



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و پنجم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۸۳ تا ۹۶  
Vol. 45, No. 2, winter 2013, pp. 83-96



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## ارزیابی احتمالاتی سطح فروریزش سازه‌های فولادی بر اساس شبیه‌سازی مکانیزم‌های شکست با استفاده از شبکه احتمالاتی بیزین

مهدی بنزاده<sup>\*۱</sup>، سید احسان فرشته نژاد<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
۲- کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۱۳۸۹/۱۲/۱۶، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۴)

### چکیده

امروزه در مهندسی زلزله بر اساس عملکرد، به دلیل پیچیدگی پدیده‌ی فروریزش در سازه‌ها، در کنار اهمیت بالای سطح فروریزش بر عملکرد احتمالاتی کل سازه، ارزیابی این سطح مورد توجه قرار گرفته است. وجود متغیرهای تصادفی حساس بر رفتار لرزه‌ای سازه نیز بر پیچیدگی آن افزوده است. در این مقاله با ارائه‌ی روش جدید احتمالاتی مبنی بر شبیه‌سازی مکانیزم‌های شکست در چارچوب تحلیل IDA با استفاده از شبکه‌ی احتمالاتی بیزین، ارزیابی احتمالاتی بر سطح فروریزش انجام می‌شود. در این راستا ابتدا مدهای شکست محتمل با استفاده از تحلیل پوش‌اور شناسایی و سپس به همراه متغیرهای حساس بر رفتار سازه در سطح فروریزش، در شبکه‌ی بیزین وارد می‌شوند. احتمالات شرطی این مدها نسبت به متغیرهای حساس، از راه تحلیل IDA با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های تحریک لرزه‌ای محاسبه می‌شوند.

از نتایج این تحقیق می‌توان به مقایسه‌ی میانگین سالیانه‌ی نرخ فروریزش برای یک قاب فولادی بر اساس روش پیشنهادی با معیارهای مطرح شده در روش IDA، شناخت رفتارهای سازه در قالب احتمالاتی و نیز بررسی قابلیت به‌روزرسانی شبکه‌ی بیزین اشاره نمود. در مجموع می‌توان گفت با استفاده از روش جدید ارائه شده نه تنها شاخص ایمنی سازه‌ها به طور موثری بدست می‌آید بلکه بررسی رفتار سازه‌ها را نیز در چارچوب احتمالاتی امکان‌پذیر می‌سازد.

### کلمات کلیدی

مکانیزم‌های شکست، شبکه‌ی احتمالاتی بیزین، تحلیل IDA، متغیرهای تصادفی، ارزیابی سطح فروریزش، میانگین سالیانه‌ی نرخ فروریزش، به‌روزرسانی

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: mbanazadeh@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

در چارچوب مهندسی زلزله بر اساس عملکرد (PBEE)، سطوح مختلف لرزه‌ای از ضعیف‌ترین تحریکات لرزه‌ای که فراوانی زیادی دارند، تا قوی‌ترین آن‌ها که به ندرت رخ می‌دهند، در ارزیابی عملکرد مدنظر قرار می‌گیرد. در میان این رخدادها، زلزله‌های شدید که موجب فروریزش سازه‌ها می‌گردند از اهمیت بالایی برخوردار است. این سطح نه تنها یکی از سطوح مهم در ارزیابی خطر سازه‌ها است، بلکه معیاری از تلفات جانی نیز خواهد بود [۳].

فروریزش سازه به طور کلی، به معنای از دست رفتن توانایی سازه یا بخشی از آن در تحمل نیروهای قائم وارد بر آن، به علت خسارت و جابجایی زیاد سازه تحت نیروهای جانبی است [۴]. چگونگی رخداد فروریزش در سازه‌ها بر خلاف مفهوم ساده آن، با توجه به شکل، سیستم باربر، درجه نامعینی و میزان شکل‌پذیری سازه، پدیده‌ای پیچیده و بحث برانگیز است.

یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر، برای ارزیابی سطح فروریزش بسیار مورد توجه قرار گرفته است، تحلیل IDA است. این روش در سال ۲۰۰۲، توسط وموتسیکوس و کرنل [۵] ارائه شد و هم اکنون به عنوان یک روش پیشنهادی در دستورالعمل FEMA P695 [۶] برای ارزیابی سطح فروریزش سازه‌ها وارد شده است. در این روش، رسیدن به یکی از دو معیار زیر به عنوان سطح آستانه فروریزش در سازه‌ها معرفی می‌شوند:

- گذشتن جابجایی نسبی بیشینه طبقات از ۱۰٪، که بیشتر به علت عدم اطمینان از مدل ایجاد شده در جابجایی‌های بزرگ است.
- کمتر شدن شیب منحنی IDA از ۲۰٪ مقدار اولیه‌اش، به عنوان معیاری از ناپایداری دینامیکی.

اما این روش دارای محدودیت‌هایی نیز هست که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- حساسیت زیاد در تشخیص عامل تقاضای مهندسی (EDP) مانند آستانه فروریزش و همچنین خطای کم در تشخیص معیار شدت لرزه‌ای (IM) آستانه فروریزش (زیرا نقطه‌ای دارای شیب ۲۰٪ شیب الاستیک اولیه و گذر از جابجایی نسبی ۱۰٪، بر اساس قضاوت مهندسی است و حتی در برخی موارد، رفتار پیچشی در منحنی‌های IDA در نقاط نرم‌شدگی، به اشتباه به عنوان نقطه‌ای آستانه فروریزش سازه معرفی می‌شود).

- در نظر نگرفتن اثر مدهای شکست محلی و اندرکنش ناشی از

پیگیربندی‌های متفاوت در سازه‌ها بر احتمال سطح آستانه فروریزش.

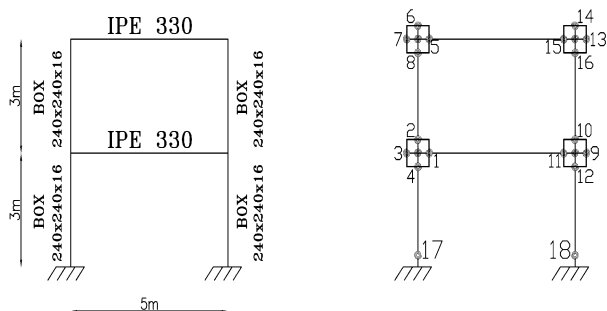
- قادر نبودن در تشخیص دقیق رفتار سازه‌ها تا آستانه فروریزش.

در مورد فروریزش در یک سازه‌ی فولادی می‌توان گفت انتشار مرحله به مرحله‌ی خسارت در اجزای سازه‌ای (با همان مفاصل پلاستیک)، به علل مختلف از جمله کمناش موضعی بال و جان، کمناش پیچشی جانبی، شکست ترد در اتصالات و غیره، درجه‌ی نامعینی و ماتریس سختی سازه به حدی کاهش می‌یابد که منجر به شکل‌گیری مکانیزم در سازه و در پایان فروریزش آن می‌شود.

از طرف دیگر، به علت عدم قطعیت ذاتی بالا در محتوای تحریک لرزه‌ای و نیز غیرقطعی بودن مشخصات اجزای سازه‌ای، امکان رخداد مدهای شکست متفاوتی در سازه‌ها قبل از فروریزش وجود دارد.

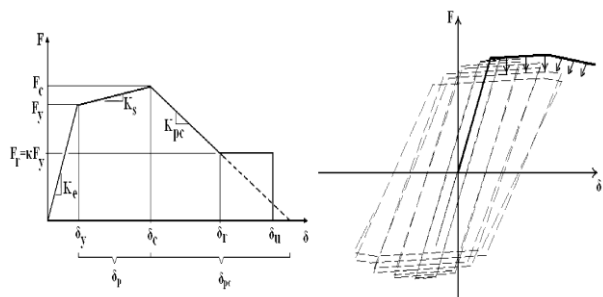
در این مقاله، روشی جدید ارائه می‌شود تا با در نظر گرفتن تشکیل مرحله به مرحله‌ی مفاصل پلاستیک تا شکل‌گیری مکانیزم شکست در سازه و عدم قطعیت‌های موجود، با استفاده از شبکه‌ی احتمالاتی بی‌زین، ارزیابی بر اساس قابلیت اطمینان از سطح فروریزش سازه‌ها انجام شود. بنابراین معیار فروریزش در سازه‌ها به جای معیار پیشنهادی در روش IDA، رسیدن به یک مکانیزم شکست است. از طرف دیگر، عدم قطعیت‌های مدل‌سازی و تحریک لرزه‌ای به‌گونه‌ای در شبکه‌ی بی‌زین با هم ترکیب شده‌اند که امکان ارزیابی احتمالاتی این دو منبع عدم قطعیت‌دار به صورت موثر و توأمان در ارزیابی بر اساس قابلیت اطمینان از سطح فروریزش سازه‌ها بر اساس روش پیشنهادی فراهم می‌شود (برخلاف روش معرفی شده در دستورالعمل FEMA P695 [۶] که این دو منبع را به صورت غیرتوأم در محاسبات قابلیت اطمینان در نظر می‌گیرد).

یکی از منابعی که روش پیشنهادی الهام‌گرفته از آن است، مقاله‌ای است که در سال ۲۰۰۱ توسط مهداوان و همکاران [۷] ارائه شد. آن‌ها با بررسی بر روی یک قاب یک طبقه‌ی تک دهانه با اعضای الاستیک، تحت دو بار متمرکز عدم قطعیت‌دار، روشی برای ارزیابی فروریزش با استفاده از شبکه‌ی احتمالاتی بی‌زین، بر اساس شکل‌گیری مکانیزم‌های شکست با تعاریف ساده معرفی نمودند. با ترکیب این روش با تحلیل IDA برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بالای شتاب‌نگاشتی، توأم با سایر منابع عدم قطعیت در سازه و نیز روشی جامع برای شناخت مدهای محتمل شکست که کارایی روش پیشنهادی را به خصوص برای سازه‌های پیچیده‌تر با درجات آزادی بالا نشان می‌دهد، راهکاری جدید



شکل (۱): سازه‌ی مورد بررسی و مدل‌سازی مورد استفاده

برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی قاب فولادی، بر اساس مدل پلاستیسیته‌ی متمرکز با در نظر گرفتن فنرهای خمشی به طول صفر، از نرم‌افزار اوپن سیس [۱۰] بهره جسته شده است. در مدل ایجاد شده، فنرها با رفتار لنگر-دوران در دو انتهای عضو-های تیر و ستون ایجاد شده‌اند. رفتار غیرخطی چشمه اتصال نیز در نظر گرفته شده است [۱۱]. برای رفتار غیرخطی مصالح ناشی از فنرهای خمشی تیرهای I شکل و ستون‌های قوطی شکل، از مدل ایبارا-کراوینکلر اصلاح شده توسط آقای لیگنوس [۱۲] بهره جسته شده است. عوامل مربوط به منحنی پایه و رفتار هیستریک دوخطی کاهنده برای تیرها و ستون‌ها با توجه به شکل (۲)، در روابط (۱) و (۲) آورده شده است.



شکل (۲): منحنی پایه و رفتار هیستریک دو خطی فنرهای پلاستیک [۱۳]

برای ارزیابی سطح فروریزش سازه‌ها در این مقاله ارائه شده است. به طور کلی روش ارائه شده در دو مرحله انجام می‌شود: (۱) انجام تحلیل پوش‌اور برای شناخت مکانیزم‌های شکست محتمل.

(۲) ایجاد یک شبکه احتمالاتی بیزین شامل مدهای شکست معرفی شده از مرحله اول و متغیرهای تصادفی حساس در سطح فروریزش که وابستگی آن‌ها توسط مجموعه‌ای از تحلیل‌های IDA برای هر مد تصادفی تعیین می‌شود.

یکی از ویژگی‌های بارز شبکه‌ی احتمالاتی بیزین، قابلیت به‌روزرسانی توابع احتمالاتی متغیرهای تصادفی موجود در آن است. مهدوی عادل و بنازاده [۱] در مقاله‌ای با استفاده از این قابلیت بهترین مدل را برای توابع احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای و آسیب‌پذیری فروریزش بدست آوردند. اگرچه در روش پیشنهادی، احتمالات آسیب‌پذیری فروریزش به صورت مستقیم برای همه حالت‌های تصادفی بدست آمده است، ولی پس از تکمیل شبکه بیزین برای سازه مورد نظر، توابع توزیع همه متغیرهای تصادفی موجود در شبکه بر اساس مشاهده یک مد فروریزش فرضی به‌روزرسانی شده است.

در ادامه همچنین با استفاده از روش پیشنهادی، نتایج زیر، حاصل از نوآوری راهکار ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفت:

- حاسبه‌ی احتمالاتی فروریزش به بیان میانگین سالیانه‌ی نرخ فروریزش و شاخص ایمنی سازه.

- شناخت مدهای شکست غالب بر رفتار سازه با بررسی میزان تاثیرشان بر میانگین سالیانه‌ی نرخ فروریزش.

## ۲- مدل‌سازی یک قاب فولادی برای بررسی روش پیشنهادی

برای اجرای روش پیشنهادی، یک قاب فولادی دوطبقه تک دهانه (شکل (۱)) با شکل‌پذیری ویژه، در نظر گرفته شده است. محل احداث این قاب در شهر تهران (که لرزه‌خیزی بالایی دارد)، فرض شده است. آیین‌نامه‌ی AISC-LRFD05 [۸] برای طراحی قاب با بارگذاری بر اساس آیین‌نامه‌ی ASCE7-05 [۹] استفاده شده است.

برای تیرهای I شکل:

جدول (۱): عوامل مقاومتی منحنی پایه

	$M_y/M_{y,p}$	$M_c/M_y$	$M_r/M_y$
تیرهای I شکل	۱/۱۷	۱/۰۵	۰/۴۰
ستون‌های قوطی شکل	۱/۱۷*	۱/۱۰	۰/۲۵

\* به دلیل این که این مقدار توسط لیگنوس [۱۲] برای ستون‌ها گفته نشده است، همان مقدار پیشنهادی تیرها برای آن استفاده می‌شود.

برای تاثیر رفتار غیرخطی هندسی نیز، علاوه بر مدل‌های کاهنده فوق، برای بخش الاستیک عضوهای تیر و به خصوص ستون، رفتار  $P-\Delta$  تعریف شد.

به دلیل استفاده از مدل پلاستیسیته متمرکز (شامل یک عضو الاستیک میانی و دو فنر پلاستیک در ابتدا و انتها)، مقادیر سختی الاستیک و پس الاستیک، با توجه به توصیه‌های زارعیان [۱۴] با در نظر گرفتن محدودیت‌های ماتریس میرایی انجام شد. در این راستا، نه سختی عضو الاستیک بسیار زیاد در نظر گرفته شد که از تغییرات لنگر و تاثیر آن بر میرایی در محدوده‌ی الاستیک صرف نظر شود و نه سختی الاستیک فرها زیاد بودند که در منطقه‌ی تغییر سختی الاستیک به ناحیه‌ی سخت‌شدگی پس الاستیک، اختلاف زیاد بین مقادیر سختی، همگرایی در تحلیل غیرخطی را دچار مشکل نماید.

جرم لرزه‌ای نیز به گره‌های پلاستیک در اتصالات اختصاص داده شد و ماتریس میرایی بر مبنای سختی اولیه با مقدار میرایی ۳٪ (به دلیل کاهش شدید سختی سازه در نواحی نزدیک به فروریزش [۱۵]) در نظر گرفته شد.

پس از محاسبات انجام شده، زمان تناوب اصلی سازه، ۰/۴۳۵ ثانیه بدست آمد.

۳- استخراج مدهای شکست محتمل سازه

به طور کلی روش پیشنهادی در دو مرحله انجام می‌شود:

الف) بدست آوردن مدهای شکست محتمل با انجام تحلیل-های پوش‌آور چندگانه با در نظر گرفتن حالات تصادفی مربوط به متغیرهای حساس بر رفتار سازه در سطح فروریزش.

ب) با در نظر گرفتن این مدها و متغیرهای تصادفی حساس در شبکه‌ی بیزین، در چارچوب تحلیل IDA، ارزیابی قابلیت اطمینان برای سازه انجام می‌شود.

بنابر این در مرحله‌ی اول، نیاز به شناخت متغیرهای حساس بر رفتار سازه داریم.

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_p &= 0.07 \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.35} \cdot \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^{-0.09} \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^{0.310} \cdot \left(\frac{d}{C_{unit}^1 \cdot 21''}\right)^{-0.281} \\ &\left(\frac{C_{unrt}^2 \cdot F_y}{50}\right)^{-0.383} \\ \delta_{pc} &= 4.645 \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.449} \cdot \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^{-0.837} \cdot \left(\frac{d}{C_{unit}^1 \cdot 21''}\right)^{-0.265} \\ &\left(\frac{C_{unrt}^2 \cdot F_y}{50}\right)^{-1.136} \\ \Lambda &= \lambda \times \delta_p = \frac{E_t}{M_y} = 26.36 \left(\frac{h}{t_w}\right)^{-0.589} \cdot \left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^{-0.574} \\ &\left(\frac{C_{unrt}^2 \cdot F_y}{50}\right)^{-1.454} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

برای ستون‌های قوطی شکل:

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_p &= 0.572 \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.000} \cdot \left(1 - \frac{N}{N_y}\right)^{1.210} \cdot \left(\frac{C_{unit}^2 \cdot F_y}{50}\right)^{-0.838} \\ \delta_{pc} &= 14.5 \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.217} \cdot \left(1 - \frac{N}{N_y}\right)^{3.035} \cdot \left(\frac{C_{unit}^2 \cdot F_y}{50}\right)^{-0.498} \\ \Lambda &= \lambda \times \delta_p = \frac{E_t}{M_y} = 3800 \left(\frac{D}{t}\right)^{-2.492} \cdot \left(1 - \frac{N}{N_y}\right)^{3.501} \\ &\left(\frac{C_{unit}^2 \cdot F_y}{50}\right)^{-2.391} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

در روابط فوق مقادیر  $h, t_w, b_f, d$  و  $D$  به ترتیب ارتفاع تیر، ضخامت جان تیر، عرض بال تیر، ارتفاع جان تیر و ارتفاع ستون قوطی شکل است. همچنین،  $N, N_y$  و  $F_y$  نیز نیروی محوری ستون، نیروی محوری تسلیم ستون و مقاومت تسلیم میانگین بال تیر به واحد ksi است که به وسیله ضریب  $C_{unit}^2$ ، که برابر با ۰,۱۴۵ مگاپاسکال می‌باشد، می‌تواند به واحد مگاپاسکال نیز گذاشته شود. در ضمن  $C_{unit}^1$  هم برای واحد متریک برابر ۰,۰۲۵۴ متر است.

همچنین، سایر عوامل موجود در منحنی پایه‌ی عضوهای تیر و ستون، در جدول (۱)، آورده شده‌اند [۱۲].

### ۳-۱- متغیرهای تصادفی حساس بر رفتار سازه در سطح

#### فروریزش

به دلیل بالا بودن حجم تحلیل‌های پوش‌اور و IDA از طرفی و نیز بالا بردن دقت و جامعیت روش پیشنهادی از طرف دیگر، متغیرهای حساس با بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی فروریزش، شناخته و در نظر گرفته شد.

ایبارا و کراوینکلر [۴] طی مطالعه‌ی خود بر روی سازه‌ی کوتاه که در آن بیش از اثر  $P-\Delta$ ، کاهندگی در عضوها بر فروریزش آن موثر است [۱۶]، دو عامل  $\delta_c$  و  $K_{pc}$  را در تعیین ظرفیت آستانه فروریزش سازه‌ها موثرتر از سایر عامل‌ها تشخیص دادند. چند سال بعد، وموتسیکوس و فراجیاداکیس [۱۷]، علاوه بر این دو عامل،  $M_y$  و  $\delta_u$  را نیز بر منحنی‌های پوش‌اور و IDA حساس، ارزیابی نمودند. در این تحقیق،  $\delta_u$  که به علت وابستگی بالای آن به تاریخچه‌ی بارگذاری، دارای پراکندگی بسیار زیادی است [۱۲]، در نظر گرفته نشده است، ولی سه متغیر  $M_y$ ،  $\delta_p$  و  $\delta_{pc}$  با توابع احتمالاتی معرفی شده توسط محققان دیگر، در نظر گرفته شده‌اند.

### ۳-۲- تعیین مفاصل پلاستیک و مکانیزم‌های شکست در

#### تحلیل پوش‌اور

مفاصل پلاستیک با توجه به مدل پلاستیسیته‌ی متمرکز، بر اساس میزان دوران فترهای خمشی واقع در دو انتهای عضوها، تشخیص داده می‌شوند. بنابراین این مکانیزم‌های شکست، مجموعه‌ای از مفاصل پلاستیک در اعضای مختلف با ترتیب تشکیل شدن متفاوت است. در تحلیل پوش‌اور، حد پلاستیک‌شدگی ( $\delta_{pl}$ ) با بیشتر شدن دوران گره‌ها از چهار معیار  $\delta_c$ ،  $\delta_y$ ، دوران نظیر  $10\%$  و دوران معادل با  $(\delta_c + 10\%) / 2$  معرفی شدند. علت متغیر فرض شدن  $\delta_{pl}$  در تحلیل پوش‌اور، عدم قطعیتی است که در سطح انرژی جذب شده در تحلیل دینامیکی تا نقطه‌ی آستانه فروریزش وجود دارد؛ این بدان معنی است که سطوح پایین‌تر تغییر شکل به عنوان حد نهایی، معرف حالتی است که سازه تحت شتاب-نگاشت با محتوای انرژی بالا و چرخه‌های رفت و برگشت زیادی قرار دارد، به طوری که عامل پلاستیک‌شدگی گره، بیشتر جذب انرژی است تا تغییرشکل حداکثر. حالت عکس، مربوط به سطوح بالای تغییرشکل است. از طرف دیگر، حدود پلاستیک‌شدگی، باید معرف حالتی در گره‌ی مربوطه باشد که در لنگر تقریباً ثابت، تا حد تشکیل مکانیزم شکست سازه، دوران‌های زیادی بدهد (سختی نزدیک به صفر داشته باشد).

همچنین برای پوشش بازه‌ی وسیعی از تغییرات متغیرهای تصادفی یادشده بر مکانیزم‌های شکست در کنار محدودیت ناشی

از سنگین بودن حجم تحلیل‌ها، شش حالت متناظر با احتمال تجمعی (CDF)  $0.15$ ،  $0.30$ ،  $0.45$ ،  $0.60$ ،  $0.75$  و  $0.90$  برای هر متغیر تصادفی در نظر گرفته شد. به علت کم بودن زمان تناوب اصلی سازه و غالب بودن مد اول بر رفتار سازه (به‌طوری که درصد مشارکت جرمی مد اول، به‌طور متوسط حدود  $90\%$  محاسبه شد)، بارگذاری پوش‌اور تنها بر مبنای مد اول انجام شد، اگرچه برای سازه‌های با زمان تناوب بیشتر، در نظر گرفتن مدهای دیگر نیز توصیه می‌شود.

بنابر این با وجود  $216$  حالت ناشی از چیدمان‌های متفاوت متغیرهای تصادفی  $M_y$ ،  $\delta_p$  و  $\delta_{pc}$ ،  $216$  تحلیل پوش‌اور انجام شد. در هر تحلیل، با در نظر گرفتن چهار حالت مربوط به  $\delta_{pl}$ ، تشکیل شدن مرحله به مرحله مفاصل پلاستیک (با فرض عدم گسیختگی) تا گام نهایی تحلیل پوش‌اور (هنگامی که برش پایه به نصف مقدار بیشینه‌ی خود در شاخه‌ی نزولی برسد) ثبت شد و در انتها مجموعه‌ی این مفاصل با تفاوت در ترتیب تشکیل-شدنشان، به عنوان یک مد شکست معرفی شدند.

با در نظر گرفتن تحلیل‌های پوش‌اور انجام شده و حالات تصادفی یادشده در بالا و نیز اعمال بارگذاری استاتیکی غیرخطی در دو جهت بر سازه‌ی مورد بررسی، مجموع  $1728$  مد شکست بدست آمد که با حذف مدهای تکراری، مدهای محتمل که برای تحلیل‌های دینامیکی در مرحله دوم در نظر گرفته شد فقط  $71$  مورد بود. نتیجه‌ی جالب دیگر اینکه با حذف اثر ترتیب تشکیل شدن مفاصل پلاستیک، فقط  $1$  مد شکست شامل گره‌های  $1$ ،  $5$ ،  $15$ ،  $17$  و  $18$  شکل می‌گیرد (رجوع شود به شکل (۱)).

دو نمودار برای توجیه ایجاد مکانیزم در سازه پیش از فروریزش، با استفاده از نتایج تحلیل پوش‌اور ترسیم شده است. در شکل (۳)، درصد رخداد مدهای شکست با مقادیر متفاوتی از نسبت جابجایی نسبی مرتبط با برش پایه‌ی بیشینه به جابجایی نسبی بیشینه مربوط تشکیل آخرین مفصل پلاستیک، ترسیم شده است. در شکل (۴) نیز درصد رخداد مدهای شکست با مقادیر متفاوتی از نسبت برش پایه‌ی نظیر تشکیل آخرین مفصل پلاستیک به برش پایه‌ی بیشینه ترسیم شده است. دیده می‌شود که حتی در معیار تغییرشکل  $10\%$ ، نسبت جابجایی نسبی حداکثر ایجاد شده در سازه در دامنه‌ی نزولی تا برش پایه-ی نصف مقدار حداکثر، به جابجایی نسبی حداکثر مربوط به تشکیل آخرین مفصل پلاستیک، به طور متوسط  $1/5$  برابر است؛ این بدان معنی است که پس از تشکیل آخرین مفصل، سازه مانند یک مکانیزم فروریزش عمل نموده و بدون اینکه در سایر اعضا تغییر شکل‌های محسوسی ایجاد شود، سازه تغییر مکان‌های بزرگی را تجربه می‌نماید؛ بنابراین از این دو شکل مشخص می-

حالات (که اشتراکشان تهی و مجموعشان، مجموعه‌ی مرجع را تشکیل می‌دهند) انتگرال‌گیری شود؛ بنابراین برای محاسبه‌ی میانگین نرخ فروریزش، از رابطه‌ی (۳) استفاده می‌شود.

$$\lambda(\text{Collapse}) = \int \int_{IM, RVs} P[\text{Collapse} | im, RVs] f(RVs) |d\lambda[im]| d(RVs) \quad (3)$$

در این رابطه،  $\lambda(im)$  منحنی خطر براساس شدت لرزه‌ای در نظر گرفته شده در منحنی IDA و  $f(RVs)$  تابع توزیع احتمالاتی سایرمتغیرهای تصادفی در مدل است.

#### ۴-۱- شبکه‌ی احتمالاتی بیزین و اجزای آن

شبکه‌ی احتمالاتی بیزین یکی از روش‌های محاسبه‌ی احتمالاتی عملکرد بر مبنای قانون احتمالات کلی و قانون احتمال شرطی بیز به صورت زیر است:

$$P(A \cap B) = P(A|B)P(B) = P(B|A)P(A) \Rightarrow P(A|B) = \frac{P(B|A)}{P(B)} P(A) \quad (4)$$

شبکه‌ی احتمالاتی بیزین بر اساس تعریف احتمالات شرطی متغیرهای تصادفی شکل می‌گیرد [۱۸] و به‌طور کلی متشکل از اجزای زیر است [۱۹]:

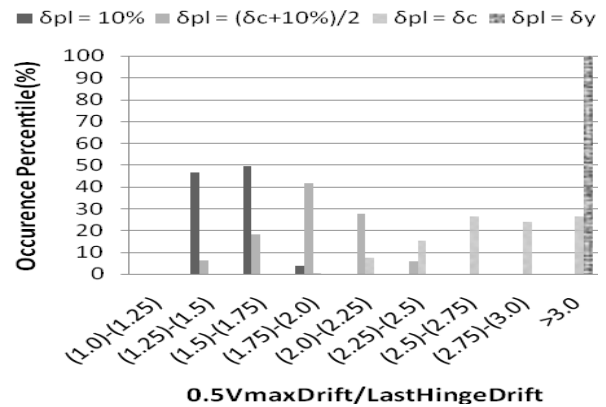
- ۱) گره‌های فرزند و والد
- ۲) پیکان‌های ارتباطی یکسویه بیانگر وجود احتمال شرطی بین دو گره
- ۳) مجموعه‌ای از احتمالات شرطی بین گره‌های مرتبط. گره‌های والد، متغیرهای تصادفی پایه را تشکیل می‌دهند که هیچ گونه وابستگی نداشته و با توابع توزیع احتمالاتی مستقل برای حالات متغیرشان تعریف می‌شوند. گره‌های فرزند، به سایر گره‌های موجود در شبکه گفته می‌شود که وابسته به یک گره‌ی دیگرند و با تعریف احتمال شرطی حالات متغیرشان به حالات متغیر گره‌ی تعریف می‌شوند که به آن وابسته‌اند. از طرف دیگر بر اساس قانون احتمالات کلی، احتمال حالات متغیر تک تک متغیرهای تصادفی، باید طوری باشند که مستقل و مجموع آن‌ها برابر ۱ باشد.

از جمله مزایای شبکه‌ی بیزین می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

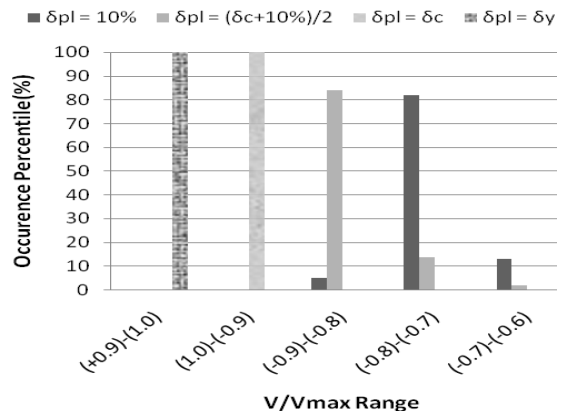
- ۱) بررسی دقیق رفتار در سطوح مختلف بر اساس قابلیت پیش‌انتشار.
  - ۲) امکان به روز رسانی توابع توزیع متغیرهای تصادفی بر اساس قابلیت پس‌انتشار.
- برای ایجاد شبکه‌ی احتمالاتی بیزین در این مقاله، از نرم‌افزار

شود که دو شرط مکانیزم‌شدگی در یک سازه شامل: الف) ایجاد تغییرمکان‌های زیاد در سازه با اعمال نیروی اندک ب) دوران کم گره‌های غیرپلاستیک، حتی در تغییرمکان‌های بزرگ در سازه قبل از فروریزش، برقرار شده است.

مدهای آستانه فروریزش بدست آمده از تحلیل پوش‌اور، در مرحله بعد در شبکه‌ی احتمالاتی بیزین مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل (۳): فراوانی به درصد نسبت جابجایی نسبی مربوط به آخرین گام تحلیل پوش‌اور (0/5 Vmax) به جابجایی نسبی مربوط به تشکیل شدن آخرین مفصل پلاستیک مرتبط با معیارهای  $\delta c$ ،  $\delta y$ ،  $\delta PI = 10\%$  و  $\delta PI = (\delta c + 10\%) / 2$  برای مدهای شکست بدست آمده



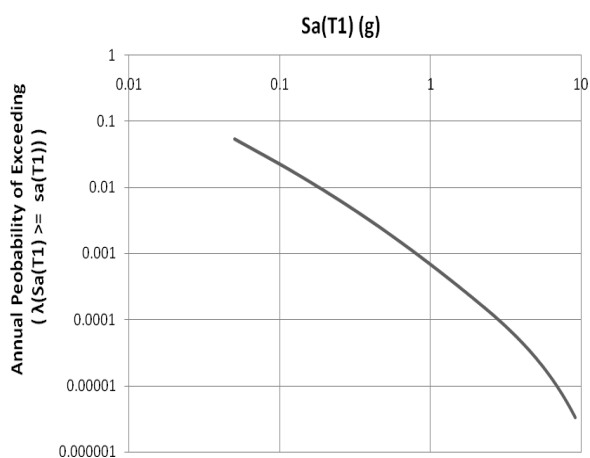
شکل (۴): فراوانی به درصد نسبت برش پایه مربوط به تشکیل شدن آخرین مفصل پلاستیک مرتبط با معیارهای  $\delta c$ ،  $\delta y$ ،  $\delta PI = 10\%$  و  $\delta PI = (\delta c + 10\%) / 2$  به برش پایه‌ی حداکثر مدهای شکست بدست آمده (بازه‌های منفی نمایانگر تشکیل آخرین مفصل بعد از نقطه‌ی حداکثر برش پایه است).

#### ۴- تحلیل قابلیت اطمینان با استفاده از شبکه‌ی احتمالاتی بیزین

بر مبنای قانون احتمالات کلی، برای ارزیابی احتمالاتی سازه در هر سطح عملکرد، باید احتمالات شرطی مشخص شده و روی آن

برای محل احداث سازه‌ی مورد نظر، بدست می‌آید. یکی از معیارهای شدت لرزه‌ای متداول برای سازه‌ها (به خصوص سازه‌های کوتاه با زمان تناوب اصلی پایین)، شتاب طیفی مد اول  $Sa(T1)$  است. منحنی تحلیل خطر مربوط به منطقه‌ای با شدت خطر نسبی متوسط در شهر تهران [۲] (محل فرضی احداث سازه) در شکل (۶) دیده می‌شود. نکته‌ی قابل توجه اینکه به دلیل ظرفیت بالای سازه (میانه‌ی برابر با  $4g$ )، مقادیر بالاتر از  $2.6g$  در این منحنی برون‌یابی شده است.

با مشتق‌گیری از منحنی خطر، مجموع  $50$  حالت متغیر برای این متغیر تصادفی محاسبه و در نظر گرفته شد.



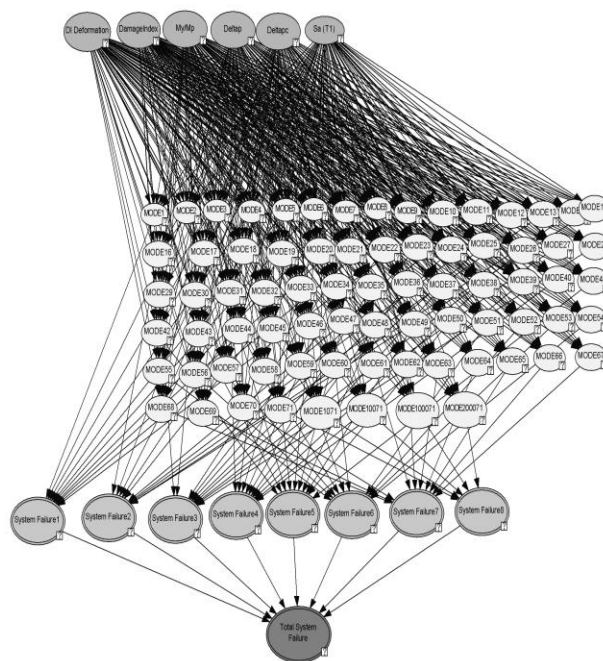
شکل (۶): منحنی تحلیل خطر احتمالاتی برای محل احداث سازه‌ی مورد بررسی

پ) متغیرهای تصادفی مدل‌سازی مانند تحلیل پوش‌اور، بنابر تحقیقات لیگنوس، سه متغیر تصادفی مدل‌سازی با مشخصات مندرج در جدول (۲)، استفاده شده است. البته گفتنی است که به دلیل اینکه مشخصات احتمالاتی متغیرهای تصادفی  $\delta_p$  و  $\delta_{pc}$  فقط برای تیرهای مشابه RBS ارائه شده است، از همین اطلاعات برای تیرهای غیر RBS قاب فولادی مورد بررسی نیز استفاده شد.

جدول (۲): مشخصات مربوط به متغیرهای تصادفی مدل‌سازی در مدل بررسی شده

متغیر تصادفی	تابع توزیع	انحراف معیار استاندارد	مرجع
$\delta_p$	لگ - نرمال	۰/۲۴	لیگنوس و همکاران [۲۲]
$\delta_{pc}$	لگ - نرمال	۰/۲۶	لیگنوس و همکاران [۲۲]
$M_y/M_{y,p}$	لگ - نرمال	۰/۲۱	لیگنوس [۱۲]

جای [۲۰] استفاده شده است. شبکه‌ی ایجاد شده برای قاب فولادی مورد بررسی در شکل (۵) آمده است. در لایه‌ی اول، ۶ متغیر تصادفی پایه در نظر گرفته شده است. مدهای شکست حاصل از مرحله اول، در لایه‌ی دوم قرار دارد و در لایه‌های سوم و چهارم، شکست کل سازه به صورت احتمالاتی محاسبه می‌شود. در ادامه توضیحات بیشتری داده می‌شود.



شکل (۵): شبکه احتمالاتی بیزین برای قاب فولادی مورد بررسی

#### ۴-۴-۲- متغیرهای تصادفی پایه در شبکه‌ی بیزین ایجاد شده

الف) متغیر تصادفی محتوای شتاب‌نگاشتی این متغیر بیانگر عدم قطعیت در محتوای فرکانسی و میزان انرژی چرخه‌های متوالی تحریک شتاب‌نگاشتی است که به طور مستقیم بر رفتار سازه مورد بررسی به واسطه‌ی تحلیل IDA، اثرگذار است. در تعریف احتمالات شرطی گره‌های لایه‌ی دوم، از این متغیر به طور مستقیم استفاده شده است، در حالی که به دلیل ذاتی فرض شدن این متغیر، در شبکه بیزین ایجاد شده، این متغیر به صورت مستقیم در نظر گرفته نشده است [۲۱]. برای پوشش بازه‌ی وسیعی از تغییرات این متغیر به منظور بررسی مکانیزم‌های شکست، از ۲۲ جفت شتاب‌نگاشت حوزه‌ی دور FEMA P695 [۶] با احتمال هر شتاب‌نگاشت برابر ۱ تقسیم بر ۴۴ استفاده شده است.

ب) متغیر تصادفی خطر لرزه‌ای این متغیر تصادفی که در واقع بیانگر شدت لرزه‌ای شتاب‌نگاشت‌های محتمل است، بر اساس نتایج تحلیل خطر احتمالاتی

فروریزش سازه‌ها در نظر گرفته شده اند.

### ۴-۳- نحوه‌ی تکمیل شبکه‌ی احتمالاتی بیزین با استفاده

#### از مدهای شکست و تحلیل IDA

علاوه بر ۷۱ مد حاصل از تحلیل پوش‌آور، ۴ مد دیگر نیز به شرح زیر در شبکه‌ی بیزین ایجاد شده، در نظر گرفته شده است.

(۱) مد ۱۰۷۱: شکل‌گیری این مد، فقط منوط به پلاستیک-

شدگی گره‌های مفصل‌شده‌ی مدهای حاصل از تحلیل پوش‌آور، بدون توجه به ترتیب آن‌ها است.

(۲) مد ۱۰۰۷۱: مربوط به مدهایی است که در آن‌ها، علاوه

بر ۶ گره‌ای که در ۷۲ مد اول پلاستیک شده‌اند، گره-

های دیگری نیز در هنگام مکانیزم‌شدگی در سازه، تشکیل می‌شوند.

(۳) مد ۱۰۰۰۷۱: در برخی از شتاب‌نگاشت‌ها به دلیل

محتوای انرژی پایینشان، مکانیزم‌شدگی در قاب فولادی

مورد بررسی حتی تا گام آخر نیز ایجاد نمی‌شود. این مد

برای این دسته شتاب‌نگاشت‌ها در نظر گرفته شده است.

(۴) مد ۲۰۰۰۷۱: اگر تا آخرین گام افزاینده‌ی IM، هیچ

مکانیزمی در سازه (مدهای قبلی)، تحت یک شتاب-

نگاشت تشخیص داده نشده باشد ولی جابجایی نسبی

حداکثر طبقات به ۲۰٪ رسیده باشد، فرض بر تشکیل

این مد خواهد بود.

در روند تکمیل احتمالات شرطی این مدها نسبت به ۹۷۲۰۰

چیدمان مختلف حالات متغیر متغیرهای تصادفی، بدین صورت

عمل می‌شود که در هر کدام از این چیدمان‌ها، بررسی می‌شود که

آیا مکانیزم‌شدگی در سازه مشابه این مد شکست هست یا نه. در

صورت مثبت بودن جواب احتمال این مد شکست، ۱ تقسیم بر

۴۴ افزوده می‌شود. علاوه بر این، فرض بر این است که بعد از

تشکیل شدن هر یک از ۷۵ مد شکست تعریف شده در سازه،

تحت هر شتاب‌نگاشت، در مقادیر بزرگتر  $Sa(T1)$  برای همان

شتاب‌نگاشت زلزله نیز، همان مد شکست قبلی تشکیل می‌شود.

با این فرض، اثر احیاشدگی مجدد، برای راحتی و نیز احتمال

وقوع اندک، لحاظ نمی‌شود. روند محاسبه‌ی احتمال شرطی

برای ۱۰ شتاب‌نگاشت نمونه، برای حالت پایه و معیار خرابی

PA1 و معیار تغییر شکل نهایی برابر با  $(\delta_c + 0.1)/2$  به صورت

تصویری نیز در شکل (۷) نشان داده شده است.

(ت) متغیرهای تصادفی سیستماتیک

این متغیرها دربرگیرنده‌ی معیارهایی برای تعیین حد پلاستیک‌شدگی گره‌ها در تحلیل دینامیکی بوده و در دو گروه شاخص خرابی و تغییر شکل حداکثر با احتمالات یکسان برای حالات متغیرشان، قرار داده شده‌اند.

دو شاخص خرابی پارک و آنگ و بناونت-کلیمنت به دلیل تاثیر توامان تغییر شکل حداکثر و کاهندگی در مقاومت و سختی عضو، ناشی از جذب انرژی هیسترتیک، موردنظر قرار گرفت.

شاخص خرابی پارک و آنگ (PA) به صورت معادله (۵)

است:

$$DI_{PA_i} = \frac{\delta_{max_i}}{\delta_{ult}} + \frac{\beta}{M_y \delta_{ult \ step_i}} \int dHE \quad (5)$$

که در آن:

$\delta_{max}$ : جابجایی حداکثر تجربه شده عضو

$\delta_{ult}$ : جابجایی نهایی عضو

$dHE$ : مجموع انرژی جذب شده عضو در چرخه‌های

متوالی

و همچنین  $\beta$  عاملی است که ظرفیت حداکثر انرژی جذب

شده عضو را معرفی می‌نماید. پارک و آنگ، این ضریب را برای

اعضای فولادی ۰/۰۲۵ [۲۳] معرفی نمودند. اگرچه ایبارا و

همکاران [۲۴] معتقدند ضریب  $\beta$ ، معادلی از ضریب  $\lambda$  در رابطه

ظرفیت انرژی حداکثر جذب شده است.

شاخص خرابی BC که در سال ۲۰۰۷ توسط آقای بناونت-

کلیمنت [۲۵] ارائه شد، معیاری بر مبنای انرژی جذب شده در

عضو است که اثر جابجایی حداکثر را به‌طور غیرمستقیم در خود

گنجانیده است. این معیار با بیان صریح ظرفیت حداکثر جذب

انرژی در اعضای فولادی با توجه به مسیر شکست، نقص‌های

رابطه‌ی پارک و آنگ را تا حدودی برطرف نموده است.

بنابراین برای متغیر تصادفی شاخص خرابی سه حالت به

صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\text{الف) PA1: پارک و آنگ با فرض } \beta = \frac{1}{\lambda}$$

$$\text{ب) PA2: پارک و آنگ با فرض } \beta = 0.025$$

پ) BC: معیار خرابی معرفی شده توسط بناونت-کلیمنت

بر اساس نتایج اولیه برای هر یک از سه حالت فوق نیز، سه

معیار برای تغییر شکل نهایی ( $\delta_{ult}$ ) مناسب تشخیص داده شد:

$\delta_c$ ،  $(\delta_c + 0.1)/2$  و  $0.1$ . این حالات تشکیل دهنده‌ی

متغیر تصادفی تغییر شکل حداکثر است.

گفتنی است دو متغیر تصادفی اخیر، برای اثر عدم قطعیت

ناشی از تعیین نقطه پلاستیک‌شدگی در تشخیص حد آستانه



می‌آید. مشابه این نتایج با استفاده از روش ارائه شده‌ی وموتسیکوس و کرنل [۳] نیز بدست آمده‌اند (رجوع شود به جدول (۳)).

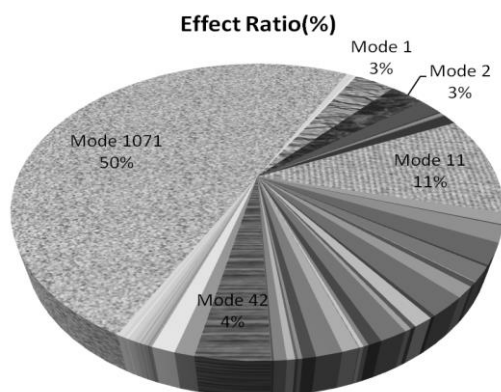
جدول (۳): مقایسه‌ی میانگین سالیانه‌ی نرخ وقوع فروریزش ( $\lambda_{Collapse}$ ) و شاخص ایمنی ( $\beta_{Collapse}$ ) قاب فولادی مورد بررسی با دو روش پیشنهاد شده و روش ارائه شده‌ی وموتسیکوس و کرنل

	$\lambda_{Collapse}$	$\beta_{Collapse}$
روش پیشنهادی در این مقاله	$5/76648 \times 10^{-5}$	۳/۸۵۶
روش وموتسیکوس و کرنل	$4/38086 \times 10^{-5}$	۳/۹۲۳

همانطور که دیده می‌شود با وجود اختلاف اندک، روش پیشنهادی، ایمنی کمتری را برای سازه معرفی می‌نماید.

#### ۵-۲- ارزیابی بر اساس قابلیت اطمینان مدهای شکست

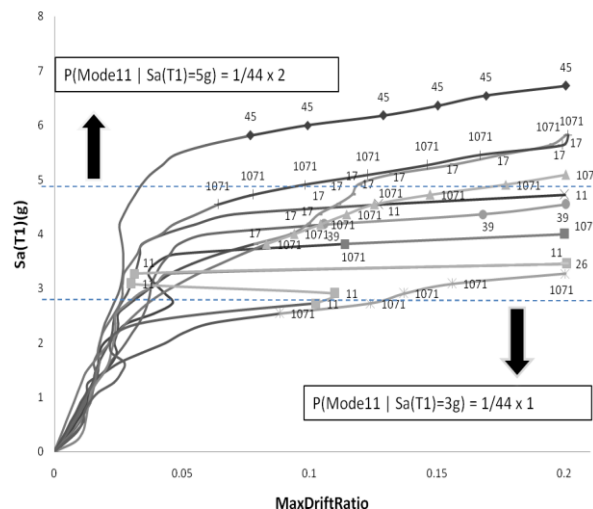
همانطور که در بخش ۵-۲،  $\lambda_{Collapse}$  محاسبه شد، با استفاده از خاصیت پیش‌انتشار شبکه‌ی بیزین، میانگین سالیانه‌ی نرخ فروریزش ناشی از هر یک از ۷۵ مد شکست، محاسبه و با تقسیم آن‌ها به میانگین سالیانه‌ی نرخ فروریزش کل سازه، میزان تاثیر آن‌ها بر  $\lambda_{Collapse}$  بدست آورده شدند. نتایج و اعداد مربوط به موثرترین مدهای شکست در شکل (۸) دیده می‌شود.



شکل (۸): میزان تاثیر مدهای شکست بر  $\lambda_{Collapse}$  مربوط به قاب فولادی مورد بررسی

نتایج نشان می‌دهند که مدهای شکست حاصل از تحلیل پوش‌آور، سهمیه‌ای برابر با ۵۰٪ در  $\lambda_{collapse}$  سازه را دارد. این نتیجه، با درنظرگرفتن ترتیب تشکیل شدن مفاصل پلاستیک در مدها، بدست آمده است.

در صورتی که از ترتیب تشکیل شدن مفاصل پلاستیک در



شکل (۷): نحوه‌ی محاسبه‌ی احتمالات شرطی مدهای شکست در شبکه‌ی بیزین بر اساس روش پیشنهادی در چارچوب IDA

لایه‌های سوم و چهارم نیز از نوع قطعی به گونه‌ای هستند که اگر شکستی درهرکدام از مدهای شکست رخ دهد، چون در کل سازه فروریزش اتفاق می‌افتد، گره‌های موجود در این لایه نیز شکست کل سازه را نتیجه دهد. در ضمن علت استفاده از این دو لایه در بررسی شکست کل سازه، افزایش قدرت همگرایی و دقت در نتایج حاصل از نرم‌افزار است.

#### ۵- نمودارها و نتایج روش پیشنهادی

با اجرای ۹۵۰۴ تحلیل IDA، با افزایش گام به گام شتاب طیفی متناظر با مد اول سازه و تحلیل سازه در هر گام، تاجایی که حداکثر جابجایی نسبی طبقات به ۲۰٪ برسد، با استفاده از معیارهای خرابی و متغیرهای تصادفی مشخص شده در بخش ۴-۲، تشکیل مرحله به مرحله‌ی مفاصل پلاستیک بررسی و لحظه‌ی تشکیل مکانیزم شکست در قاب فولادی (و مقایسه با مکانیزم-های بدست آمده از تحلیل پوش‌آور)، ثبت شد. IM و EDP متناظر با این حد در روش پیشنهادی، به عنوان EDP و IM آستانه فروریزش معرفی می‌شوند. در ادامه، بر همین مبنا، نتایج ارائه شده‌است.

#### ۵-۱- میانگین سالیانه‌ی نرخ فروریزش با استفاده از روش پیشنهادی

با درنظرگرفتن ۸۵۵۳۶ رخداد فروریزش حاصل از کلیه‌ی حالات متغیرهای تصادفی و با توجه به این نکته که متغیر تصادفی  $Sa(T1)$  بنابر نتایج تحلیل خطر احتمالاتی، از جنس نرخ سالیانه است، میانگین سالیانه‌ی نرخ وقوع فروریزش ( $\lambda_{Collapse}$ ) و شاخص ایمنی ( $\beta_{Collapse}$ ) برای کل سازه بدست

احتمالاتی متغیرهای تصادفی دانش مورد استفاده در شبکه‌ی بیزین، بر اساس این مشاهده، به‌روزرسانی می‌شود (رجوع شود به شکل ۱۰).

نکته‌ی قابل توجه اینکه توابع اصلاح شده بعد از به‌روزرسانی، بر اساس میزان تاثیر حالات تصادفیشان بر پدیده‌ی دیده شده، تغییر می‌نمایند؛ علت این امر را می‌توان در قانون بیز در به-روزرسانی یک متغیر تصادفی دانست. به عنوان مثال، شکل کلی به‌روزرسانی در مورد متغیر تصادفی شاخص خرابی پس از مشاهده‌ی فرضی فروریزش تحت مد ۱۱، به صورت رابطه (۶) است:

$$P(RV_i = rv_i | Mode11) = \frac{P(Mode11 | RV_i = rv_i)}{P(Mode11)} \times P(RV_i = rv_i) \quad (6)$$

واضح است که صورت این کسر، همان رابطه‌ای است که به واسطه‌ی آن، میزان تاثیر حالات محتمل متغیر تصادفی شاخص خرابی، بر  $\lambda_{Mode11}$  بدست می‌آید. یعنی هرچه این احتمال بیشتر باشد، احتمال این مد تصادفی نیز پس از به‌روزرسانی بیشتر خواهد شد و بالعکس. عبارت موجود در مخرج هم، عبارتی نرمال‌کننده است.

نتایج توابع به‌روزرسانی شده نشان می‌دهد متغیر تصادفی  $M_y/M_{y,p}$  بیش‌ترین حساسیت را نسبت به سایر متغیرهای تصادفی مدل‌سازی دارد، چراکه پس از به‌روزرسانی تابع توزیع آن، بیش‌ترین تغییر را نموده است. تغییرات بسیار کم در توابع توزیع سایر متغیرهای تصادفی مدل‌سازی حاکی از اثر کم آن‌ها بر مد فروریزش به شماره ۱۱ است. با رجوع به رابطه‌ی (۶) نیز مشخص است در صورتی که وقوع مد ۱۱ مستقل از حالات یک متغیر تصادفی باشد، عبارت  $P(Mode11 | RV_i = rv_i)$  به  $P(Mode11)$  تبدیل می‌شود؛ بنابراین رابطه‌ی (۶) برابر  $P(RV_i = rv_i)$  یعنی همان مقادیر احتمالاتی قبل از به‌روزرسانی خواهد شد.

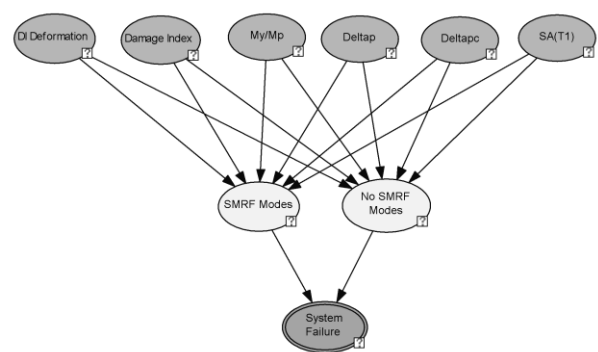
از آن‌جا که مقادیر کمتر متغیر تصادفی  $M_y/M_{y,p}$  بر رخداد مد شکست ۱۱ تاثیرگذاری بیشتری نسبت به سایر حالات این متغیر تصادفی دارد و با احتمال بیشتر در این مقادیر از متغیر تصادفی یادشده، مد ۱۱ رخ می‌دهد، میانگین تابع به-روزرسانی شده به سمت مقادیر کمتر سوق می‌یابد و با کاهش مقدار انحراف معیار (حدود ۲۰٪) اطمینان از وقوع مقادیر حول میانگین جدید، افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی برای سایر متغیرهای تصادفی نیز می‌توان گرفت. از جمله تاثیر بالای شاخص خرابی PA1 و تاثیر کم دوران ۱۰٪ بر شکل‌گیری مد.

مدها، صرف‌نظر شود، میزان تاثیر در  $\lambda_{collapse}$ ، به ۹۹٪ خواهد رسید.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد توجه به این نکته ضروری است که تنها مدهایی که بر مبنای روش پیشنهادی در شبکه‌ی بیزین ثبت نشده‌اند، مدهای با شناسه‌ی ۲۰۰۷۱ است، ولی به دلیل دارا بودن فقط ۰/۱٪ از کل فراوانی مدهای تشکیل‌شده، اثر ناچیزی در  $\lambda_{collapse}$  خواهند داشت. بنابر این شاید بتوان گفت خطای روش پیشنهادی در ارزیابی مدهای شکست، تقریباً ۰/۱٪ است.

مقایسه‌ی دیگری نیز در مورد درصد مشارکت مدهای شکست مورد انتظار در قاب‌های خمشی ویژه با لحاظ اثر ترتیب، با مدهای غیر از آن نیز انجام شد. مدهای شکست مورد انتظار در قاب‌های خمشی ویژه (SMRF) با لحاظ اثر ترتیب، شامل مد-هایی می‌شود که در آن‌ها ابتدا پلاستیک‌شدگی در تیرهای قاب اتفاق می‌افتد، سپس در پای ستون‌های متصل به فنداسیون سازه، مفاصل پلاستیک شکل می‌گیرند. برای این مقایسه، شبکه‌ی بیزینی به شکل (۹) ترتیب داده شد تا با بررسی گره‌های موجود در لایه‌ی میانی، میزان تاثیر این دو دسته مد (که متمم یکدیگرند) بر  $\lambda_{collapse}$  بدست آید.

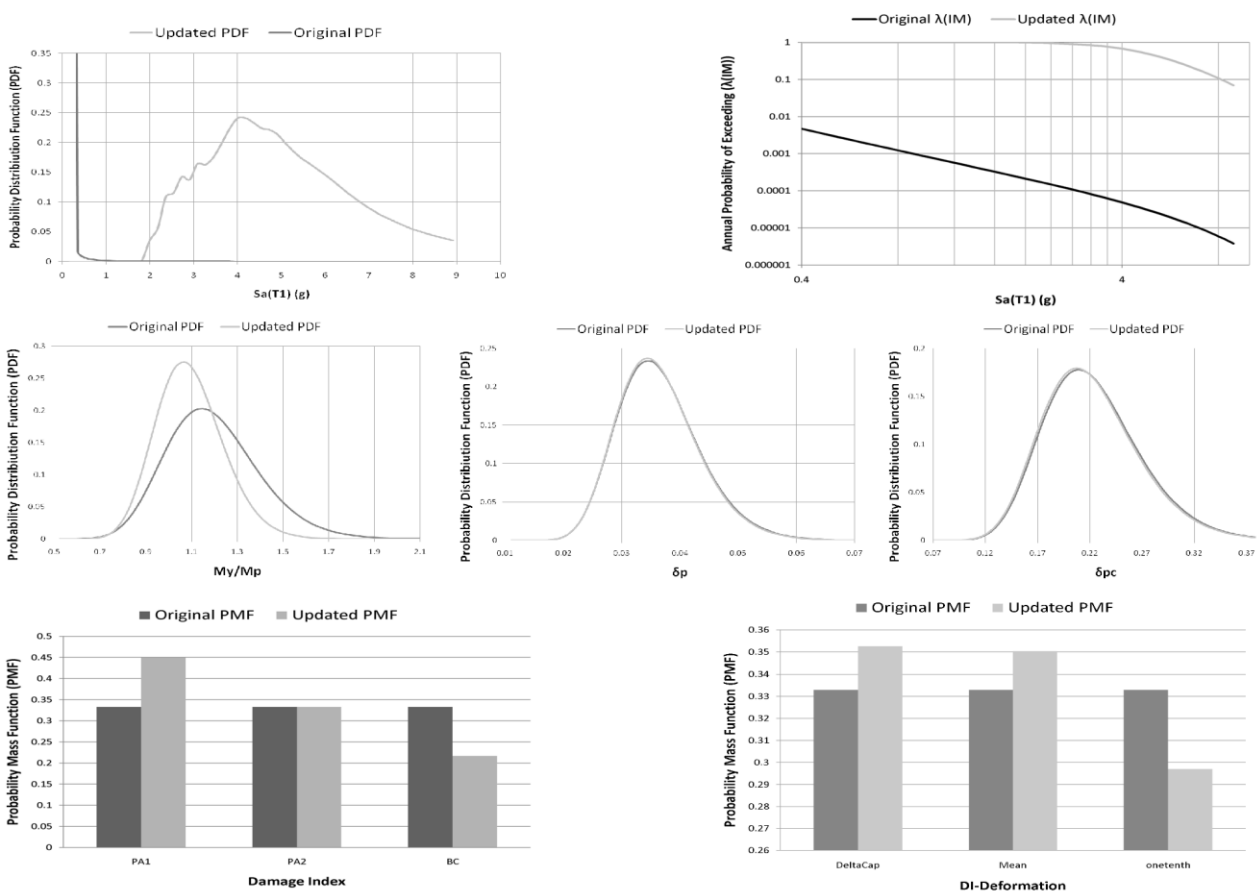
پس از مشاهده‌ی نتایج، میزان تاثیر مدهای مورد انتظار SMRF بر  $\lambda_{collapse}$  برابر با ۳۳/۵٪ بدست آمده است. بنابراین می‌توان در مطالعات بعدی مشخصات سازه را طوری بهینه نمود تا میزان تاثیر این مدها افزایش یافته و رفتار سازه، مطلوب‌تر شود.



شکل (۹): شبکه‌ی بیزین ایجاد شده، برای بررسی میزان تاثیر مدهای مورد انتظار SMRF بر  $\lambda_{collapse}$  بر اساس روش پیشنهادی

### ۵-۳- به‌روزرسانی توابع احتمالاتی با استفاده از شبکه‌ی بیزین

یکی از توانایی‌های بالای شبکه‌ی بیزین، قابلیت به‌روزرسانی آن است. به عنوان نمونه، اگر تحت زلزله‌ای، بدون داشتن هیچ-گونه اطلاعاتی در مورد شدت و یا محتوای شتاب‌نگاشتی وارده، قاب فولادی مورد بررسی تحت مد ۱۱ فرو بریزد، تمامی توابع



شکل (۱۰): توابع احتمالاتی به‌روزرسانی شده با مشاهده‌ی مد شکست ۱۱، مربوط به متغیرهای تصادفی پایه، با استفاده از شبکه‌ی بیزین

تحلیل IDA، استفاده شده است.

با مقایسه‌ی میانگین سالیانه‌ی نرخ فروریزش برای یک قاب فولادی، بر اساس روش پیشنهادی با معیارهای مطرح شده در روش IDA، دیده شد برخلاف تفاوت اندک، روش پیشنهادی ایمنی کمتری برای سازه معرفی می‌نماید. در ادامه با استفاده از تحلیل احتمالاتی بر مدهای شکست، رفتار سازه مورد بررسی قرار گرفت و دیده شد مد شکست غالب بر رفتار این قاب، صرف- نظر از ترتیب تشکیل شدن مفاصل پلاستیک، همان مکانیزم مورد انتظار از قاب با شکل‌پذیری ویژه است. همچنین دقت روش ارائه‌شده برای قاب فولادی مورد بررسی بسیار بالا ارزیابی شد.

در پایان نیز با بهره‌گیری از شبکه‌ی بیزین ایجاد شده در روش پیشنهادی، توابع احتمالاتی متغیرهای تصادفی موجود در سازه‌ی مورد بررسی، پس از مشاهده فرضی فروریزش سازه بر مبنای یک مد احتمالاتی مشخص، به‌روزرسانی شد. نتایج بدست آمده نشان داد عامل مقاومت خمشی تسلیم تیرهای سازه‌ای اثر بسزایی در فروریزش سازه تحت مد فرضی یادشده داشتند.

بنابر با استفاده از روش جدید ارائه شده نه تنها می‌توان

همچنین دیده می‌شود که با استفاده از شبکه‌ی احتمالاتی بیزین، امکان اصلاح نتایج منحنی‌های PSHA، که با نام گره‌ی تصادفی SA(T1) در این شبکه وجود دارد نیز امکان‌پذیر است و می‌تواند قدرت بالای این شبکه را نشان دهد.

## ۶- نتیجه‌گیری

روش‌های موجود در تشخیص حد آستانه‌ی فروریزش سازه‌ها در مهندسی زلزله، کلی و تا حدی تقریبی هستند. علاوه بر این نیز درک روشنی از رفتار سازه تحت نیروهای لرزه‌ای تا سطح فروریزش مشخص نمی‌نمایند؛ از این رو، روشی جدید ارائه شده است تا با در نظر گرفتن تشکیل شدن مرحله به مرحله‌ی مفاصل پلاستیک تا شکل‌گیری کامل مکانیزم شکست در سازه و عدم- قطعیت‌های موجود در مکانیزم‌های تشکیل‌شده، امکان تشخیص مدهای شکست محتمل سازه در تحلیل دینامیکی غیرخطی با دقت نسبتاً خوبی، با استفاده از تحلیل پوش‌اور، فراهم آید. همچنین برای ارزیابی احتمالاتی عملکرد سازه در سطح فروریزش تحت تمامی رخداد‌های لرزه‌ای ممکن و افزایش کارایی روش پیشنهادی، از شبکه‌ی احتمالاتی بیزین بر مبنای روش

- S. Mahadevan, R.Zhang, and N. Smith, "Bayesian networks for system reliability reassessment", *Journal of Structural Safety*, September, 2001. [۷]
- American Institute Of Steel Construction, INC, "Specification for Structural Steel Buildings", AISC, March, 2005. [۸]
- American Society of Civil Engineers, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", ASCE7, 2005. [۹]
- McKenna, F., Fenves, G., Jeremic, B. and Scott, M. "Open system for earthquake engineering simulation", Available from <http://opensees.berkeley.edu>, 2000. [۱۰]
- Gupta, A. and Krawinkler, H. "Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures", Department of Civil and Environmental Engineering of the Stanford University, 1999. [۱۱]
- Lignos D.G. "Sideway collapse of deteriorating structural systems under seismic excitations", PhD. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering and the Committee on the Graduate Studies of the Stanford University, 2008. [۱۲]
- D.G. Lignos, H. Krawinkler "A Database in Support of Modeling of Component Deterioration for Collapse Prediction of Steel Frame Structures", Proceedings of ASCE Structures Congress, SEI institute, Long Beach CA, 2007. [۱۳]
- Zareian F. "Simplified performance-based earthquake engineering", PhD. Dissertation", Department of Civil and Environmental Engineering and the Committee on the Graduate Studies of the Stanford University, 2006. [۱۴]
- F. Zareian, and R.A. Medina, "A practical method for proper modeling of structural damping in inelastic plane structural shafts", *Journal of Bridge Engineering*, 2002. [۱۵]
- شاخص ایمنی سازه‌ها را به طور موثری بدست آورد بلکه رفتار آن‌ها را نیز در سطح فروریزش، می‌توان در چارچوب احتمالاتی پیش‌بینی نموده و از این موارد در ارتقای ملزومات طراحی و رواداری‌های آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها بهره جست.
- ۷- تقدیر و تشکر**
- نویسندگان از آقای دکتر لیگنوس بابت راهنمایی‌های مفیدشان در زمینه‌ی مدل‌سازی صحیح و در اختیارقرار دادن منابع مربوطه قدردانی می‌نمایند.
- همچنین در مدل‌سازی سازه‌ای و احتمالاتی، به‌ترتیب از نرم‌افزارهای رایگان اوپن‌سیس از دانشگاه برکلی و جنای از دانشگاه پیتمبورگ استفاده شده است.
- ۸- مراجع**
- [۱] مهدوی عادل، مهدی، بنزاده. مهدی، "استفاده از آمار بی‌زین در تحلیل احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای برای قاب‌های خمشی فولادی"، ششمین کنگره‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. اردیبهشت ۱۳۹۰.
- [۲] مهدوی عادل، مهدی، "تعیین طیف خطر یکنواخت و طیف طراحی ساختگاه. تهران"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.
- [۳] H. Krawinkler, et al "Decision support for conceptual performance-based design", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, October, 2005.
- [۴] Ibarra L.F. and Krawinkler H. "Global collapse of frame structures under seismic excitation", Department of Civil and Environmental Engineering of the Stanford University, Report No.152, August, 2005.
- [۵] D. Vamvatsikos, and C.A. Cornell, "Incremental dynamic analysis", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002.
- [۶] Federal Emergency Management Agency, "Quantification of Building Seismic Performance Factors", FEMA P695, June, 2009.

Engineering and Structural Dynamics, 2005.

A. Benavent-Climent ,“An energy-based damage model for seismic response of steel structures”, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007. [۲۵]

systems”, Journal of Computers and Structures, 2010.

H. Krawinkler, and F. Zareian ,“Prediction of collapse-How realistic is it, And what can we learn from it?”, Journal of The Structural Design Of Tall And Special Buildings, December , 2007. [۲۶]

D. Vamvatsikos and M. Fragiadakis, “Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty”, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009. [۲۷]

Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V., “Earthquake engineering: from Engineering Seismology to Performance-based Engineering”, CRC Press, New York, 2004. [۲۸]

Faber, M.H. ,“Risk and safety in civil engineering, Lecture notes”, Swiss Federal Institute of Technology, 2007. [۲۹]

Decision system laboratory of the University of Pittsburgh; GeNIe, Available from <http://dsl.sis.pitt.edu>. [۲۰]

A. Der Kiureghian, and O. Ditlevsen, “Aleatory or epistemic? Does it matter?”, Journal of Structural Safety, August, 2008. [۲۱]

D. G. Lignos, H. Krawinkler ,“A steel component database for deterioration modeling of steel beams with RBS under cyclic loading”, Proceedings of ASCE Structures Congress, Orlando Florida, May 12-15, 2010. [۲۲]

YJ. Park, AHS. Ang, and YK. Wen, “Damage-limiting aseismic design of buildings”, Journal of Earthquake Spectra, 1987. [۲۳]

L. F. Ibarra, A. Medina R. and H. Krawinkler ,“Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration”, Journal of Earthquake [۲۴]

۹- زیر نویس

- 
- <sup>۱</sup> Vamvatsikos & Cornell
  - <sup>۲</sup> Failure Modes
  - <sup>۳</sup> Mechanism
  - <sup>۴</sup> Coupled
  - <sup>۵</sup> Mahadevan
  - <sup>۶</sup> OpenSees
  - <sup>۷</sup> Ibarra-Krawinkler
  - <sup>۸</sup> Lignos
  - <sup>۹</sup> Bilinear
  - <sup>۱۰</sup> Zareian
  - <sup>۱۱</sup> Vamvatsikos & Fragiadakis
  - <sup>۱۲</sup> GeNIe
  - <sup>۱۳</sup> Reduced Beam Section
  - <sup>۱۴</sup> Damage Index
  - <sup>۱۵</sup> DI-Deformation
  - <sup>۱۶</sup> Benavent-Climent
  - <sup>۱۷</sup> Resurrection
  - <sup>۱۸</sup> Deterministic
  - <sup>۱۹</sup> Effect Ratio