

چکیده

در محاسبات متداول ریسک لرزه‌ای عموماً ارتباط میان پارامترهای اثرگذار به صورت زنجیره‌ای دیده می‌شود. این نگاه امکان برقراری مستقیم ارتباط میان حلقه‌های غیرمجاور زنجیره پارامترها را سلب می‌نماید. تحت قید مذکور دامنه استفاده از روابط متداول محاسبه ریسک در مجموعه‌های پیچیده محدود می‌شود. در این تحقیق با بازنویسی روابط محاسبه ریسک لرزه‌ای و ایجاد امکان ارتباط میان حلقه‌های غیرمجاور از پارامترها، امکان افزایش کارایی روابط محاسبه ریسک لرزه‌ای فراهم آمده است. در ادامه با افزودن پارامترهای هوشمندی به معادلات محاسبه ریسک لرزه‌ای، امکان استفاده از روابط مذکور در برآورد ریسک تهاجم‌های هوشمند ایجاد شده است. این افزایش قابلیت با ارائه مثال‌های متعدد برای حالات مختلف مواجهه با تهدیدهای هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نحوه تعمیم کاربرد چارچوب پیشنهادی برای حالاتی که پارامترهای هوشمندی در طول تهاجم به صورت دینامیکی تغییر می‌نمایند تشریح شده است.

واژگان کلیدی: توسعه روابط ریسک لرزه‌ای، تهدیدهای هوشمند، پارامترهای هوشمندی، ریسک استاتیک و دینامیک.

توسعه روابط ریسک لرزه‌ای برای سیستم‌های پیچیده و تعمیم آن به مسائل مواجهه با تهدیدهای هوشمند

حسین جهان خواه (نویسنده مسئول)

استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
 h.jahankhah@iiees.ac.ir

علی علیدوستی

پژوهشگر پژوهشکده مدیریت بحران دانشگاه مالک اشتر

۱- مقدمه

است. در مجموعه‌های زنده، فاکتور تصمیم‌گیری، تمامی المان‌های ریسک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این اثرگذاری از تعاریف آغاز شده و به تغییر روابط و فرآیند محاسبات می‌انجامد. در ادامه مقدمه این مقاله ابتدا به ادبیات فنی محاسبه ریسک در زلزله به‌عنوان نمونه‌ای از حوادث طبیعی پرداخته شده و پس از آن مروری بر رویکردهای محاسبه ریسک با احتساب المان‌های تصمیم‌گیر و هوشمند ارائه خواهد شد.

سابقه تحقیقات نوین در راستای محاسبه ریسک متوجه دارایی‌ها در برابر زلزله، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدات طبیعی، به حدود نیم قرن می‌رسد. از اولین تحقیقات برای محاسبه ریسک خسارت زلزله می‌توان به پژوهش الگرمیسن و همکاران [۱] اشاره نمود. در پژوهش مذکور علاوه بر برآورد حجم تلفات و مجروحین، تخمینی بر خسارات اقتصادی نیز ارائه شده است. ویتمن و همکاران [۲] در سال ۱۹۷۳ از جمله نخستین افرادی بودند که روابط محاسبه احتمالاتی خسارت لرزه‌ای را مطرح

برآورد ریسک متوجه یک دارایی از دیرباز مورد توجه محققین بوده است. این موضوع با افزایش اثرگذاری دارایی در محیط اطراف و نیز دشواری‌های جایگزینی آن اهمیت چشمگیری می‌یابد. دامنه کاربرد برآورد ریسک بسیار وسیع است. خاستگاه اولیه محاسبه ریسک، مواجهه انسان با پدیده‌های طبیعی مانند زلزله و سیل و نیاز به ساختن زیربنای مدنی ایمن و پایدار بوده است. لازم به ذکر است به دلیل عدم مشخص بودن دقیق زمان، مکان و شدت رخداد تهدیدهای طبیعی، همواره محاسبه ریسک با مفاهیم آماری و احتمالاتی عجین بوده است. در نتیجه ورود عدم قطعیت‌ها به فرآیند محاسبه ریسک گریزناپذیر است. در سال‌های اخیر با توجه به نیاز چشمگیری سازمان‌های بیمه‌گر به محاسبه هزینه‌های بیمه، تحقیقات وسیعی برای محاسبه سطح ریسک یک دارایی در برابر حوادث طبیعی انجام شده است. محاسبه ریسک در مجموعه‌هایی با المان‌های زنده و تصمیم‌گیر به مراتب پیچیده‌تر از ریسک تهدیدهای طبیعی

نمودند. این روابط در تحقیق مذکور برای محاسبه خسارت وارد بر یک سازه پنج طبقه مورد استفاده قرار گرفته است. شول و همکاران [۳] در سال ۱۹۸۲ در زمینه محاسبه روابط تجربی و تئوری خسارت لرزه‌ای رویکردهای پیشین را ارتقاء قابل ملاحظه‌ای دادند. در بخشی از تحقیق مزبور، آزمایش‌های متعددی برای محاسبه توابع برآورد خرابی برای المان‌های مختلف سازه‌ای ارائه شده است. گروه تدوین آیین‌نامه ATC-13 [۴] در سال ۱۹۸۵ مطالعاتی را برای تدوین یک بانک داده مرتبط با خسارت احتمالی لرزه‌ای در ایالت کالیفرنیا آمریکا ارائه نمودند. در مطالعه مذکور ۹۱ سازه متفاوت اعم از صنعتی، تجاری و مسکونی مورد مطالعه قرار گرفتند. نتیجه تحقیق مذکور در قالب روابطی برای برقراری ارتباط احتمالاتی میان شدت زلزله و هزینه خسارات مطرح شد. در سال ۱۹۹۲ ویتمن و همکاران در قالب پروژه فیما [۵]، تحقیقاتی را برای برآورد خسارت بر پایه روش سنجش از دور پیاده‌سازی نمودند. نتایج این تحقیق در قالب نرم‌افزار شناخته شده هزوس در سال ۱۹۹۷ ارائه شد. مطابق روش ارائه شده، این امکان فراهم می‌آمد که با در دست داشتن سیستم باربر جانبی، ارتفاع و تراکم جمعیتی در سازه‌ها، پاسخ و خسارت سازه محاسبه شود. این مهم با استفاده از توابع ظرفیت و توابع شکنندگی برای محاسبه خسارات اقتصادی بر مبنای نتایج حاصل از سیستم‌های تک‌درجه آزادی محقق شده است. این نرم‌افزار با تصحیحاتی تاکنون مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که در سال ۲۰۱۶ چندین تحقیق با استفاده از این نرم‌افزار در زمینه تخمین ریسک نواحی مختلف به ثبت رسیده است [۶-۷]. گانتوری و شاه [۸] در سال ۱۹۹۳ یک روش مبتنی بر سناریوهای مختلف را برای محاسبه خرابی سازه ارائه نمودند. این محققین اجزای ساختمان را به سه بخش اجزای باربر سازه‌ای، اجزای غیر باربر سازه‌ای و محتویات سازه‌ها تقسیم‌بندی کرده و برای هر کدام نحوه برآورد خسارت را ارائه نمودند. سینگال و کرمیجیان [۹] در مطالعه خود در سال ۱۹۹۶ اثر تغییرات تحریک ورودی بر خسارات اقتصادی را در فرآیند

محاسبه خسارت بررسی نمودند. همچنین پورتر و کرمیجیان [۱۰] در سال ۲۰۰۱ رویکردی تمام احتمالاتی را پیشنهاد نمودند که در آن برای نخستین بار عدم قطعیت‌های محاسبه خسارت و هزینه تعمیر دارایی را مورد توجه قرار دادند. کورنل و کراوینکلر [۱۱] در سال ۲۰۰۰ چارچوبی را برای روابط محاسبه ریسک و خرابی ارائه کردند که از آن زمان تاکنون متداول‌ترین مبنای محاسبات ریسک لرزه‌ای محسوب می‌شود. در ادامه وامواتسیکوس و کورنل [۱۲] در سال ۲۰۰۲ افزایش تدریجی بارگذاری دینامیکی را به عنوان راهکاری برای برآورد توابع خرابی سازه در سطوح مختلف شدت زلزله پیشنهاد نمودند. در رویکردی مشابه، اصلانی و میراندا [۱۳] در سال ۲۰۰۵ روابطی را برای محاسبه احتمال خرابی سازه در برابر سطوح مختلف تهدید لرزه‌ای ارائه نمودند. همچنین بیکر و کورنل [۱۴] در سال ۲۰۰۵ اثر تغییرات شکل طیف پاسخ در تحریک ورودی لرزه‌ای را بر منحنی‌های شکنندگی مورد لحاظ قرار دادند. بیکر و کورنل [۱۵] در سال ۲۰۰۸ نحوه افزایش عدم قطعیت‌ها در فرآیند محاسبه ریسک را بررسی نمودند. سعادت و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۴ روابط پیشنهادی کورنل و کراوینکلر را برای تلفیق ریسک‌های مستقیم لرزه‌ای و ریسک‌های غیرمستقیم اجتماعی آن مورد استفاده قرار دادند.

دانش روز در زمینه برآورد ریسک مجموعه‌هایی که دارای المان‌های زنده و تصمیم‌گیر هستند نیز پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای داشته است. تمامی حوزه‌هایی که انسان نقشی در آن ایفا می‌کند، جزو این مجموعه‌ها محسوب می‌شوند. از جمله این حوزه‌ها می‌توان به اقتصاد، آموزش، سیاست و ورزش اشاره نمود. پیچیدگی تحلیل سیستم‌های هوشمند و دینامیک از شاخصه‌های آنهاست. هرچند تئوری‌های ریاضی درگیر با این مسئله از جمله تئوری بازی‌ها، سال‌ها مورد تحقیق پژوهشگران بوده است [۱۷]، لیکن هنوز فاصله زیادی با فراگیر شدن حل مسائل واقعی با استفاده از این ابزار و ابزارهای مشابه وجود دارد. به دلیل واقعیت فوق بسیاری از برآوردهای ریسک به سمت برآوردهای کیفی سوق داده شده و در این میان نظر صاحب‌نظران هر

در روابط (۱) و (۲) فرض شده است ارتباط پارامترها به صورت متوالی برقرار شده و پارامترهای غیر متوالی به صورت مستقل با یکدیگر در ارتباط نیستند. مثلاً هزینه خرابی یک المان در سازه هدف، DVE، برحسب اندیس خرابی ایجاد شده در سازه هدف، DM، محاسبه می‌شود و اندیس خرابی نیز به نوبه خود وابسته به تقاضای لرزه‌ای سازه هدف، EDP، می‌باشد. همچنین تقاضای لرزه‌ای سازه هدف، EDP، برحسب شدت لرزه تجربه شده توسط همان سازه، IM، محاسبه می‌شود. لیکن چنانچه جنبش زمین به صورت غیر زنجیره‌ای خرابی ایجاد کند نوشتار باید تغییر یابد. برای مثال در صنایع پتروشیمی چنانچه در اثر زلزله یک سازه مجاور روی سازه هدف سقوط کند، خرابی یک سازه وابسته به تقاضای لرزه‌ای سازه مجاور خواهد شد. در چنین حالتی در معادله (۳) که برای سازه هدف نوشته شده، هزینه خرابی یک المان نه تنها به تقاضای لرزه‌ای خود سازه مربوط می‌شود، بلکه به صورت غیرمستقیم از تقاضای لرزه‌ای سازه مجاور نیز تأثیر می‌پذیرد. تقاضای لرزه‌ای سازه مجاور نیز تابعی از شدت لرزه تجربه شده است که معمولاً برای دو سازه مجاور یکسان است. از این رو هزینه خسارت به یک المان سازه هدف، DVE، به جز از طریق تقاضای لرزه‌ای خود سازه، از طریق دیگری نیز ارتباط مستقیم با IM برقرار می‌نماید. این در حالی است که ارتباط زنجیره‌ای نشان داده شده در رابطه (۳) تنها ارتباط DVE با IM را از طریق تقاضای لرزه‌ای خود سازه می‌بیند و تقاضای لرزه‌ای سازه مجاور را وارد محاسبات نمی‌نماید. راهکار حل این مسئله در بخش بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با عنایت به مثال فوق دیده می‌شود که در گام نخست روابط متداول لرزه‌ای نیاز به تعمیم برای لحاظ نمودن غیر زنجیره‌ای پارامترها دارد. لازم به ذکر است که نکته برقراری رابطه غیر زنجیره‌ای در اجزای روابط (۳) و (۴) در تحقیق کورنل و کراوینکلر [۱۱] مورد اشاره قرار گرفته است؛ لیکن در مقاله مذکور تأکید شده در اغلب مسائل می‌توان از این ارتباط صرف نظر کرد. چنانچه در نظر باشد روابط مورد استفاده در برآورد ریسک لرزه‌ای به صورت هم‌زمان برای برآورد ریسک‌های هوشمند محیطی نیز مورد استفاده قرار گیرند، نیاز است مهم‌ترین عوامل

حوزه در تعیین میزان ریسک نقش کلیدی را بازی می‌کند [۱۸-۱۹]. هر کدام از حوزه‌های فوق‌الذکر دارای ادبیات فنی مختص خود بوده و موضوع این تحقیق نیست. از آنجا که هدف از این تحقیق تعمیم روابط ریسک لرزه‌ای است، از ارائه ادبیات فنی ریسک در حوزه‌های دیگر صرف نظر شده و تنها در بخش طرح مسئله، به فراخور نیاز، ادبیات فنی ریسک تهدیدهای هوشمند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- طرح مسئله

از جمله رایج‌ترین روابط ریسک لرزه‌ای می‌توان به روابط (۱) و (۲) اشاره نمود [۲۰].

$$\lambda_{TC}(z) = \int \int \int G_{TC|DVE}(z, u) f_{DVE|DM}(u, v) \quad (1)$$

$$f_{DM|EDP}(v, y) f_{EDP|IM}(y, x) |d\lambda_{IM}(x)|$$

$$\lambda_{IM}(x) = v \int_M \int_R P(IM > x | M, R) f_M f_R dM dR \quad (2)$$

در روابط فوق پارامترهای TC، DVE، DM، EDP، IM، R، M و v به ترتیب کل هزینه خسارت، هزینه خسارت به یک المان، اندیس خرابی، تقاضای لرزه‌ای، شدت لرزه تجربه شده، بزرگای زلزله، فاصله تا گسل مسبب و نرخ کل رویدادهای لرزه‌ای می‌باشد. همچنین λ_{TC} و λ_{IM} به ترتیب، نرخ تجربه شدتی بیش از مقدار X و نرخ تحمیل هزینه کل بیش از مقدار z است. در واقع پارامتر تصمیم‌گیری در محاسبه ریسک λ_{TC} می‌باشد. به گونه‌ای که در صورت قرارگیری مقدار این پارامتر در بازه‌ای مشخص، سطح ریسک متوجه دارایی مشخص می‌شود. چنانچه در روابط فوق نرخ کل رویدادهای لرزه‌ای حذف شده، روابط تنها به صورت احتمالاتی بازنویسی شده و در بازنویسی، همه توابع احتمال با نماد P معرفی شوند روابط (۱) و (۲) به روابط (۳) و (۴) تبدیل می‌شوند:

$$P_{TC} = \int \int \int P_{TC|DVE} P_{DVE|DM} P_{DM|EDP} P_{EDP|IM} P_{IM} \quad (3)$$

$$P_{IM} = \sum_M \sum_R P_{IM|M,R} P_M P_R \quad (4)$$

یکدیگر و عوامل تأثیرگذار به صورت ضمنی لحاظ می شود و در روابط به صورت صریح جایگاهی برای پارامترهای هوشمندی دیده نمی شود. چنانچه در نظر باشد پارامترهای اثرگذار به صورت مستقیم وارد محاسبات شوند روابط محاسبه ریسک باید به صورت جامع تری بازنویسی گردند. در این راستا لازم است سطح دانش مهاجم و مدافع از خود و از دیگری در محاسبات وارد شود. همچنین توان اعمال تصمیمات هوشمند توسط هر یک از طرفین مهاجم و مدافع باید در بازنویسی روابط جامع دیده شود.

در این تحقیق با تعمیم و بازنویسی روابط ریسک امکان استفاده آنها در برآورد ریسک لرزه ای که منشأ تصادفی دارد، از یک سو و محاسبه ریسک تهدیدات هوشمند، از سوی دیگر، به صورت مستقل فراهم شده است. لازم به ذکر است روابط تعمیم داده شده امکان استفاده در تهدیدهای توأم لرزه ای - هوشمند را نیز دارا می باشند که موضوع این تحقیق نخواهد بود. در ادامه ابتدا فرم اولیه روابط تعمیم یافته ریسک لرزه ای برای لحاظ نمودن اثرات غیرمستقیم به همراه مثال ارائه می شود. سپس فرم ثانویه تعمیم یافته روابط ریسک لرزه ای که اثرات هوشمندی تهدید در آن لحاظ شده به همراه چند مثال تبیین شده است.

۳- روابط تعمیم یافته ریسک لرزه ای

فرم تعمیم یافته چارچوب محاسبه ریسک لرزه ای در روابط (۷) و (۸) ارائه شده است [۱۱]. همان طور که مشاهده می شود تفاوت رابطه (۶) با رابطه (۳) خارج شدن نوشتار از حالت زنجیره ای است. بدین معنی که دیگر هر پارامتر با واسطه با پارامترهای دیگر در ارتباط نیست. بلکه به صورت مستقیم نیز ارتباطها برقرار می شود. این برقراری ارتباط مستقیم در رابطه (۶) با اضافه نمودن پارامترهای با رنگ قرمز مشخص شده است.

$$P_{TC} = \iiint P_{TC|DVE, DM, EDP, IM} P_{DVE|DM, EDP, IM} P_{DM|EDP, IM} P_{EDP|IM} P_{IM} \quad (۷)$$

$$P_{IM} = \sum_M \sum_R P_{IM|M, R} P_{R|M} P_M \quad (۸)$$

چنانچه روابط (۷) و (۸) تلفیق شده و تطابقی میان روابط

اثرگذار در فرآیند تهاجم - تدافع هوشمند در این روابط گنجانده شوند. در ادبیات فنی بحث ریسک تحت تهاجم هوشمند، سه پارامتر تهدید (T)، آسیب پذیری (V) و هزینه (C)، متغیرهای اصلی برآورد ریسک محسوب می شوند. در رویکرد کمی محاسبه ریسک هوشمند رابطه پایه زیر بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [۱۹، ۲۱].

$$R = P(C) \times P(V) \times P(T) \quad (۵)$$

در این رابطه $P(T)$ ، $P(V)$ و $P(C)$ به ترتیب احتمال رخداد تهدید T، احتمال ایجاد آسیب پذیری V و احتمال تحمیل هزینه C است. نکته جالب توجه آن است که به دلیل پیچیدگی های بحث ریسک تحت تهاجم هوشمند، در بسیاری از مراجع حتی از رابطه ساده (۵) استفاده نشده و به تحلیل کیفی بحث ریسک بسنده شده است. این رابطه احتمال هم زمانی یک سطح از هزینه مشخص را زمانی که دارایی سطحی از آسیب معلوم را تحت تهاجم یک تهدید مشخص تجربه کند به دست می دهد. در صورتی که نیاز باشد سطوح مختلف تحت هر یک از سه پارامتر تهدید، آسیب پذیری و هزینه در محاسبه وارد شوند به تعداد حالات مورد بررسی محاسبه انجام شده و سپس احتمال فراگذشت از یک هزینه خاص از مجموع تمامی حالات به دست می آید. فرم کامل تر این رابطه را می توان به صورت شرطی مطابق رابطه (۶) بازنویسی نمود.

$$P_{ijk} = P(C_i|V_j, T_k) P(V_j|T_k) P(T_k) \quad (۶)$$

در نوشتار فوق تعاریف بخش های مختلف رابطه به صورت زیر است.

احتمال آسیب پذیری در سطح V_j به شرط مواجهه با تهاجم

$$P(V_j|T_k) \quad T_k$$

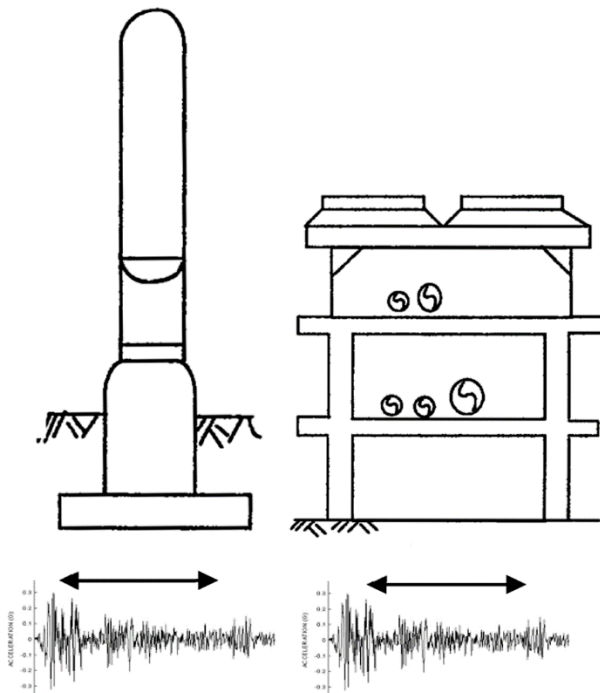
احتمال رخداد هزینه C_i به شرطی که تهاجم T_k به دارایی

$$P(C_i|V_j, T_k) \quad \text{در سطح } V_j \text{ آسیب تحمیل کرده باشد}$$

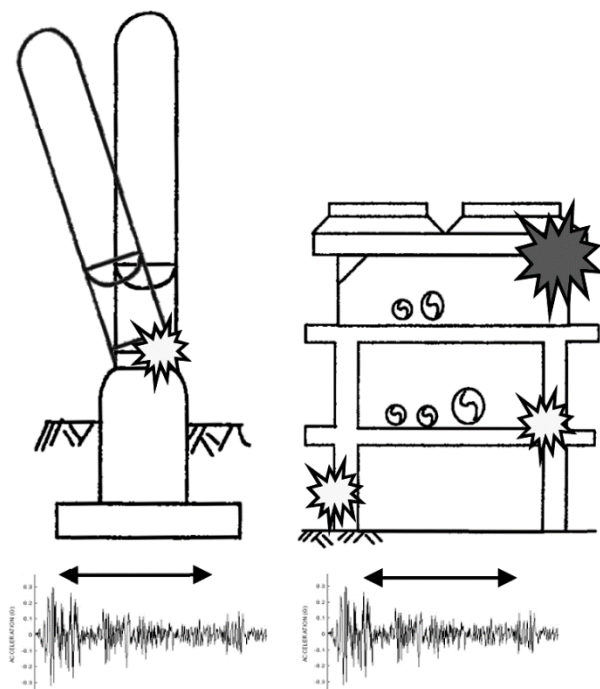
احتمال یا ریسک تهاجم T_k و تحمیل آسیب به دارایی در

$$P_{ijk} \quad \text{سطح } V_j \text{ و رخداد هزینه } C_i \text{ در پی این آسیب رسانی}$$

در این نوع نوشتار، معمولاً ارتباط پارامترهای مختلف با



شکل (۱): الف) دو سازه مجاور (الف) و (ب) تحت اثر زلزله مشابه و پیش از تجربه خرابی‌ها.



شکل (۱): ب) دو سازه مجاور (الف) و (ب) تحت اثر زلزله مشابه و پس از خرابی‌های درون‌سازه‌ای و بین‌سازه‌ای.

در حالت دوم اگر این سقوط بر یک تیر عضو اصلی سیستم برابر سازه هدف واقع شود، علاوه بر تغییر در توابع توزیع

ریسک لرزه‌ای این بخش و روابط ارائه شده در بخش قبل انجام شود می‌توان به تقسیم‌بندی رابطه (۹) دست یافت:

$$P_{TC} = \int \int \int \int P_{TC|DVE, DM, EDP, IM} P_{DVE|DM, EDP, IM} P_{DM|EDP, IM} P_{EDP|IM} \sum_M \sum_R P_{M|M, R} P_{RM}^M P_M^M \quad (9)$$

در رابطه فوق بخش تهدید، آسیب در اثر تهدید و هزینه مرتب بر آن از هم تفکیک شده‌اند. در روابط ریسک لرزه‌ای مانند سایر حوزه‌ها، ریسک ترجمه ریالی دارد. لیکن عموماً آثار بلندمدت کمتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین از آثار غیرمستقیم معمولاً صرف‌نظر می‌شود. لازم به ذکر است نوشتار ارائه شده در رابطه (۹) برای محاسبه ریسک لرزه‌ای نسبت به روابط متداول (۳) و (۴)، از دقت بیشتری برای در نظر گرفتن آثار مذکور برخوردار است. به‌عنوان نمونه در صورتی که برای تک‌تک پارامترها دو سطح در نظر گرفته شود تعداد درایه‌های ماتریس‌های محاسباتی توانی از ۲ خواهد بود که نحوه نمایش درایه‌های مذکور به‌صورت نمونه در ضمیمه این مقاله ارائه شده است.

۳-۱- نمونه برآورد احتمال هزینه وارد بر یک دارایی با استفاده از روابط تعمیم یافته لرزه‌ای

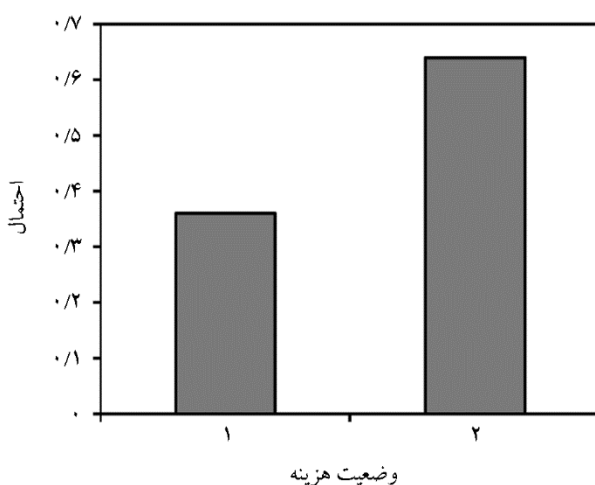
به‌عنوان نمونه مطابق شکل (۱-الف) دو دارایی مستقل (الف) و (ب) که در مجاورت یکدیگر قرار دارند در یک مجتمع پتروشیمی مفروض است. زلزله‌ای مجتمع را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. این جنبش زمین میزان خسارت خاصی را به‌صورت مستقیم بر دارایی (الف) وارد می‌نماید. این در حالی است که ممکن است در دارایی مجاور نیز بر اثر زلزله، بخشی شکسته و آزاد شده و بر روی دارایی (الف) سقوط نماید و خسارت اضافی را به‌صورت غیرمستقیم وارد کند. از طرفی ممکن است این خسارت هر دو خرابی کلی و محلی را تحت تأثیر قرار دهد. به‌عنوان نمونه در حالت اول، اگر این بخش جدا شده بر روی بخش غیر سازه‌ای از دارایی اول سقوط نماید و حتی تخریب ۱۰۰ درصد آن بخش از دارایی را به همراه داشته باشد، فقط ماتریس خسارت محلی را تحت الشعاع قرار خواهد داد. از سوی دیگر

$$P^T(DM|EDP, IM) = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.8 & 0.8 & 0.8 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$P^T(DVE|DM, EDP, IM) = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.8 & 0.8 & 0.8 & 0.8 \end{bmatrix}$$

$$P^T(TC|DVE, DM, EDP, IM) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.3 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.5 \\ 0.7 & 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix}$$



شکل (۲): توزیع احتمال تجربه نمودن سطوح مختلف هزینه‌ها.

۴- تعمیم روابط ریسک لرزه‌ای به مسائل مواجه با تهدیدهای هوشمند

در این بخش روابطی برای محاسبه ریسک تهدیدهای هوشمند ارائه خواهد شد که نواقص روابط متداول مطابق آنچه در بخش طرح مسئله ذکر شد را نخواهد داشت و از رویکرد بهبود یافته لرزه‌ای نیز در آن بهره گرفته شده است.

۴-۱- روابط پایه

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، ریسک چیزی جز احتمال وقوع سطحی از یک عقوبت خاص و یا به عبارتی احتمال تحمیل سطحی از هزینه‌ها نیست؛ بنابراین کافی است رابطه‌ای پیشنهاد شود که برای هر دارایی با توجه به تهدیدهای موجود، موقعیت زمانی- مکانی- وضعیتی دارایی و مخاطره ایجاد شده برای

احتمالاتی خرابی محلی، خرابی کلی نیز تحت الشعاع قرار می‌گیرد. در این دو حالت صرفاً اثرات غیرمستقیم شدت خرابی بر روی میزان خرابی محلی و کلی مد نظر بوده و برای سادگی و فهم بهتر از سایر وابستگی‌ها در این دو مثال صرف نظر شده است. این مفهوم در شکل (۱-ب) به تصویر کشیده شده است. پس از زلزله دارایی (الف) در دو نقطه به صورت مستقیم از زلزله آسیب دیده است. این نقاط با ستاره‌های زرد رنگ در شکل (۱-ب) مشخص شده‌اند. همچنین در اثر زلزله تجهیز سازه مجاور شکسته شده و بر روی دارایی (الف) سقوط نموده است. این سقوط اثرات تخریبی غیرمستقیمی را در دارایی (الف) وارد می‌نماید. رابطه (۱۰) معرف حالت اول که در آن صرفاً خرابی محلی سیستم تحت الشعاع قرار گرفته است؛ بدین مفهوم که بخش توزیع احتمالاتی مربوط به $P_{DVE|DM}$ به صورت $P_{DVE|DM,IM}$ تغییر می‌نماید. همچنین رابطه (۱۱) نشان‌دهنده‌ی دومین حالت مفروض است که ماتریس توزیع احتمالاتی خرابی کلی نیز علاوه بر خرابی محلی تحت تأثیر قرار گرفته است. در این راستا از ترم‌های $P_{DM|EDP,IM}$ و $P_{DVE|DM,IM}$ به ترتیب به جای $P_{DM|EDP}$ و $P_{DVE|DM}$ استفاده شده است.

$$P_{TC} = \int \int \int \int P_{TC|DVE} P_{DVE|DM,IM} P_{DM|EDP} P_{EDP|IM} P_{IM} \quad (10)$$

$$P_{TC} = \int \int \int \int P_{TC|DVE} P_{DVE|DM,IM} P_{DM|EDP,IM} P_{EDP|IM} P_{IM} \quad (11)$$

در ادامه به عنوان نمونه مثالی با استفاده از رابطه (۹)، که حالت جامع تری نسبت به روابط (۱۰) و (۱۱) می‌باشد، ارائه شده است. ماتریس‌های احتمالاتی مفروض برای این مثال در ادامه معرفی شده است. برای هر یک از پارامترهای DM ، DVE ، TC ، EDP ، IM دو حالت در نظر گرفته شده که از ترکیب احتمالاتی آنها ۳۲ حالت پدید می‌آید. شکل (۲) توزیع احتمال تجربه نمودن سطوح مختلف هزینه‌ها را نشان می‌دهد.

$$P(IM) = [0.7 \quad 0.3] ,$$

$$P(EDP|IM) = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0.4 & 0.6 \end{bmatrix} ,$$

در این رابطه علاوه بر پارامترهای گذشته، پارامتر S که نشان‌دهنده‌ی موقعیت زمانی- مکانی- وضعیتی دارایی است به روابط اضافه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بخش آخر رابطه (۱۲) به صورت رابطه (۱۳) قابل بازنویسی است که در آن دانش مالک از دارایی خود، دانش مالک از تهدیدهای مهاجم، تحلیل مالک با استفاده از دانش موجود و انجام فعل حفاظتی، دانش مهاجم از دارایی هدف، دانش مهاجم از توانمندی تهاجمی خود و تحلیل با استفاده از دانش موجود و ارتقای سطح تهاجم، وارد شده است.

در مقایسه رابطه (۱۲) که فرم مواجهه با تهدیدهای هوشمند است، با رابطه (۹) که فرم تکمیل شده محاسبه ریسک لرزه‌ای است، مشاهده می‌شود که چنانچه پارامتر S از معادله (۱۲) حذف شود، این معادله شباهت بسیاری به معادله (۹) پیدا می‌کند. به عبارتی چنانچه احتمال قرارگیری وضعیتهای مختلف دارایی در برابر زلزله یکسان باشد عملاً معادله (۱۲) به فرم ساده‌تر رابطه (۹) تبدیل می‌شود. اتخاذ این فرض در محاسبات ریسک لرزه‌ای متداول است؛ زیرا به دلیل تصادفی بودن فرآیند زلزله، احتمال اینکه جنبش اصلی زمین از برای‌های مختلف دارایی را تحت تأثیر قرار دهد معمولاً یکسان فرض می‌شود. لیکن در تهدیدهای هوشمند احتمال انتخاب برای‌های مختلف دارایی برای تهاجم به دلیل وجود فاکتور تصمیم‌گیری و جذابیت دارایی برای مهاجم، یکسان نبوده و دارای توابع توزیع قابل پیش‌بینی است. این موضوع به گونه‌ای است که حتی مالک دارایی با اتخاذ تدابیری می‌تواند نحوه تهاجم را هدایت نموده و توابع توزیع از پیش تعیین شده‌ای را بر سیستم دیکته کند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در محاسبه ریسک متوجه دارایی n، توابع توزیع مختلفی مورد نیاز است که برای محاسبه هر کدام می‌توان از روش‌های شبیه‌سازی مجازی، برداشت‌های تجربی، تاریخچه تقابل‌های گذشته به همراه برخی فرضیات ساده کننده بهره برد. برای تشکیل فضای احتمالاتی هر یک از پارامترهای فوق، مجموعه‌ای از تحقیقات مورد نیاز است. حوزه این تحقیقات شکل

دارایی به واسطه تهدید، بتواند احتمال وقوع سطح خاصی از هزینه را برآورد نماید. رابطه مذکور زمانی کامل می‌شود که در آن سطح دانش مهاجم و مالک از امکانات خود و امکانات طرف مقابل دیده شده باشد. برای این منظور روابط زیر، برای محاسبه ریسک وقوع پیامدی فراتر از عقوبت نام در سطح نام که متوجه دارایی نام است پیشنهاد می‌شود.

$$P^n(C > C_{ij}) = \sum_z \sum_q \sum_k P^n(C > C_{ij} | V^z, S^q, T^k) P^n(V^z | S^q, T^k) P^n(S^q, T^k) \quad (12)$$

$$P^n(S^q, T^k) = \sum_w \sum_u \sum_x \sum_y \sum_e \sum_f \left[P^n(S^q, T^k | \overline{IS}_u^q, \overline{IT}_y^k, \overline{AS}_w^{qkxy}, IS_e^q, IT_f^k, AS^{qkef}) \times P^n(IS_u^q, IT_y^k, AS_w^{qkxy}, IS_e^q, IT_f^k, AS^{qkef}) \right] \quad (13)$$

در روابط فوق پارامترهای مختلف به صورت زیر تعریف می‌شوند.

k	شمارنده تهدیدهای مختلف
q	شمارنده وضعیت‌های مختلف دارایی نام
x	شمارنده سطح دانش مالک از وضعیت دارایی
y	شمارنده سطح دانش مالک دارایی از تهدید
z	شمارنده وضعیت مخاطره‌آمیز
e	شمارنده سطح دانش مهاجم از وضعیت دارایی
f	شمارنده سطح دانش مهاجم نسبت به امکانات تهاجمی
u	شمارنده سطح حفاظت اعمال شده مالک
w	شمارنده سطح تهدید اتخاذ شده توسط مهاجم
\overline{IS}_x^q	پارامتر سطح دانش مالک از دارایی خود در وضعیت q
\overline{IT}_y^k	پارامتر سطح دانش مالک از تهدید نام
\overline{AS}_u^{qkxy}	پارامتر سطح حفاظت اعمال شده توسط مالک با فرض سطوح دانش x و y از وضعیت q دارایی و تهدید نام
IS_e^q	پارامتر سطح دانش مهاجم از دارایی هدف در وضعیت
IT_f^k	پارامتر سطح دانش مهاجم از امکانات خود در تهدید
AS_w^{qkef}	پارامتر سطح تهدید اتخاذ شده توسط مهاجم با فرض سطوح دانش مشخص e و f، از وضعیت q دارایی و تهدید نام

تهدید در تعداد حالات وضعیت حاصل شده است. همچنین عدد ۶۴ از حاصل ضرب تعداد سطوح در هریک از بخش های دانش در هم به دست آمده است. این ماتریس، به عنوان نمونه، با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) قابل برآورد است. در این مثال دامنه ی پارامتر حد واسط DV که همه اندیس های مؤثر در آن لحاظ شده اند، مابین ۰/۲۲ و ۴/۴۷ است. اعداد نزدیک به کران بالای پارامتر معرف وضعیت مناسب مدافع و اعداد نزدیک به کران پایین معرف وضعیت مناسب مهاجم در تقابل بین مدافع و مهاجم است. لازم به ذکر است در رابطه (۱۵)، شرط نرمال بودن درایه های ماتریس احتمال شرطی رعایت شده است. با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۶)، رابطه (۱۳) قابل محاسبه است.

$$p^n(S^q, T^k | \overline{IS}_x^q, \overline{IT}_y^k, \overline{AS}_u^{qkxy}, IS_e^q, IT_f^k, AS_w^{qkef}) = \frac{F_{q,k}^{x,y,u,e,f,w}}{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 F_{q_i,k_j}^{x,y,u,e,f,w}} \quad (15)$$

$$F_{q,k}^{x,y,u,e,f,w} = \begin{cases} DV^3 & DV < 0.75 \\ DV^5 & 0.75 < DV < 1.25 \\ \left(\frac{1}{DV}\right)^3 & DV > 1.25 \end{cases}$$

$$DV_{qk}^{xyuefw} = \frac{1 \times x + 1 \times y + 2 \times u}{1 \times e + 1 \times f + 2 \times w} \times \left(\frac{q}{k}\right)^{0.5} \quad (16)$$

در گام بعد، تابع توزیع احتمال مربوط به وابستگی آسیب پذیری به سطوح تقابل مدافع و مهاجم، نیز بر اساس تابع توزیع نرمال و به صورت رابطه (۱۷) فرض می شود. در رابطه (۱۸)، نحوه محاسبه میانگین، $\mu_{k,q}$ ارائه شده است. این رابطه، با توجه به پنج سطح تهدید و پنج سطح وضعیت، می تواند مقادیری بین ۰/۰۰۸ و ۱۲۵ اختیار کند. در این میان کران پایین مربوط به سطح بالای وضعیت و سطح پایین تهدید بوده و کران بالا مربوط به سطح پایین وضعیت و سطح بالای تهدید است. همچنین نحوه محاسبه انحراف معیار، $\sigma_{x,y,u,e,f,w}$ در رابطه (۱۹) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود این رابطه تنها تابع سطوح دانش مالک و مهاجم در نظر گرفته شده است. پیش زمینه در نظر گیری رابطه انحراف معیار در این قسمت آن است که هر چه تفاوت دانش مهاجم و مدافع بیشتر باشد، پراکندگی توزیع حول میانگین

درختی به خود می گیرند. بدین معنی که هر رابطه به زیر روابطی تقسیم می شود و هر زیر رابطه نیز بر اساس تحقیقات هدفمند قابل حصول است؛ بنابراین گام نخست در تشکیل یک مجموعه متوازن محاسبه ریسک، تعیین مجموعه نیازهای تحقیقاتی برای تکمیل بانک اطلاعاتی و سپس تولید توابع توزیع آماری مبتنی بر آن است. لازم به ذکر است نحوه شکل و تکمیل بانک اطلاعاتی مذکور و توابع توزیع مربوطه موضوع این تحقیق نیست.

۳-۳-۲- نمونه برآورد ریسک انفجار با استفاده از روابط پیشنهادی

هدف از این بخش ارائه مثالی برای بررسی احتمال سطوح مختلف هزینه ها با استفاده از رویکرد جدید معرفی شده در روابط (۱۲) و (۱۳) است. برای تک تک روابط معرفی شده، توابع منطقی فرض شده و چندین مثال نیز برای حالات مختلف سطوح دانش و توان انجام افعال حفاظتی و تهاجمی ارائه شده است. توابع فرض شده به قرار زیر است:

بخش $p^n(\overline{IS}_x^q, \overline{IT}_y^k, \overline{AS}_u^{qkxy}, IS_e^q, IT_f^k, AS_w^{qkef})$ در رابطه (۱۳)، با فرض عدم اشتراک مابین بخش های تشکیل دهنده آن، به صورت رابطه (۱۴) قابل محاسبه است. در این رابطه تک تک پارامترهای مورد نیاز به وسیله توزیع احتمالاتی با در نظر گیری سطوح مختلف برای هر کدام به عنوان داده های ورودی مسئله تعریف می شود.

$$p^n(V^z | S^q, T^k) \quad (14)$$

همچنین اندیس جدیدی به منظور تعریف تابع توزیع احتمال مربوط به بخش اول در رابطه (۱۳) $(p^n(S^q, T^k | \overline{IS}_x^q, \overline{IT}_y^k, \overline{AS}_u^{qkxy}, IS_e^q, IT_f^k, AS_w^{qkef}))$ در ادامه معرفی می شود. هدف اصلی از ارائه این تابع، وارد نمودن یک رویکرد منطقی در برآورد میزان توابع توزیع احتمالاتی است. این ماتریس توزیع تابع احتمالاتی برای مثال مفروض در این بخش با توجه به فرض پنج تهدید و پنج وضعیت دارایی ($k=5$ و $q=5$) و همچنین دو سطح برای تک تک بخش های سطح دانش، دارای ۲۵ ستون و ۶۴ سطر است. عدد ۲۵ از حاصل ضرب تعداد حالات

این تابع، میانگین و انحراف از معیار، μ_z و σ ، به ترتیب مطابق رابطه (۲۱) در نظر گرفته شده‌اند. در این رابطه میانگین اعداد بین ۰/۸ و ۵ را اختیار می‌کند که کران پایین مربوط به سطح اول هزینه و کران بالا مربوط به سطح آخر هزینه است. همچنین انحراف معیار برای تمامی حالات برابر ۰/۵ لحاظ شده است.

$$p^n(C|V^z) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-0.5(\frac{J-z}{\sigma})^2)}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-0.5(\frac{J-z}{\sigma})^2)} \quad (20)$$

$$\mu_z = (\frac{z+15}{20}) z, \quad \sigma = 0.5 \quad (21)$$

در این قسمت در قالب چندین مثال مقادیر احتمال مواجه شدن با سطوح مختلف هزینه‌ها برای توابع توزیع مختلف احتمال سطوح دانش مدافع از خود، دانش مدافع از مهاجم، سطح اقدام مدافع، دانش مهاجم از خود، دانش مهاجم از مدافع و سطح اقدام مهاجم محاسبه شده است. به منظور سهولت بیشتر برای هر کدام از این پارامترها دو سطح در نظر گرفته شده و مقادیر احتمالاتی آنها ارائه شده است. به عنوان نمونه سطح ۱ برای بخش دانش مدافع از خود به مفهوم عدم وجود دانش از خود بوده و سطح ۲ به مفهوم وجود دانش است. در مورد سطوح اقدام نیز، سطح ۱ به مفهوم عدم توانایی در اقدام و سطح ۲ به مفهوم توانایی در اقدام است. لازم به ذکر است در مثال‌های ارائه شده دو عبارت «مدافع با دانش اندک از خود» و «مهاجم با دانش اندک از خود» ممکن است کمی عجیب جلوه کند. لیکن در بسیاری موارد چنانچه مدافع یا مهاجم توان دسته‌بندی مناسب و پردازش اطلاعات دارایی‌های خود را نداشته باشند، کاملاً محتمل است حتی نسبت داشته‌های خود نیز دانش اندکی داشته باشند.

۴-۲-۱- مهاجم کور

در این مثال فرض شده است که مهاجم اطلاعات بسیار پایینی از خود و مدافع داشته و همچنین از سطح اقدام مناسبی نیز برخوردار ناست. در نقطه مقابل، مدافع سطح دانش مناسبی از خود، مهاجم داشته و توانایی مناسبی برای اقدام دارد. این فرضیات با افزایش مقادیر

باید کمتر باشد. معنی کمتر بودن پراکندگی حول میانگین، شاخص شدن یک سطح از آسیب‌پذیری در برابر سایر سطوح است. در مقابل هرچه تفاوت دانش طرفین تقابل کمتر باشد و به عبارتی طرفین هم‌وزن تر باشند، احتمال رخداد آسیب در سطوح مختلف به هم نزدیک می‌شود. از این رو رابطه انحراف معیار به صورت تابعی از زاویه میان بردار احتمال سطح یک، برای دانش مالک - مهاجم و بردار احتمال سطح دو، برای دانش مالک - مهاجم، θ ، در نظر گرفته شده است. زاویه مذکور می‌تواند بین صفر و ۹۰ درجه تغییر نماید که عدد صفر نشان‌دهنده‌ی مشابهت سطح دانش مالک با مهاجم و عدد ۹۰ نشان‌دهنده‌ی بیشترین تفاوت میان سطح دانش مالک با مهاجم است. در این رابطه برای پارامتر کالیبراسیون σ_v ، مقداری ثابت برابر با ۵ در نظر گرفته شده است. بر مبنای رابطه (۱۹) میزان انحراف معیار می‌تواند اعدادی بین ۰/۱ تا ۵ انتخاب نماید. عدد ۰/۱ مربوط به بیشینه تفاوت سطح دانش مالک و مهاجم و عدد ۵ مربوط به حداقل تفاوت میان سطح دانش مالک و مهاجم است.

$$p^n(V^z|S^q, T^k) = \quad (17)$$

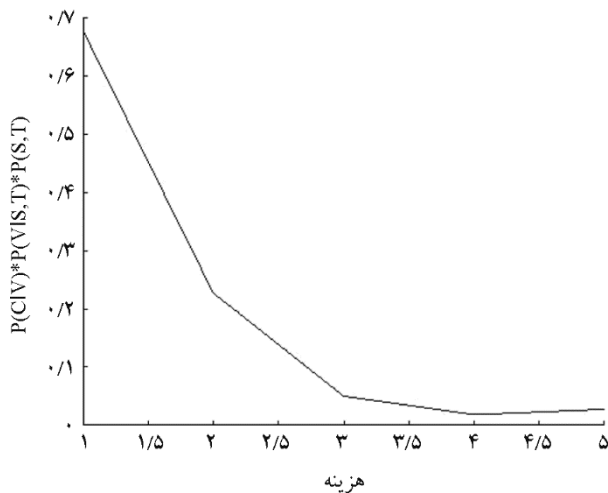
$$\frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x,y,u,e,f,w}} \exp(-0.5(\frac{z-\mu_{k,q}}{\sigma_{x,y,u,e,f,w}})^2)}{\sum_{z_i=1}^5 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{x,y,u,e,f,w}} \exp(-0.5(\frac{z_i-\mu_{k,q}}{\sigma_{x,y,u,e,f,w}})^2)}$$

$$\mu_{k,q} = (k/q)^3 \quad (18)$$

$$\sigma_{x,y,u,e,f,w} = (0.1 - \sigma_v) (\frac{2\theta}{\pi}) + \sigma_v \quad (19)$$

در گام آخر، به منظور سهولت استفاده از روابط، فرض شده است که مقادیر هزینه صرفاً وابسته به میزان سطح آسیب است. به عبارت دیگر تابع $P^n(C > C_{ij}|V^z, S^q, T^k)$ به فرم ساده $P^n(C|V^z)$ در نظر گرفته شده است. این بدین مفهوم است که سطوح تهدید و تدافع صرفاً بر روی میزان آسیب وارده تأثیر داشته و تغییر اضافی در هزینه‌ها وارد نخواهد کرد. در این تابع مقدار میانگین برای توزیع برابر با Z فرض شده است. این تابع به صورت رابطه (۲۰) فرض شده است. لازم به ذکر است که در

از خود و مهاجم داشته و توان اقدام وی هم بسیار محدود است. در این حالت انتظار می رود که احتمال سطوح بالای هزینه ها به مراتب بیشتر از سطوح پایین باشد. توابع توزیع احتمالاتی به قرار جدول (۲) است.



شکل (۳): توزیع احتمال سطوح مختلف هزینه برای مثال تهاجم کور.

جدول (۲): توزیع احتمال پارامترها برای مثال تهاجم هوشمند.

۲	۱	سطح پارامترها
۰/۱	۰/۹	دانش مدافع از خود
۰/۱	۰/۹	دانش مدافع از مهاجم
۰/۱	۰/۹	سطح اقدام مدافع
۰/۹	۰/۱	دانش مهاجم از مدافع
۰/۹	۰/۱	دانش مهاجم از خود
۰/۹	۰/۱	سطح اقدام مهاجم

شکل (۴) توزیع احتمال مواجه شدن با سطوح مختلف هزینه را در این حالت نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود به دلیل ناآگاهی مدافع، احتمال اینکه هزینه تخریب وارده بر مدافع توسط مهاجم بالا باشد (سطح ۵) به مراتب بیشتر از سطوح پایین تر است.

احتمال مربوط به سطوح مد نظر در توابع ورودی مسئله وارد شده است. با استفاده از توابع و روند معرفی شده در بالا، در این مثال هدف، محاسبه احتمال مواجه شدن با سطوح مختلف هزینه است. لازم به ذکر است تمام توابع مورد نیاز برای روابط (۱۲) و (۱۳) منطبق بر روابط (۱۴) الی (۲۱) اختیار شده است. احتمالات ورودی به برنامه برای رابطه (۱۴) در این مثال نیز در جدول (۱) ارائه شده است. این نکته مجدد ذکر می شود که سطح ۱ به عنوان نمونه در بخش دانش مدافع از خود به مفهوم عدم وجود دانش و سطح ۲ به معنی وجود دانش است.

جدول (۱): توزیع احتمال پارامترها برای مثال تهاجم کور.

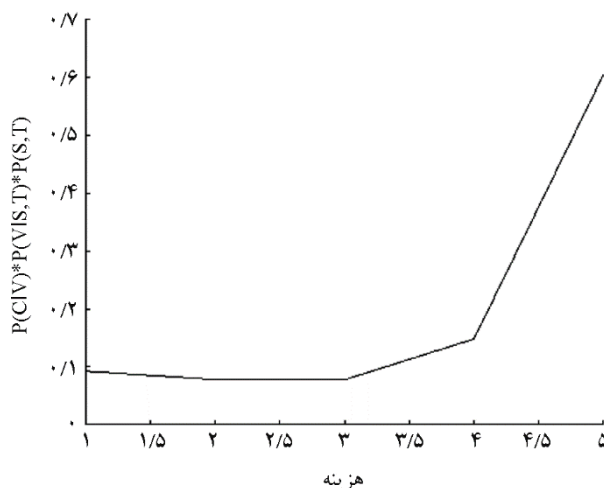
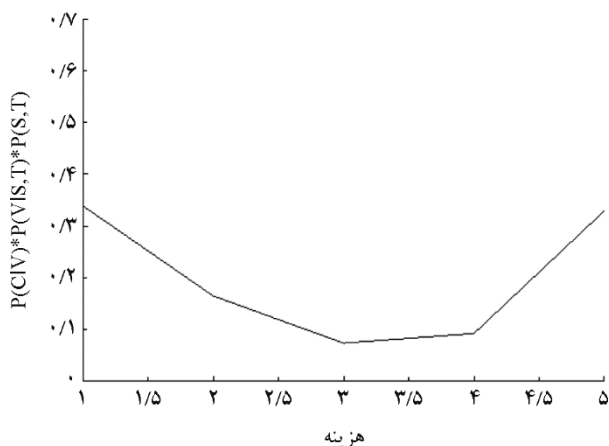
۲	۱	سطح پارامترها
۰/۹	۰/۱	دانش مدافع از خود
۰/۹	۰/۱	دانش مدافع از مهاجم
۰/۹	۰/۱	سطح اقدام مدافع
۰/۱	۰/۹	دانش مهاجم از مدافع
۰/۱	۰/۹	دانش مهاجم از خود
۰/۱	۰/۹	سطح اقدام مهاجم

نمودار شکل (۳) میزان توزیع احتمال را برای سطوح هزینه های مختلف نشان می دهد. محور افقی سطوح مورد نظر برای هزینه و محور قائم نیز میزان احتمال را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود به دلیل قرارگیری مدافع با دانش مناسبی از خود و دشمن و همچنین توانایی اقدام بالا در مقابل دشمنی بدون دانشی از خود و مدافع و با سطح اقدام پایین، احتمال اینکه میزان هزینه وارد شده به مدافع در سطوح پایینی باشد بسیار بالاست. در مقابل احتمال برخورد با هزینه های بالا (سطح ۵) بسیار پایین تر از هزینه های پایین (سطح ۱) است.

۲-۲-۴- تهاجم هوشمند

در این مثال نقطه مقابل مثال قبل فرض شده است. بدین مفهوم که مهاجم دانش بسیار بالایی از خود و مدافع داشته و سطح اقدام بالایی نیز دارد. از سوی دیگر مدافع دانش اندکی

قابل ملاحظه است. این امر نشان از اهمیت وجود دانش صحیح مدافع از خود دارد.



شکل (۴): توزیع احتمال سطوح مختلف هزینه برای مثال تهاجم هوشمند.

شکل (۵): توزیع احتمال سطوح مختلف هزینه برای مثال مهاجم هوشمند در مقابل مدافع فاقد دانش مناسب از خود.

۴-۲-۴- مهاجم هوشمند در مقابل مدافع با توان اقدام محدود در این مثال مدافع دانش مناسب از خود و مهاجم دارد ولی توانی برای اقدام و به کار انداختن دانش خود ندارد. در این حالت نیز میزان خسارات وارده بالاست. در این حالت احتمال سطوح خرابی بالا بیشتر از دو مثال قبل که مربوط به عدم وجود دانش مدافع از خود و مهاجم بوده است. جدول (۴) توزیع احتمال در این مثال را نشان داده است. همچنین در شکل (۶) احتمال محاسبه شده برای سطوح مختلف با استفاده از داده‌های ورودی جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): توزیع احتمال پارامترها برای مثال.

۲	۱	سطح / پارامترها
0.1	0.9	دانش مدافع از خود
0.9	0.1	دانش مدافع از مهاجم
0.1	0.9	سطح اقدام مدافع
0.9	0.1	دانش مهاجم از مدافع
0.9	0.1	دانش مهاجم از خود
0.9	0.1	سطح اقدام مهاجم

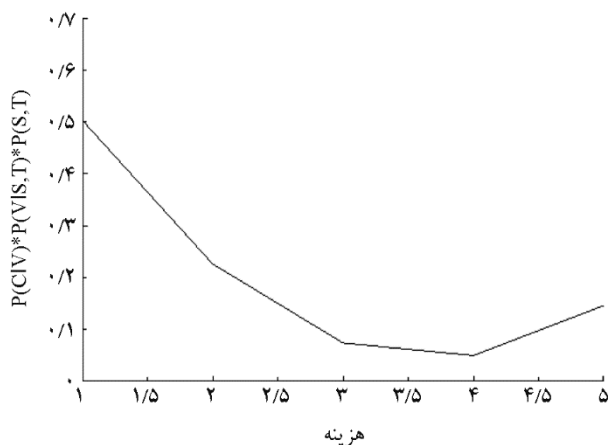
۳-۲-۴- مهاجم هوشمند در مقابل مدافع فاقد دانش مناسب از خود در این مثال مدافع دانش مناسبی از خود ندارد. ولی دانش مناسبی از مهاجم داشته و سطح اقدام مناسبی نیز دارد. مهاجم نیز دانش مناسب از خود و مدافع داشته و سطح اقدام مناسبی نیز دارد. جدول (۳) توزیع احتمالاتی ورودی محاسبات را برای این مثال نشان می‌دهد.

جدول (۳): توزیع احتمال پارامترها برای مثال مهاجم هوشمند در مقابل مدافع فاقد دانش مناسب از خود.

۲	۱	سطح / پارامترها
0.1	0.9	دانش مدافع از خود
0.9	0.1	دانش مدافع از مهاجم
0.9	0.1	سطح اقدام مدافع
0.9	0.1	دانش مهاجم از مدافع
0.9	0.1	دانش مهاجم از خود
0.9	0.1	سطح اقدام مهاجم

در این حالت توزیع احتمال هزینه‌ها در شکل (۵) ارائه شده است. این نکته قابل توجه است که در صورتی که مدافع دانش مناسب از خود نداشته باشد، وجود دانش مناسب از مهاجم و نیز امکان سطح اقدام مناسب، احتمال قرارگیری هزینه‌ها در سطح ۵

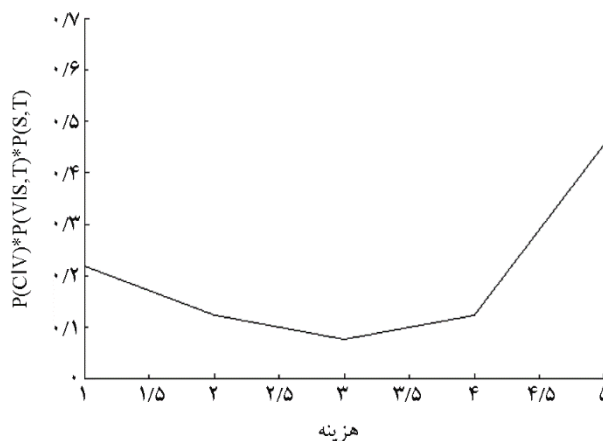
همان طور که مشاهده می شود نقص دانش مهاجم نسبت به مدافع، علی رغم دانش مناسب از خود و امکان سطح مناسب می تواند منجر به کاهش احتمال هزینه ها در سطوح بالا شود.



شکل (۷): توزیع احتمال سطوح مختلف هزینه برای مثال مهاجم ناآگاه از مدافع در مقابل مدافع هوشمند.

۳-۴- تعمیم روابط پیشنهادی برای مسائل دینامیکی

نخست مفهوم استاتیک و دینامیک در بررسی تحلیل ریسک انفجار مورد معرفی قرار می گیرد. استاتیک بودن یک مسئله بدین مفهوم است که مهاجم با یک سطح تهاجم مشخص و ثابت در برابر مدافع با سطح دفاعی مشخص و ثابت قرار گرفته و خسارتی ثبت شود. به عبارت دیگر هر کدام از طرفین تقابل در حین مواجهه هیچ تغییری در سطح خود نخواهند داد. رویکردهای معرفی شده تا به حال برای بررسی ریسک انفجار از ماهیت استاتیکی تبعیت می نمودند؛ اما در واقعیت سطوح مهاجم و مدافع وابسته به زمان بوده و در هر لحظه از تقابل در حال تغییر است. به عنوان نمونه در صورتی که مدافع با مهاجمی با سطح پایین مواجه شود در سطح پایینی از خود دفاع خواهد نمود و در نقطه مقابل در صورتی که مهاجم از سطح بالایی برخوردار باشد، مدافع در تلاش برای تغییر سطح خود و پیروزی برمی آید. از این رو در واقعیت، مسئله تحلیل ریسک انفجار ماهیت دینامیکی داشته و تابعی از زمان است. در هر تقابل مابین مهاجم و مدافع، هر کدام از طرفین در صدد تغییر سطح خود و کاهش دانش طرف مقابل



شکل (۶): توزیع احتمال سطوح مختلف هزینه برای مثال مهاجم هوشمند در مقابل مدافع با توان محدود اقدام.

۵-۲-۴- مهاجم ناآگاه از مدافع در مقابل مدافع هوشمند

در این مثال مهاجم دانش مناسبی از مدافع ندارد و صرفاً دانش مناسب از خود داشته و توان اقدام بالایی دارد. در این حالت فرض توابع پیشنهادی، مقادیر احتمالات به دست آمده برای سطوح مختلف آسیب بسیار نزدیک بوده و اندکی به سمت تهاجم موفق سوق دارد. جدول (۵) توزیع احتمال در این مثال را نشان داده است. همچنین در شکل (۷) احتمال محاسبه شده برای سطوح مختلف با استفاده از داده های ورودی جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): توزیع احتمال پارامترها برای مثال مهاجم ناآگاه از مدافع در مقابل مدافع هوشمند.

		سطح پارامترها
۲	۱	
۰/۹	۰/۱	دانش مدافع از خود
۰/۹	۰/۱	دانش مدافع از مهاجم
۰/۹	۰/۱	سطح اقدام مدافع
۰/۱	۰/۹	دانش مهاجم از مدافع
۰/۹	۰/۱	دانش مهاجم از خود
۰/۹	۰/۱	سطح اقدام مهاجم

جدول (۶): توزیع احتمالات سطوح تقابل مابین مدافع و مهاجم در زمان اولیه.

۲	۱	سطح پارامترها
۰/۹	۰/۱	دانش مدافع از خود
۰/۱	۰/۹	دانش مدافع از مهاجم
۰/۹	۰/۱	سطح اقدام مدافع
۰/۹	۰/۱	دانش مهاجم از مدافع
۰/۹	۰/۱	دانش مهاجم از خود
۰/۹	۰/۱	سطح اقدام مهاجم

جدول (۷): توزیع احتمالات سطوح تقابل مابین مدافع و مهاجم در اواسط تهاجم (دومین گام زمانی مفروض).

۲	۱	سطح پارامترها
۰/۹	۰/۱	دانش مدافع از خود
۰/۹	۰/۱	دانش مدافع از مهاجم
۰/۹	۰/۱	سطح اقدام مدافع
۰/۱	۰/۹	دانش مهاجم از مدافع
۰/۹	۰/۱	دانش مهاجم از خود
۰/۱	۰/۹	سطح اقدام مهاجم

شکل (۸) توابع توزیع احتمال خسارات را در ابتدا و میان تقابل نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در ابتدای تقابل به دلیل عدم دانش مناسب مدافع از مهاجم، احتمال هزینه‌های خسارت در سطوح بالا قابل ملاحظه است، اما پس از افزایش آگاهی مدافع از مهاجم در این حالت، احتمال تدافع موفق افزایش یافته و احتمال موفقیت مهاجم و تحمیل هزینه در سطوح بالا کم‌رنگ خواهد شد.

برمی‌آید. بر اساس این رویکرد، تمام پارامترهای دخیل در برآورد میزان خسارت وارده بر سیستم، وابسته به زمان شده و به صورت روابط (۲۲) و (۲۳) بازنویسی می‌شود. تفاوت این رابطه با روابط (۱۲) و (۱۳) قرارگیری اندیس t در روابط است.

$$P_t^n(C > C_{ij}) = \sum_Z \sum_q \sum_k P_t^n(C > C_{ij} | V^Z, S^q, T^k) P_t^n(V^Z | S^q, T^k) P_t^n(S^q, T^k) \quad (22)$$

$$P_t^n(S^q, T^k) = \sum_w \sum_x \sum_y \sum_f \left[p_t^n(S^q, T^k | \overline{IS}_x^q, \overline{IT}_y^k, \overline{AS}_w^{qky}, \overline{IS}_z^q, \overline{IT}_f^k, \overline{AS}_w^{qkf}) \times p_t^n(\overline{IS}_x^q, \overline{IT}_y^k, \overline{AS}_w^{qky}, \overline{IS}_z^q, \overline{IT}_f^k, \overline{AS}_w^{qkf}) \right] \quad (23)$$

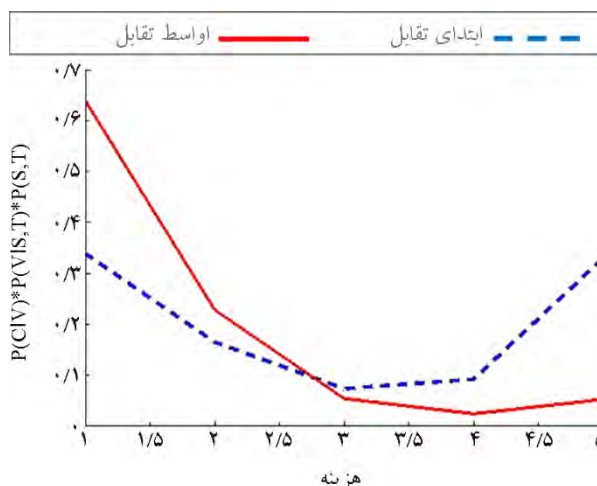
۳-۴-۱- نمونه مثال از روابط تعمیم یافته دینامیکی

در این بخش در قالب یک مثال بسیار ساده اصول کارکرد روش تحلیل ریسک دینامیکی نشان داده خواهد شد. این نکته ذکر می‌شود که در رویکرد معرفی شده، سطوح مهاجم و مدافع در هر لحظه از تقابل تغییر می‌کنند. به‌منظور در نظرگیری این تصحیحات می‌توان تغییرات را در گام‌های زمانی مختلف در نظر گرفت و در هر گام، به‌صورت استاتیکی میزان ریسک را مورد محاسبه قرار داد. با افزایش تعداد گام‌های زمانی می‌توان تصحیحات را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار داد. در این مثال، به‌منظور سهولت بیشتر برای فهم رویکرد اصلی، دو گام زمانی برای یک تقابل فرض شده است. در این حالت فرض شده است که در ابتدا مدافع هیچ‌گونه دانشی از نوع تهاجم مهاجم ندارد و در مقابل مهاجم دانش کافی از خود و مدافع داشته و توان اقدام مناسبی نیز دارد. توزیع توابع احتمال برای این حالت در جدول (۶) ارائه شده است. پس از برخورد مهاجم و مدافع و شروع تقابل، در گام زمانی دوم مدافع پس از آگاهی از مهاجم و با کمک توان اقدام خود رویکرد تدافعی را اتخاذ می‌نماید که مهاجم را گمراه نموده و دانش مهاجم از مدافع را کاهش خواهد داد. در این مثال رویکرد اتخاذ شده توسط مدافع علاوه بر کاهش دانش مهاجم از مدافع، توان اقدام مهاجم را نیز کاهش خواهد داد. توزیع احتمالات برای این حالت در جدول (۷) ارائه شده است.

پارامترهای مؤثر در محاسبه ریسک را میسر می سازد. همچنین چگونگی عملکرد این گام از تعمیم معادلات در قالب یک مثال تشریح شده است. در گام بعد با اضافه نمودن پارامتر تعیین وضعیت و نیز پارامترهای هوشمندی به معادلات، امکان استفاده از روابط پیشنهادی در محاسبه ریسک تهدیدهای هوشمند پدید آمده است. پارامترهای هوشمندی وارد شده در این تحقیق مشتمل بر دانش مالک از دارایی خود، دانش مالک از تهدیدهای مهاجم، تحلیل مالک با استفاده از دانش موجود و انجام فعل حفاظتی، دانش مهاجم از دارایی هدف، دانش مهاجم از توانمندی تهاجمی خود و تحلیل با استفاده از دانش موجود و ارتقای سطح تهاجم است. در این بخش نیز با تشریح مثال‌های متعدد نحوه محاسبه ریسک مرتب بر یک دارایی در فرآیند مواجهه یک مهاجم با مالک دارایی مذکور نشان داده شده است. در گام آخر چگونگی استفاده از روابط مذکور در فرآیند محاسبه ریسک سیستم‌های دینامیکی در قالب یک مثال مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا تشریح شده است که چنانچه پارامترهای هوشمندی در حین تقابل مهاجم و مدافع تغییر یابند توزیع احتمال ریسک تحمیلی تصحیح خواهد شد. میزان این تصحیح وابسته به سرعت تغییر پارامترهای هوشمند در برابر سرعت اعمال تخریب حاصل از تهاجم خواهد بود. لازم به ذکر است چارچوب معرفی شده در این تحقیق با اعمال فرضیات ساده کننده به همان معادلات محاسبه ریسک لزره‌ای متداول تبدیل می شود. همچنین شایان ذکر است، روابط ارائه شده در این تحقیق تنها ناظر به چارچوب کلی محاسبه ریسک به عنوان سنگ بنای نخست در فرآیند برآورد ریسک است و برای استفاده از روابط پیشنهادی نیاز است اجزای روابط ارائه شده برای هر مسئله به فراخور نیاز به صورت چند رابطه دیگر بسط یابند. از سوی دیگر توابع توزیع مورد نیاز هر مسئله نیز باید با استفاده از مشخصات آن تعیین شود.

مراجع

1. Algermissen, S.T., Rinehart, W.A., Dewey, J., Steinbrugge, K.V., Degenkolb, H.J., Cluff, L.S.,



شکل (۸): توزیع احتمال سطوح مختلف هزینه مدافع در دو گام زمانی ابتدا و میان تقابل.

در این مثال به نحو بسیار ساده‌ای رویکرد دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است. نکته حائز اهمیت در این بخش تعداد گام زمانی مفروض و توابع تغییرات پارامترها بر اساس زمان است. همان گونه که در این مثال مشاهده شد، مدافع در میانه زمان تقابل دانش مناسبی از مهاجم به دست آورده و با اقدام مناسب نتیجه تقابل را تعویض نموده است؛ اما در صورتی که مهاجم در فاصله زمانی مابین ابتدا تا میان تقابل خسارت کامل را به مدافع وارد می نمود، مدافع هیچ فرصتی برای تصحیح خود و تغییر نتیجه تقابل نمی یافت. لذا توابع تصحیح سطوح در نتایج حاصل بسیار تأثیر گذار خواهند بود. اگرچه هدف اصلی این مثال تبیین رویکرد دینامیکی بررسی ریسک امنیتی بوده است، لیکن در مسائل واقعی، در نظر گیری دو گام زمانی می تواند منجر به تقریب قابل ملاحظه‌ای در محاسبات شود. بنابراین پیشنهاد می شود برای مثال‌های کاربردی از گام‌های زمانی بیشتری استفاده شود.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش چارچوبی مشترک برای برآورد ریسک تهدید لزره‌ای و تهدیدهای هوشمند ارائه شده است. در این راستا ابتدا روابط متداول محاسبه ریسک لزره‌ای به صورت جامع تر بازنویسی شده است. این نحوه بازنویسی، برقراری ارتباط بدون واسطه میان

- Dyn.*, **31**, 491-514.
13. Aslani, H. and Miranda, E. (2005) *Probabilistic Earthquake Loss Estimation and Loss Disaggregation in Buildings, Report No. 157*. John A. Blume, Stanford University.
 14. Baker, J.W., and Cornell, C.A. (2005) A Vector-Valued Ground Motion Intensity Measure Consisting of Spectral Acceleration and Epsilon. *Earth. Eng. and Str. Dyn.*, **34**(10), 1193-1217.
 15. Baker, J.W., and Cornell, C.A. (2008) Uncertainty propagation in probabilistic seismic loss estimation. *Str. Safety*, **30**, 236-252.
 16. Saadat, S., Camp, C.V., Pezeshk, S. (2014) Seismic performance-based design optimization considering direct economic loss and direct social loss. *Eng. Str.*, **76**, 193-201.
 17. Lenin, A. (2015) *Reliable and Efficient Determination of the Likelihood of Rational Attacks*. Ph.D. Thesis, Tallinn University of Technology, Department of Informatics, Estonia.
 18. American Petroleum Institute (2005) *Security Guidelines for the Petroleum Industry*. Third Edition.
 19. Norman, T.L. (2010) *Risk Analysis and Security Countermeasure Selection*. CRC Press.
 20. Baker, J.W., and Cornell, C.A. (2003) *Uncertainty Specification and Propagation for Loss Estimation Using FOSM Methods*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report.
 21. Young, C.S. (2010) *Metrics and Methods for Security Risk Management*. Elsevier.
 - McClure, F.E., Gordon, R.F. (1972) *A Study of Earthquake Losses in the San Francisco Bay Area: Data and Analysis*. U.S. Department of Commerce, Environmental Research Laboratories.
 2. Whitman, R.V., Reed, J.W., and Hong, S.T. (1973) Earthquake damage probability matrices. *Proc. Fifth WCEE.*, Rome, Italy.
 3. Scholl, R.E., Kustu, O., Perry, C.L., and Zanetti, J.M. (1982) *Seismic Damage Assessment for High-rise Building*. John A. Blume & Associates, Inc.
 4. ATC (1985) *Earthquake Damage Evaluation Data for California, ATC-13 Report*. Redwood City, CA: Applied Technology Council.
 5. FEMA (1997) *NEHRP Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings, Report FEMA-273*. Washington, DC.
 6. Chen, R., Jaiswal, K.S., Bausch, D., Seligson, H., and Wills, C.J. (2016) Annualized Earthquake Loss Estimates for California and Their Sensitivity to Site Amplification. *Seis. Res. Let.*, **87**(6), 1363-1372.
 7. de Ruiter, M.C., Ward, P.J., Daniell, J.E., Aerts, J.C.J.H. (2017) Review article: a comparison of flood and earthquake vulnerability assessment indicators. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **17**, 1231-1251.
 8. Gunturi S. and Shah, H. (1993) *Building-Specific Earthquake Damage Estimation*. Ph.D. Thesis. John A. Blume, Stanford University.
 9. Singhal, A. and Kiremidjian, A.S. (1996) *A Method for Earthquake Motion-damage Relationships with Application to Reinforced Concrete Frames, Report No. 119*. Stanford, John A. Blume, Stanford University.
 10. Porter, K.A. and Kiremidjian, A.S. (2001) *Assembly-Based Vulnerability of Buildings and its Uses in Seismic Performance Evaluation and Risk Management Decision-Making, Technical Report No. 309*. John A. Blume, Stanford University.
 11. Cornell, C.A. and Krawinkler, H. (2000) Progress and challenges in seismic performance assessment. *PEER Center News*, **3**(2).
 12. Vamvatsikos, D. and Cornell C.A. (2002) Incremental Dynamic Analysis. *Earth. Eng. and Str.*

پیوست: نمونه تشکیل ماتریس های احتمالاتی در فرآیند محاسبه احتمال شرطی در حالتی که برای هر پارامتر دو حالت متصور باشد.

$$P(IM) = [IM_1 \quad IM_2]$$

$$P(EDP|IM) = \begin{bmatrix} EDP_1|IM_1 & EDP_2|IM_1 \\ EDP_1|IM_2 & EDP_2|IM_2 \end{bmatrix}$$

$$P(DM|EDP, IM) = \begin{bmatrix} DM_1|EDP_1, IM_1 & DM_2|EDP_1, IM_1 \\ DM_1|EDP_1, IM_2 & DM_2|EDP_1, IM_2 \\ DM_1|EDP_2, IM_1 & DM_2|EDP_2, IM_1 \\ DM_1|EDP_2, IM_2 & DM_2|EDP_2, IM_2 \end{bmatrix}$$

$$P(DVE|DM, EDP, IM) = \begin{bmatrix} DVE_1|DM_1, EDP_1, IM_1 & DVE_2|DM_1, EDP_1, IM_1 \\ DVE_1|DM_1, EDP_1, IM_2 & DVE_2|DM_1, EDP_1, IM_2 \\ DVE_1|DM_1, EDP_2, IM_1 & DVE_2|DM_1, EDP_2, IM_1 \\ DVE_1|DM_1, EDP_2, IM_2 & DVE_2|DM_1, EDP_2, IM_2 \\ DVE_1|DM_2, EDP_1, IM_1 & DVE_2|DM_2, EDP_1, IM_1 \\ DVE_1|DM_2, EDP_1, IM_2 & DVE_2|DM_2, EDP_1, IM_2 \\ DVE_1|DM_2, EDP_2, IM_1 & DVE_2|DM_2, EDP_2, IM_1 \\ DVE_1|DM_2, EDP_2, IM_2 & DVE_2|DM_2, EDP_2, IM_2 \end{bmatrix}$$

$$P(TC|DVE, DM, EDP, IM) = \begin{bmatrix} TC_1|DVE_1, DM_1, EDP_1, IM_1 & TC_2|DVE_1, DM_1, EDP_1, IM_1 \\ TC_1|DVE_1, DM_1, EDP_1, IM_2 & TC_2|DVE_1, DM_1, EDP_1, IM_2 \\ TC_1|DVE_1, DM_1, EDP_2, IM_1 & TC_2|DVE_1, DM_1, EDP_2, IM_1 \\ TC_1|DVE_1, DM_1, EDP_2, IM_2 & TC_2|DVE_1, DM_1, EDP_2, IM_2 \\ TC_1|DVE_1, DM_2, EDP_1, IM_1 & TC_2|DVE_1, DM_2, EDP_1, IM_1 \\ TC_1|DVE_1, DM_2, EDP_1, IM_2 & TC_2|DVE_1, DM_2, EDP_1, IM_2 \\ TC_1|DVE_1, DM_2, EDP_2, IM_1 & TC_2|DVE_1, DM_2, EDP_2, IM_1 \\ TC_1|DVE_1, DM_2, EDP_2, IM_2 & TC_2|DVE_1, DM_2, EDP_2, IM_2 \\ TC_1|DVE_2, DM_1, EDP_1, IM_1 & TC_2|DVE_2, DM_1, EDP_1, IM_1 \\ TC_1|DVE_2, DM_1, EDP_1, IM_2 & TC_2|DVE_2, DM_1, EDP_1, IM_2 \\ TC_1|DVE_2, DM_1, EDP_2, IM_1 & TC_2|DVE_2, DM_1, EDP_2, IM_1 \\ TC_1|DVE_2, DM_1, EDP_2, IM_2 & TC_2|DVE_2, DM_1, EDP_2, IM_2 \\ TC_1|DVE_2, DM_2, EDP_1, IM_1 & TC_2|DVE_2, DM_2, EDP_1, IM_1 \\ TC_1|DVE_2, DM_2, EDP_1, IM_2 & TC_2|DVE_2, DM_2, EDP_1, IM_2 \\ TC_1|DVE_2, DM_2, EDP_2, IM_1 & TC_2|DVE_2, DM_2, EDP_2, IM_1 \\ TC_1|DVE_2, DM_2, EDP_2, IM_2 & TC_2|DVE_2, DM_2, EDP_2, IM_2 \end{bmatrix}$$