلبند. بر همین اساس و به منظور کاهش عدم قطعیت ها و افزایش قابلیت اطمینان روشهای ارزیابی ریسک اثرات دومینو محققین در صدد به روزرسانی روشهای مذکور و یافتن شیوه های جدید هستند.

مراجع:

[1] J. I. Chang and C.-C. J. J. o. l. p. i. t. p. i. Lin, "A study of storage tank accidents," vol. 19, no. 1, pp. 51-59, 2006.

[1] Decision support systems
[2] Dynamic Bayesian Network

[2] R. M. Leite and F. R. J. J. o. h. m. Centeno, "Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires," vol. 342, pp. 544-552, 2018.
[3] I. M. Shaluf and S. A. J. J. o. L. P. i. t. P. I. Abdullah, "Floating roof storage tank boilover," vol. 24, no. 1, pp. 1-7, 2011.
[4] J. Casal and R.-M. Darbra, "Analysis of past accidents and relevant case-histories," in *Domino Effects in the Process Industries*: Elsevier, 2013, pp. 12-29.
[5] O. Ahmadi, S. B. Mortazavi, and H. A. Mahabadi, "Review of Atmospheric Storage Tank Fire Scenarios: Costs and Causes," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Review vol. 20, no. 2, pp. 384-405, 2020.
[6] F. I. Khan and S. J. P. S. P. Abbasi, "Models for domino effect analysis in chemical process industries," vol. 17, no. 2, pp. 107-123, 1998.
[7] A. Necci, V. Cozzani, G. Spadoni, F. J. R. E. Khan, and S. Safety, "Assessment of domino effect: State of the art and research Needs," vol. 143, pp. 3-18, 2015.
[8] N. J. R. E. Khakzad and S. Safety, "Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures," vol. 138, pp. 263-272, 2015.
[9] G. Reniers and V. Cozzani, *Domino effects in the process industries: modelling, prevention and managing*. Newnes, 2013.
[10] E. Salzano and V. Cozzani, "The use of probit functions in the quantitative risk assessment of domino accidents caused by overpressure," in *Proc. Eur. Conf. Safety and Reliability, Lisse, Netherlands*, 2003, pp. 1365-1373.
[11] C. Chen, G. Reniers, and N. J. S. s. Khakzad, "A thorough classification and discussion of approaches for modeling and managing domino effects in the process industries," vol. 125, p. 104618, 2020.
[12] N. Khakzad, G. J. R. E. Reniers, and S. Safety, "Using graph theory to analyze the vulnerability of process plants in the context of cascading effects," vol. 143, pp. 63-73, 2015.
[13] K. Moodie, "Experiments and modelling:- an overview with particular reference to fire engulfment," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 20, pp. 149-175, 1988/12/01/ 1988.
[14] G. L. Reniers and W. J. S. S. Dullaert, "DomPrevPlanning©: user-friendly software for planning domino effects prevention," vol. 45, no. 10, pp. 1060-1081, 2007.
[15] D. J. P. S. E. P. Bagster, "Estimation of domino incident frequencies-an approach," vol. 69, pp. 195-199, 1991.
[16] V. Cozzani, G. Gubinelli, and E. Salzano, "Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 129, no. 1, pp. 1-21, 2006/02/28/ 2006.
[17] P. U. De Haag and B. J. Ale, *Guidelines for quantitative risk assessment: purple book*. Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening (VROM), 2005.
[18] C. J. T. A. HSE, Londen, "an investigation of potential hazards from operations in the Canvey Island," 1978.
[19] V. Cozzani, A. Tugnoli, and E. Salzano, "The development of an inherent safety approach to the prevention of domino accidents," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 41, no. 6, pp. 1216-1227, 2009/11/01/ 2009.
[20] A. Tugnoli, F. Khan, P. Amyotte, and V. Cozzani, "Safety assessment in plant layout design using indexing approach: Implementing inherent safety perspective: Part 1 – Guideword applicability and method description," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 160, no. 1, pp. 100-109, 2008/12/15/ 2008.
[21] I. Lines, J. Gledhill, Health, and L. Safety Executive, *Development of methods to access the significance of domino effects from major hazard sites*. Sudbury: HSE Books, 1998.
[22] C. Van Den Bosh and R. J. C. f. t. P. o. D. Weterings, The Hague, "Methods for the calculation of physical effects (Yellow Book)," 1997.
[23] N. Alileche, V. Cozzani, G. Reniers, and L. Estel, "Thresholds for domino effects and safety distances in the process industry: A review of approaches and regulations," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 143, pp. 74-84, 2015/11/01/ 2015.
[24] V. Cozzani and E. Salzano, "The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 107, no. 3, pp. 67-80, 2004/03/19/ 2004.
[25] Z. Mingguang and J. Juncheng, "An improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 158, no. 2, pp. 280-286, 2008/10/30/ 2008.
[26] E. D. Mukhim, T. Abbasi, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, "Domino effect in chemical process industries triggered by overpressure—Formulation of equipment-specific probits," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 106, pp. 263-273, 2017/02/01/ 2017.
[27] E. Salzano and V. Cozzani, "A fuzzy set analysis to estimate loss intensity following blast wave interaction with process equipment," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, no. 4, pp. 343-352, 2006/07/01/ 2006.
[28] A. Tugnoli, G. Gubinelli, G. Landucci, and V. Cozzani, "Assessment of fragment projection hazard: Probability distributions for the initial direction of fragments," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 279, pp. 418-427, 2014/08/30/ 2014.
[29] G. Gubinelli, S. Zanelli, and V. Cozzani, "A simplified model for the assessment of the impact probability of fragments," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 116, no. 3, pp. 175-187, 2004/12/31/ 2004.
[30] A. Rum, G. Landucci, and C. Galletti, "Coupling of integral methods and CFD for modeling complex industrial accidents," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 53, pp. 115-128, 2018/05/01/ 2018.
[31] G. Landucci, G. Gubinelli, G. Antonioni, and V. Cozzani, "The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 41, no. 6, pp. 1206-1215, 2009/11/01/ 2009.
[32] F. I. Khan, S. J. E. m. Abbasi, and software, "DOMIFFECT (DOMIno eFFECT): user-friendly software for domino effect analysis," vol. 13, no. 2, pp. 163-177, 1998.
[33] V. Cozzani, G. Gubinelli, G. Antonioni, G. Spadoni, and S. J. J. o. h. M. Zanelli, "The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis," vol. 127, no. 1-3, pp. 14-30, 2005.
[34] G. Antonioni, G. Spadoni, and V. J. J. o. L. P. i. t. P. I. Cozzani, "Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area," vol. 22, no. 5, pp. 614-624, 2009.

and Explosion Accidents Considering Uncertainty in Processing Facilities," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 57, no. 11, pp. 3990-4006, 2018/03/21 2018.

[48] N. Khakzad, G. J. R. E. Reniers, and S. Safety, "Low-capacity utilization of process plants: A cost-robust approach to tackle man-made domino effects," vol. 191, p. 106114, 2019.

[49] N. J. P. s. p. Khakzad, "Reducing the attractiveness of chemical plants to terrorist attacks: Dehorning rhinos," vol. 37, no. 2, pp. 150-152, 2018.

[50] R. David and H. Alla, *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*. Springer, 2010.

[51] T. J. P. o. t. I. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications," vol. 77, no. 4, pp. 541-580, 1989.

[52] J. Zhou and G. Reniers, "Petri-net based cascading effect analysis of vapor cloud explosions," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 48, pp. 118-125, 2017/07/01/ 2017.

[53] M. Z. Kamil, M. Taleb-Berrouane, F. Khan, and S. Ahmed, "Dynamic domino effect risk assessment using Petri-nets," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 124, pp. 308-316, 2019/04/01/ 2019.

[54] B. Abdolhamidzadeh, T. Abbasi, D. Rashtchian, and S. A. Abbasi, "Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 24, no. 5, pp. 575-593, 2011/09/01/ 2011.

[55] A. Rad, B. Abdolhamidzadeh, T. Abbasi, and D. Rashtchian, "FREEDOM II: An improved methodology to assess domino effect frequency using simulation techniques," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, no. 6, pp. 714-722, 2014/11/01/ 2014.

[56] L. Zhang, G. Landucci, G. Reniers, N. Khakzad, and J. J. R. a. Zhou, "DAMS: A Model to Assess Domino Effects by Using Agent-Based Modeling and Simulation," vol. 38, no. 8, pp. 1585-1600, 2018.

[57] B. Abdolhamidzadeh, "Decision Support Systems for Preventing Domino Effects," in *Domino Effects in the Process Industries*: Elsevier, 2013, pp. 296-323.

[58] B. Abdolhamidzadeh, T. Abbasi, D. Rashtchian, and S. A. J. J. o. h. m. Abbasi, "A new method for assessing domino effect in chemical process industry," vol. 182, no. 1-3, pp. 416-426, 2010.

[59] A. Rad, B. Abdolhamidzadeh, T. Abbasi, D. J. P. S. Rashtchian, and E. Protection, "FREEDOM II: An improved methodology to assess domino effect frequency using simulation techniques," vol. 92, no. 6, pp. 714-722, 2014.

[60] L. Zhang, G. Landucci, G. Reniers, F. Ovidi, N. Khakzad, and J. J. C. E. Zhou, "Applying agent based modelling and simulation for domino effect assessment in the chemical industries," vol. 67, 2018.

[35] V. Cozzani, G. Antonioni, and G. Spadoni, "Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, no. 5, pp. 463-477, 2006/09/01/ 2006.

[36] G. Antonioni, G. Landucci, A. Necci, D. Gheorghiu, and V. Cozzani, "Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 142, pp. 334-345, 2015/10/01/ 2015.

[37] V. Cozzani, G. Antonioni, G. Landucci, A. Tugnoli, S. Bonvicini, and G. Spadoni, "Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 28, pp. 10-22, 2014/04/11/ 2014.

[38] M. M. van der Voort, A. J. J. Klein, M. de Maaijer, A. C. van den Berg, J. R. van Deursen, and N. H. A. Versloot, "A quantitative risk assessment tool for the external safety of industrial plants with a dust explosion hazard," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 20, no. 4, pp. 375-386, 2007/07/01/ 2007.

[39] X.-m. Zhang and C. Chen, "Mechanism analysis and risk assessment of escalation scenario in chemical industry zones," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 91, no. 1, pp. 79-85, 2013/01/01/ 2013.

[40] G. L. L. Reniers and W. Dullaert, "DomPrevPlanning©: User-friendly software for planning domino effects prevention," *Safety Science*, vol. 45, no. 10, pp. 1060-1081, 2007/12/01/ 2007.

[41] C. Chen, G. Reniers, and L. Zhang, "An innovative methodology for quickly modeling the spatial-temporal evolution of domino accidents triggered by fire," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 54, pp. 312-324, 2018/07/01/ 2018.

[42] P. Chen, Y. Huang, J. Mou, and P. H. A. J. M. van Gelder, "Probabilistic risk analysis for ship-ship collision: State-of-the-art," *Safety Science*, vol. 117, pp. 108-122, 2019/08/01/ 2019.

[43] N. Khakzad, F. Khan, and P. Amyotte, "Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 8, pp. 925-932, 2011/08/01/ 2011.

[44] F. Khan, S. Rathnayaka, and S. Ahmed, "Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 98, pp. 116-147, 2015/11/01/ 2015.

[45] N. Khakzad, F. Khan, P. Amyotte, and V. J. R. A. A. I. J. Cozzani, "Domino effect analysis using Bayesian networks," vol. 33, no. 2, pp. 292-306, 2013.

[46] N. Khakzad, P. Amyotte, V. Cozzani, G. Reniers, and H. Pasman, "How to address model uncertainty in the escalation of domino effects?," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 54, pp. 49-56, 2018/07/01/ 2018.

[47] J. Ji, Q. Tong, F. Khan, M. Dadashzadeh, and R. Abbassi, "Risk-Based Domino Effect Analysis for Fire

جدول ۱ : تعدادی از روشها و ابزارهای معرفی شده در زمینه ارزیابی اثرات دومینو

نام روش یا بسته نرم افزاری	ارایه دهنده	سال ارایه	رویکرد مطالعه	توانمندی آنالیز سطوح دومینو	نقاط قوت	نقاط ضعف
DOMINO-GSPN	بااو و همکاران	۲۰۰۸	گرافیکی	اول و بالاتر	ابزاری مناسب برای طراحی و فهم عملکرد سیستم است. در سطوح مختلفی از جزئیات میتواند موثر باشد	تنها مخاطرات سیستمی که مربوط به زمان بندی و تغییر حالت است را می شناسد. به سرعت بزرگ و پیچیده می شود.
BN[1]	کلانتر نیا و همکاران	۲۰۰۹	گرافیکی	اول	به روزرسانی احتمالات شرطی	عدم کارایی در چیدمانهای پیچیده و عدم در نظر گرفتن توالی زمانی عدم دقت کافی
Graph Theory	ابولی و همکاران	۲۰۱۰	گرافیکی	اول و بالاتر	توانایی شناسایی تاسیسات آسیب پذیر در برابر دومینو	نیاز به سرورهای بزرگ و زمان زیاد برای انجام تحلیل در سطوح بالاتر
DBN	خاکزاد و همکاران	۲۰۱۵	گرافیکی	اول و بالاتر	بهبود عملکرد نسبت به در به روز رسانی BN احتمالات شرطی	عدم کارایی در سیستمهای پیچیده
STARS Domino	بالوکو و همکاران	۲۰۰۱	گرافیکی	اول	ارتباط آسان با سایر نرم افزارها	اثرات سطح دوم و اثرات همزمان را در بر نمیگیرد.
Domino XL 2.0	دلووساله و همکارن	۲۰۰۲	تحلیلی	اول	کاربر پسند و راحت	عدم محاسبه احتمال و عدم امکان بارگذاری نقشه
Domino Version of Aripar-GIS	کوزانی و همکاران	۲۰۰۶	تحلیلی	اول	و استفاده GISپلت فرم از مقادیر آستانه پیشرفته	اثرات سطح دوم و بالاتر را در بر نمیگیرد
DomPrevPlanning	رینیرز و دولارت	۲۰۰۷	گرافیکی	اول	رتبه بندی تجهیزات و کاربرد آسان	عدم براورد فرکانس و عدم مدلسازی دقیق پیامد
FREEDOM	عبدالحمیدزاده	۲۰۱۰	شبیه سازی	اول و بالاتر	امکان ارزیابی سطوح بالاتر دومینو	نیاز به سرورهای بزرگ و زمان زیاد برای انجام تحلیل در سطوح بالاتر

[1] Bayesian Network

جدول ۲ : مشخصات تعدادی از مطالعات انجام شده در زمینه ارزیابی ریسک دومینو

منبع	نوع متد	مبنای محاسبه آسیب پذیری	بردار تشدید	پوشش سطوح دومینو	هزینه مدلسازی
Bagster and Pitblado(1991)	Analytical	Safety distance	Multiple	Higher- level	High in large scale
Khan and Abbasi(1998a)	Analytical	Probabilistic model	Multiple	First- level	Low
Cozzanietal.(2005),Cozzani et al.(2014	Analytical	Probit model	Multiple	First- level(extend to higher- level)	High in large scale
Reniers and Dullaert(2007)	Graphical	Safety distance	Multiple	Higher- level	Low
Abdolhamidzadeh et al.(2010),Radetal.(2014)	Simulation	Probit model	Multiple	First- level (extend to higher- level)	High
Khakzad et al.(2013)	Graphical	Probit model and threshold	Multiple	Higher- level	High in large scale
Khakzad(2015)	Graphical	Probit model and threshold	Heat radiation	Higher- level, temporal evolution	High in large scale
KhakzadandReniers(2015b	Graphical	threshold	Multiple	Higher- level	Low
Kamil et al.(2019) Zhou and Reniers(2017b)	Graphical	Probit model	Multiple	Higher- level	High
Zhang et al.(2018)	Simulation	Probit model	Heat radiation	Higher- level, temporal evolution	High
Chen et al.(2019b)	Graphical	Residual time to failure	Heat radiation	Higher- level, temporal evolution	Low