

ارزیابی قابلیت اطمینان قاب‌های خمشی فلزی با استفاده از روش شبیه‌سازی وزنی و درون‌یابی

تابع پایه شعاعی

مهراوه رخشانی‌مهر^۱، محسن راشکی^۲، محمود میری^۳، مهدی اژدری‌مقدم^۲

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|---|
| دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۳۰ | قاب‌های خمشی فلزی جزء متداول‌ترین سازه‌های ساختمانی هستند. این سیستم سازه‌ای به سبب عواملی نظیر نقصان در ساخت و خصوصاً فراهم نشدن صلبیت کامل در اتصالات، ویژگی‌های مصالح و یا اعمال بارهای پیش‌بینی نشده تحت تاثیر عدم قطعیت‌هایی است که می‌تواند ایمنی ساختمان را تحت تاثیر قرار دهند. تئوری قابلیت اطمینان سازه با در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها و ترکیب آن با تئوری احتمالات و سازه به ارزیابی سطح ایمنی سازه می‌پردازد. در این مقاله، قابلیت اطمینان و آنالیز حساسیت قاب‌های خمشی فلزی به کمک روش شبیه‌سازی وزنی مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور یک الگوریتم ترکیبی جهت برآورد احتمال خرابی و جستجوی نقطه طراحی با بکارگیری همزمان الگوریتم کرم شب‌تاب و روش متا-مدل تابع پایه شعاعی پیشنهاد شده است. کارایی رویکرد مزبور نخست بر روی چندین مثال عددی ارزیابی شده و سپس ایمنی و نیز حساسیت ایمنی نسبت به متغیرهای تصادفی یک قاب سه طبقه فولادی تحت یک شتابناکشت مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. سطح ایمنی به دست آمده با نتایج دقیق حاصل از روش شبیه‌سازی مونت کارلو منطبق و بیانگر کارایی الگوریتم پیشنهادی است. نتایج برآورد ایمنی و آنالیز حساسیت بیانگر آن است که نقصان در ساخت اتصالات‌های گیردار در قاب‌های خمشی به شکل قابل توجهی احتمال خرابی قاب را تحت تاثیر قرار می‌دهد. |
| واژگان کلیدی: قابلیت اطمینان، شبیه‌سازی وزنی، آنالیز حساسیت، تابع پایه شعاعی، قاب خمشی فلزی. | |

۱- مقدمه

عموما رفتار واقعی یک سیستم سازه‌ای وابسته به عدم قطعیت‌ها و پارامترهای تصادفی متغیرهای موجود در آن سازه است. این متغیرها می‌توانند شامل مشخصات مصالح، ابعاد هندسی، بارگذاری و شرایط مرزی مختلف باشند که در مباحث مهندسی از آنها با عنوان مقاومت و بار یاد می‌شود [۱]. در اغلب این مباحث، به شکل‌های مختلف با

مساله سلامت و خرابی مواجه هستیم که تئوری قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن مقاومت و بار سازه به عنوان کمیت‌های غیر قطعی و متغیرهای تصادفی، این مفاهیم را به دیده احتمالات می‌نگرد. به طور کلی اگر در تحلیل یک سیستم، حالت حدی میان سلامت و خرابی را توسط تابع شرایط حدی $G(R, Q)$ بیان کنیم Q و R به ترتیب مبین متغیر تصادفی بار و مقاومت در آن سیستم هستند، خرابی هنگامی اتفاق می‌افتد که مقدار G کوچکتر از صفر گردد. مطابق این تعریف و از دیدگاه سازه‌ای هرگاه پاسخ سازه از مقاومت نظیر آن بیشتر شود در سیستم خرابی رخ

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: f.mirsafi@yahoo.com

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه الزهرا

۲. استادیار، گروه معماری، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

مجموعه‌ای [۹ و ۱۰] پیشنهاد شده است. این روش‌ها با حفظ دقت، احتمال خرابی را با تعداد بسیار کمتری نسبت به روش مونت کارلو در اختیار قرار می‌دهند. اخیراً به منظور بهبود دقت در روند حل و نیز طراحی ایمن در مسائل سازه‌ای، محققین با استفاده از روش‌های ترکیبی نظیر استفاده همزمان از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی توده ذرات، الگوریتم فاخته و مسابقه اسب‌دوانی به همراه روش‌های مرتبه اول قابلیت اطمینان به ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌ها پرداخته‌اند [۱۱ و ۱۳]. همچنین استفاده از روش‌های متا مدل جهت کاهش حجم محاسبات مسئله توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این روش‌ها به سه گروه روش‌های سطح پاسخ چند جمله‌ای، روش‌های اسپلین و روش‌های مبتنی بر یادگیری و شبکه عصبی تقسیم بندی می‌شوند و استفاده همزمان آنها و روش‌های قابلیت اطمینان به سرعت در حال گسترش است [۱۴-۱۹]. در میان روش‌های موجود، روش‌های اسپلین و شبکه عصبی این ویژگی را دارا هستند که برای مسائلی که تابع شرایط حدی آنها با استفاده از درجات پایین چند جمله‌ای قابل محاسبه نیست، به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد پاسخ‌های قابل قبولی ارائه کنند [۱۴]. این روش‌ها مخصوصاً جهت حل مسائلی که در آنها برآورد تابع شرایط حدی پیچیده و زمان بر بوده و نیز تابع شرایط حدی به صورت صریح داده نشده، موثر هستند.

۲- روش‌های بکارگرفته شده در تحقیق

در مقاله حاضر قابلیت اطمینان قاب خمشی فلزی به عنوان یک سیستم سازه‌ای متداول، با در نظر گرفتن عدم قطعیت در صلبیت اتصال مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور روش شبیه‌سازی وزنی [۲۰] و نیز رویکرد جستجوی پیشنهاد شده در مرجع [۲۱] برای یافتن محتمل‌ترین حالت خرابی سازه جهت افزایش کارایی با یکدیگر ترکیب شده‌اند. فرآیند جستجو در این تحقیق توسط الگوریتم جستجوگر کرم شب‌تاب صورت پذیرفته و

می‌دهد. در ارزیابی قابلیت اطمینان، به ازای تمام حالاتی که احتمال این اتفاق وجود دارد وضعیت سیستم باید مورد ارزیابی قرار گیرد [۲]. در چنین حالتی برای بیان احتمال خرابی سازه (P_f) خواهیم داشت:

$$P_f = P(R < Q) = P(G(R, Q) < 0), \quad (1)$$

رابطه فوق یک رابطه اساسی قابلیت اطمینان است که بدست آوردن پاسخ دقیق آن بسیار دشوار بوده، عملاً امکان محاسبه و تحلیل آن در ناحیه خرابی ممکن نیست. لیکن با استفاده از ساده‌سازی و در نظر گرفتن فرضیاتی، چندین روش عددی و شبیه‌سازی برای حل آن ارائه شده است. مشهورترین آن‌ها روش‌های مرتبه اول قابلیت اطمینان (FORM) و شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) می‌باشند. روش‌های مرتبه اول به لحاظ محاسبات ساده بوده و علاوه بر سادگی دارای این ویژگی هستند که نقطه با بیشترین احتمال وقوع و به عبارتی محتمل‌ترین حالت خرابی در مسائل سازه‌ای را در اختیار طراح قرار می‌دهند. فاصله نقطه مذکور از مبدا (در فضای نرمال استاندارد) شاخص قابلیت اطمینان (β) نامیده می‌شود. با محاسبه آن به صورت تقریبی می‌توان احتمال خرابی سازه را نیز تخمین زد. اما در سازه‌های با شکل خرابی پیچیده، مسائل با متغیرهای زیاد و یا مسائلی با چندین نقطه محتمل شکست موضعی، این روش‌ها در تعیین نقطه طراحی و تخمین احتمال خرابی سازه ناتوان هستند. همچنین برای حل مسائل با متغیرهای غیر نرمال، نیاز به استفاده از نگاشت و انتقال متغیرها به فضای نرمال استاندارد پیچیدگی مساله را بیشتر می‌کند [۳-۵]. در مقابل، روش شبیه‌سازی مونت کارلو با وجود آنکه قادر به تخمین مقدار احتمال خرابی با دقت بالا است، اما در ارائه محتمل‌ترین حالت خرابی سازه ناتوان است. علاوه بر آن بکارگیری این روش برای سازه‌های با احتمال خرابی پایین نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی خواهد بود که از معایب این روش محسوب می‌شود [۵]. برای حل مشکلات فوق، روش‌های شبیه‌سازی دیگری از جمله روش نمونه‌گیری مبتنی بر اهمیت [۶]، نمونه‌گیری خطی [۷ و ۸] و شبیه‌سازی زیر

$$P_f = \frac{\sum_{i=1}^N I_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \quad (4)$$

که در آن I بردار شمارنده است و نمونه‌های موجود در ناحیه سلامت و خرابی را جدا می‌سازد. مراحل حصول پاسخ با استفاده از این روش به طور مفصل در مرجع مزبور ارائه شده است.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌ساز کرم شب‌تاب جهت برآورد نقطه طراحی

یکی از معایب روش‌های گرادیانی در تخمین نقطه طراحی، نیاز به استفاده از یک نقطه شروع جستجوی مناسب و نیز بکارگیری مشتقات تابع شرایط حدی جهت حصول پاسخ است. در سال‌های اخیر به منظور غلبه بر این محدودیت و نیز با توجه به فراگیر شدن روش‌های مبتنی بر کامپیوتر، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری به شکل گسترده‌ای در مباحث بهینه‌یابی مورد استفاده محققین قرار گرفته است. الگوریتم جستجوگر کرم شب‌تاب یکی از این روش‌های الهام گرفته از طبیعت است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲]. از مزایای استفاده از این الگوریتم، امکان ارائه پاسخ‌های بهینه موضعی در کنار پاسخ بهینه عمومی است. این ویژگی جهت بررسی مسائل قابلیت اطمینان با تابع شرایط حدی غیرخطی و نیز مسائل چندین شاخص قابلیت اطمینان بسیار موثر است. چنانچه مساله دارای چندین شاخص قابلیت اطمینان باشد، موقعیت آنها توسط الگوریتم مزبور به عنوان پاسخ ارائه شده و آشکار می‌سازد که نتایج ارائه شده روش مرتبه اول در برآورد احتمال خرابی قابل اطمینان نیست (به دلیل مشکل ذاتی این روش‌ها در تخمین احتمال خرابی). این روش که بر مبنای جذب شونده‌ی کرم‌های شب‌تاب به نور بیشتر است نخستین بار در سال ۲۰۰۸ توسط محققین دانشگاه کمبریج ارائه شده و مبتنی بر سه شرط اساسی است: (۱) کرم‌های شب‌تاب فاقد جنسیت هستند. (۲) جذابیت متناسب با نور کرم‌های شب‌تاب است و کرم با نور کمتر

متعاقبا از یک روش آنالیز حساسیت متغیرها در فضای اصلی جهت بررسی حساسیت احتمال خرابی به تغییرات متغیرها استفاده شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات در مسئله سازه‌ای از روش متا-مدل توابع پایه شعاعی استفاده می‌شود. روش‌های مزبور به صورت کاملا خلاصه در ادامه آمده و برای هر قسمت مراجع مناسب جهت بررسی بیشتر آورده شده است. سپس الگوریتم ترکیبی پیشنهادی جهت برآورد نتایج قابلیت اطمینان ارائه شده است.

۲-۱- برآورد احتمال خرابی و تعیین نقطه طراحی

به شکل کلی در روش‌های مرتبه اول قابلیت اطمینان (بدون در نظر گرفتن روش جستجوی نقطه طراحی)، هدف برآورد کمترین مقدار شاخص قابلیت اطمینان به صورت زیر است:

$$\text{Min } \beta = \sqrt{\sum_{i=1}^d U_i^2}, \quad (2)$$

Subject to $G(X) = 0$,

در رابطه فوق، U(1:d) مقدار متغیر در فضای نرمال استاندارد و G مقدار حاصله برای تابع شرایط حدی مسئله است. مرجع [۲۱]، یک روش جای‌گزین به منظور یافتن نقطه با بیشترین احتمال وقوع و نیز آنالیز حساسیت متغیرها به صورت زیر ارائه کرده است. در آن برخی از محدودیت‌های موجود در روش کلاسیک مرتبه اول نظیر لزوم بکارگیری نگاشت‌های متوالی مرتفع شده است.

$$\text{Max } W = \prod_{i=1}^s PDF_i(\mu_i, \sigma_i), \quad (3)$$

Subject to $G(X) = 0$

در رابطه فوق، W وزن هر نقطه، s تعداد متغیرهای مسئله و PDF_i تابع چگالی احتمال متغیر i با میانگین μ و انحراف معیار σ و X متغیر در فضای اصلی مسئله است. مرجع [۲۰] با بکارگیری این شیوه وزن‌دهی احتمال خرابی را به کمک تعداد نمونه‌هایی کمتر از روش مونت کارلو محاسبه کرده است. با تعریف وزن برای هر نمونه تولید شده در یک بازه مشخص و بر اساس تابع توزیع یکنواخت، احتمال خرابی صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

بر اساس داده‌های اولیه درون‌یابی می‌کند، \mathbf{p} را می‌توان به صورت زیر تعیین نمود.

$$\eta(x^{(i)}) = \sum_{j=1}^m p_j \varphi(\|x^{(i)} - x^{(j)}\|) \quad (7)$$

رابطه بالا را می‌توان به صورت ماتریسی زیر بازنویسی کرد.

$$\bar{\phi}_{RBS} \mathbf{P} = \mathbf{y}^T \quad (8)$$

چنانچه در رابطه بالا معکوس $\bar{\phi}_{RBS}$ وجود داشته باشد، ضرایب وزنی به صورت زیر محاسبه خواهند شد.

$$\mathbf{P} = (\bar{\phi}_{RBS})^{-1} \mathbf{y}^T \quad (9)$$

بدین ترتیب رابطه را به شکل کلی زیر خواهیم داشت.

$$\eta_{(\mathbf{x})} = (\bar{\phi}_{RBS}) \mathbf{P} = (\bar{\phi}_{RBS}) (\bar{\phi}_{RBS})^{-1} \mathbf{y}^T \quad (10)$$

$$\bar{\phi}_{RBS} = [\phi_{RBS}(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(1)}\|), \dots, \phi_{RBS}(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(m)}\|)]$$

توابع پایه شعاعی مختلفی برای استفاده در رابطه درون‌یابی فوق ارائه شده‌اند که در تحقیق حاضر از تابع به صورت زیر برای حل مسائل استفاده شده است.

$$\phi_{RBS} = \sqrt{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^j\|^2 + c^2} \quad (11)$$

که در آن c ضریبی ثابت است.

۴-۲- آنالیز حساسیت مبتنی بر قابلیت اطمینان

بررسی حساسیت احتمال خرابی به متغیرهای تصادفی در یک سیستم سازه‌ای از نکات کلیدی و مهم در طراحی بهینه و نیز ساده‌سازی مسائل با تعداد متغیرهای تصادفی زیاد است. در زمینه مسائل مقاوم‌سازی سازه‌ها نیز می‌توان با شناسایی متغیرهای با اهمیت، از نتایج آنالیز حساسیت جهت افزایش سطح ایمنی سازه با کمترین هزینه استفاده نمود. متداول‌ترین روش آنالیز حساسیت در روش‌های مرتبه اول، استفاده از نتایجی است که در حین پروسه جستجو برای یافتن نقطه طراحی بدست می‌آید و معمولاً از آنها با عنوان فاکتورهای اهمیت یاد می‌شود [۲]. مرجع [۲۱] یک روش جدید جهت محاسبه فاکتورهای اهمیت در فضای اصلی متغیرها ارائه نموده است. مطابق شکل ۱، از میان نمونه‌های موجود در ناحیه خرابی، نمونه با بیشترین وزن تعیین موقعیت می‌شود، سپس نسبت تابع چگالی احتمال در این نقطه و نیز مد برای هر بعد

جذب کرم با نور بیشتر می‌شود. اگر هیچ نوری نباشد حرکت کرم‌ها تصادفی خواهد بود. (۳) روشنایی با تابع هدف در ارتباط است. بر مبنای قوانین فوق، حرکت بر اساس رابطه زیر شکل خواهد گرفت.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma n_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha_i \varepsilon_i^t \quad (5)$$

در رابطه فوق x_i^t, x_i^{t+1} به ترتیب موقعیت کرم شب‌تاب i در زمان t و $t+1$ بوده، β_0 مقدار جذابیت، γ ضریب جذب نور، r فاصله میان دو کرم شب‌تاب، α پارامتر حرکت تصادفی و ε_i^t عدد تصادفی تولید شده بر اساس تابع چگالی احتمال گوس و یا تابع چگالی احتمال یکنواخت است [۲۲]. توضیحات مناسب در خصوص الگوریتم و پارامترهای موجود در این روش را می‌توان در مرجع [۲۳] مشاهده نمود.

۳-۲- روش درون‌یابی مبتنی بر توابع پایه شعاعی

روش درون‌یابی مبتنی بر توابع پایه شعاعی یکی از روش‌های متا-مدل از نوع اسپلین است که برای مسائلی که در آنها مدل‌سازی و شبیه‌سازی پرهزینه و یا زمان‌بر است مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر خلاف روش‌های پیش‌بینی مبتنی بر شبکه عصبی، این روش تخمین تابع را با محاسبات بسیار کمتر در اختیار می‌گذارد. ضمن آنکه دقت محاسبات در آن به اندازه قابل قبولی بالا است [۱۴]. این روش با بکارگیری نقاط پایه که در آنها مقدار تابع شرایط حدی محاسبه شده است، مقادیر جدید تابع شرایط حدی را در موقعیت جدیدی از نمونه‌ها تخمین می‌زند. برای این منظور روش مذکور یک تابع درون‌یاب بر مبنای بکارگیری مجموع داده‌های مشاهده شده به صورت زیر تشکیل می‌دهد:

$$\eta(x) = \sum_{j=1}^m p_j \varphi(\|x - x^{(j)}\|) \quad (6)$$

که در آن $\|\cdot\|$ بیانگر فاصله اقلیدسی دو نقطه، p ضریب وزنی مربوط به تاثیر تابع شکل و $\varphi(\cdot)$ تابع پایه شعاعی انتخاب شده است [۲۴]. از آنجا که روش پیش‌بینی تابع را

مدل نظیر درون یابی پایه شعاعی ترکیب نمود. برای این منظور بر اساس تابع چگالی احتمال متغیر و روش ارائه شده در مرجع [۲۰] بازه‌های مناسب تولید نمونه تعیین می‌شوند. پس از تعیین بازه‌ها در روش شبیه‌سازی وزنی اقدام به تولید نمونه بر اساس تابع توزیع یکنواخت می‌شود. نمونه‌های تولید شده همزمان به عنوان جمعیت اولیه الگوریتم بهینه‌ساز و نیز مبنای نقاط کنترل در روش درونیابی پایه شعاعی در نظر گرفته می‌شوند. بدین ترتیب چنانچه نیاز به نمونه بیشتری جهت برآورد احتمال خرابی و یا حرکت کرم‌های شبتاب (برای رسیدن به نقطه با بیشترین احتمال خرابی) باشد، نمونه‌های جدید تولید شده و نیز موقعیت جدید کرم‌های شبتاب بر اساس روش شبیه‌سازی به کمک تابع پایه شعاعی وزن‌دهی شده و جهت برآورد پاسخ به‌کار گرفته می‌شوند. در هر گام بهترین موقعیت با فراخوانی تابع شرایط حدی اعتبار سنجی شده و نتیجه آن جهت اصلاح دقت تابع پایه شعاعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند تا زمان همگرایی الگوریتم بهینه‌ساز به محتمل‌ترین حالت خرابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. توضیحات فوق ذیلاً در قالب ۷ مرحله جهت حصول پاسخ ارائه شده است.

محاسبه شده و نهایتاً از این مقادیر برای بدست آوردن مقادیر حساسیت به صورت زیر استفاده می‌شود.

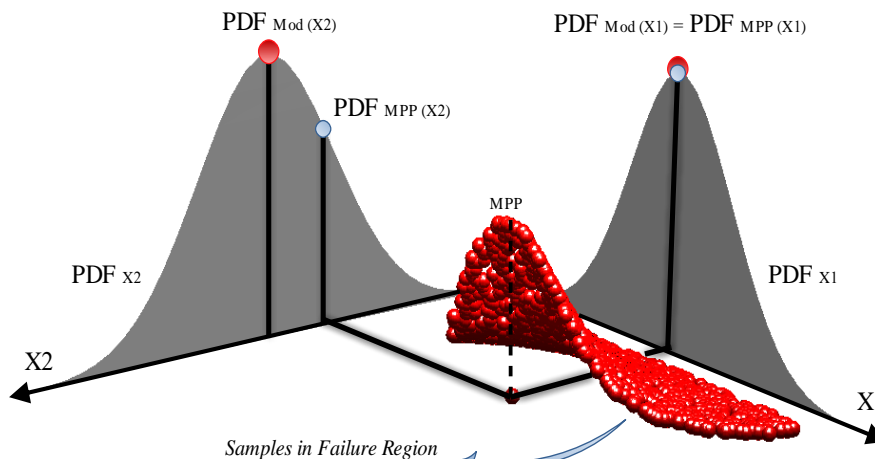
$$\alpha_{X_i} = \frac{\zeta_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^s \zeta_{X_i}^2}} \quad (12)$$

$$\zeta_{X_i} = 1 - \frac{PDF_{MPP X_i}}{PDF_{mod X_i}}$$

که در آن $PDF_{mod X_i}$ و $PDF_{MPP X_i}$ به ترتیب مقادیر تابع چگالی متغیر X_i در نقاط مد و محتمل‌ترین حالت خرابی آن متغیر تصادفی است. بدین ترتیب انتظار می‌رود تغییرات میانگین و انحراف معیار متغیری که در نقطه طراحی، فراوانی نسبی نرمال شده کمتری نسبت به سایر متغیرها داشته باشد اثر بیشتری در تغییرات شاخص قابلیت اطمینان مسئله به همراه داشته باشد [۲۱]. در تحقیق حاضر از این روش جهت برآورد حساسیت متغیرها در مساله استفاده شده است.

۳- الگوریتم ترکیبی جهت برآورد ایمنی و محتمل‌ترین حالت خرابی سازه

شیوه تولید نمونه و برآورد احتمال خرابی در روش شبیه‌سازی وزنی این امکان را فراهم می‌سازد تا به راحتی آن را با روش‌های جستجوی فرااكتشافی و نیز روش‌های متا-



شکل ۱. ارزیابی اهمیت متغیرها بر اساس روش ارائه شده در مرجع [۲۱]

۱-۳-۱- تابع درجه دوم

مثال مورد بررسی این قسمت شامل یک تابع شرایط حدی به صورت زیر است.

$$G(X) = 5 - 0.5(X_1 - 0.2)^2 - X_2, \quad (13)$$

در رابطه فوق X_1 و X_2 متغیرهای تصادفی غیر وابسته با توابع توزیع نرمال استانداردند. مطابق تحلیل انجام شده مساله دارای دو پاسخ موضعی برابر (۰,۹۶۵ و ۰,۷۴۱-) و (۰,۳۶ و ۲,۹۱۶) بوده، نقطه بهینه کلی آن (۰,۹۶۵ و ۰,۷۴۱-) می‌باشد. به منظور ارزیابی دقت، نتیجه حاصل از روش پیشنهادی در کنار نتایج موجود در مرجع ۲۰ و ۲۱ در جدول (۱) ارائه شده است. آنالیز حساسیت مبتنی بر روش مرتبه اول نتایج حساسیت را برابر با (۰,۳۵۵ و ۰,۹۴۳۶) ارائه نموده است. نتیجه حساسیت حاصل از رابطه (۱۲) در جدول ۱ ارائه شده است. با مقایسه نتایج ارائه شده در این جدول نتیجه می‌شود رویکرد پیشنهادی در برآورد پاسخ دقت مطلوبی دارد.

۲-۱-۳- تابع نمایی

در این مثال تابع شرایط حدی به صورت تابع نمایی رابطه (۹) داده شده، متغیرها نیز دارای توزیع نرمال استاندارد می‌باشند [۲۵]. نتایج حاصل از روش پیشنهادی برای این مثال در جدول (۲) ارائه شده است. روش مرتبه اول قابلیت اطمینان نتایج حساسیت را به صورت (۰,۳۴۴ و ۰,۹۳۹) ارائه نموده است.

$$G(X) = e^{(0.4(X_1+2)+6.2)} - e^{(0.3X_2+5.0)} - 200, \quad (14)$$

۳-۱-۳- تیر یکسر گیردار

در این مثال محتمل ترین حالت شکست یک تیر یک سر گیردار تحت بار گسترده یکنواخت مورد ارزیابی قرار گرفته است. تابع شرایط حدی برای تیر مذکور مطابق رابطه (۱۵) و مقادیر میانگین و انحراف معیار متغیرهای مسئله در جدول (۳) ارائه شده است.

$$G(X) = 18.46154 - 7.476923 \times 10^{10} \frac{X_1}{X_2^3}, \quad (15)$$

مرحله ۱. تعیین بازه جهت تولید نمونه بر اساس مرجع

[۲۰] و تولید نمونه مینا برای روش درونیابی

مرحله ۲. محاسبه تابع شرایط حدی در نقاط مینا و

تشکیل تابع درونیاب پایه شعاعی

مرحله ۳. تولید نمونه‌های جدید در بازه تعیین شده جهت

برآورد احتمال خرابی در روش وزنی

مرحله ۴. تخمین تابع شرایط حدی نمونه‌های گام قبل به

کمک روش درونیابی و وزن‌دهی به نمونه‌ها بر اساس

رابطه ۳ و برآورد احتمال خرابی

مرحله ۵. اعتبار سنجی نمونه با بیشترین وزن در ناحیه

خرابی و به هنگام سازی تابع درونیاب.

مرحله ۶. در نظر گرفتن نمونه‌ها به عنوان جمعیت کرم-

های شبتاب و حرکت بر اساس الگوریتم بهینه ساز و

رابطه ۳

مرحله ۷. در صورت همگرا شدن الگوریتم: برآورد نتایج

آنالیز حساسیت بر اساس رابطه ۱۲ و اصلاح احتمال

خرابی بر اساس مرحله ۴. در صورت همگرا نشدن برگشت

به مرحله ۵.

به کمک رویکرد فوق علاوه بر آنکه امکان برآورد

محتمل‌ترین حالت خرابی و نقطه طراحی با تعداد شبیه-

سازی اندک امکان‌پذیر می‌گردد، سایر نقاط با بیشترین اثر

در برآورد احتمال خرابی، با دقت بیشتری شناسایی شده و

سبب بهبود تخمین احتمال خرابی در روش وزنی می-

شوند.

۱-۳-۱- مثال های عددی

به منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادی، نخست مثالهای

عددی با توابع شرایط حدی مختلف مورد بررسی قرار

گرفته‌است. برای این منظور پاسخ حاصل از روش

پیشنهادی در تعیین نقطه با بیشترین احتمال خرابی و

نیز نتایج حساسیت برای مسائل مزبور محاسبه و با نتایج

موجود در مراجع مقایسه شده است. برای هر سه مساله

زیر از ۶۰ نمونه مینا جهت استفاده از روش تابع پایه

شعاعی استفاده می‌شود.

$$G(W, E, P(t), I, \xi, Z, F_y) = Z.F_y - M \quad (16)$$

احتمال خرابی محاسبه شده توسط روش شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از یک میلیون نمونه برابر ۰.۰۱۱۰۰ محاسبه شده است که شاخص قابلیت اطمینانی معدل ۳.۰۶ به همراه داشته است. با توجه به تعداد متغیرهای موجود در مساله، از ۲۰۰ نمونه جهت تخمین تابع در روش تابع پایه شعاعی استفاده شده که پس از همگرایی الگوریتم، احتمال خرابی ۳.۱۹ و محتملترین حالت خرابی با مختصات زیر برای قاب محاسبه شده است:

(۲۲۶۲,۶ و ۲۴۹,۰۷ و ۰,۵۰۶ و ۰,۰۵۰۶ و ۲۱۰,۶ و ۱۷۷ و ۰,۰۹ و ۲,۰۶ و ۱۰,۶ و ۶۴۹۵۳) بر اساس روش رتبه‌بندی ارائه شده در رابطه (۱۲)، متغیرهای وزن (W)، بار (P) و ممان اینرسی به ترتیب بیشترین تاثیر را در ایمنی سازه داشته‌اند در حالی که تاثیر متغیرهای باقیمانده بر ایمنی قاب در مقایسه با سه پارامتر مزبور بسیار کمتر بوده است.

متغیرهای مساله دارای تابع توزیع نرمال بوده و مستقل از یکدیگر می‌باشند. مشابه مثال‌های قبل پاسخ حاصله از رویکرد پیشنهادی با نتایج حاصله از دو روش سطح پاسخ [۲۶] و روش مبتنی بر بهینه‌سازی به روش اجتماع ذرات [۱۱] مقایسه شده و نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. روش مرتبه اول قابلیت اطمینان نتایج حساسیت را به صورت (۰,۹۷ و ۰,۲۵۳) ارائه نموده که بررسی نتایج حاصله بیانگر دقت مناسب الگوریتم پیشنهادی است.

۴-۱-۳- قاب فولادی تحت نیروی هارمونیک

یک قاب فولادی یک طبقه به ارتفاع ۴ متر و میرایی ۵٪ تحت نیروی هارمونیک $P(t) = 1000 \sin \omega t$ قرار گرفته است. تیر فوقانی قاب به صورت صلب فرض شده و ستون-ها از نوع INP۲۰ در نظر گرفته شده است. برای قاب مورد نظر، متغیرهای تصادفی مطابق مقادیر ارائه شده در جدول (۵) و تشکیل مفصل پلاستیک در ستون‌ها به عنوان تابع شرایط حدی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. نتایج قابلیت اطمینان مثال (۱)

| روش | نقطه با بیشترین احتمال وقوع | نتایج آنالیز حساسیت | شاخص قابلیت اطمینان | احتمال خرابی |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|--------------|
| Kiureghian and Dakessian [۲۴] | (-۲,۷۴۱ و ۰,۹۶۵) | (۰,۹۳۴ و ۰,۳۵۶) | ۲,۹۰۶ | ۰,۰۰۱۸۳ |
| جستجوی نقطه طراحی با روش PSO [۱۴] | (-۲,۷۴۱۶۳ و ۰,۹۶۲۵۷۷) | (۰,۹۳۴۹ و ۰,۳۵۶) | ۲,۹۰۵۶ | ۰,۰۰۱۸۳ |
| الگوریتم پیشنهادی | (-۲,۷۴۱۵ و ۰,۹۶۳۴) | (۰,۹۳۴۷ و ۰,۳۵۵) | ۲,۹۰۵۶ | ۰,۰۰۱۸۳ |

جدول ۲. نتایج قابلیت اطمینان مثال (۲)

| روش | نقطه با بیشترین احتمال وقوع | نتایج آنالیز حساسیت | شاخص قابلیت اطمینان | احتمال خرابی |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|--------------|
| Kim and Na [۲۵] | - | - | ۲,۶۶۸ | ۰,۰۰۳۸۲ |
| شبیه‌سازی مونت کارلو [۲۵] | - | - | ۲,۶۸۵ | ۰,۰۰۳۶۳ |
| جستجوی نقطه طراحی با روش PSO [۱۴] | (-۲,۵۴۷۷۶ و ۰,۹۲۳۵۵) | (۰,۹۳۸ و ۰,۳۴۵) | ۲,۷۰۹۹ | ۰,۰۰۳۳۷ |
| الگوریتم پیشنهادی | (-۲,۵۴۷۸ و ۰,۹۲۳۶) | (۰,۹۳۸ و ۰,۳۴۵) | ۲,۷۱ | ۰,۰۰۳۳۶۴ |

جدول ۳. پارامترهای آماری متغیرهای مثال (۳)

| متغیر | میانگین | پارامترهای آماری | |
|-------|---------|------------------|----------------|
| | | انحراف معیار | ضریب تغییرات % |
| X_1 | ۰,۰۰۱ | ۰,۰۰۰۲ | ۲۰ |
| X_2 | ۲۵۰ | ۳۷,۵ | ۱۵ |

جدول ۴. نتایج قابلیت اطمینان مثال (۳)

| روش | نقطه با بیشترین احتمال وقوع | نتایج آنالیز حساسیت | شاخص قابلیت اطمینان | احتمال خرابی |
|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|--------------|
| روش سطح پاسخ [۲۶] | (۰,۰۰۱۱۱۷۲ و ۱۶۵,۸۸۷۵) | (۰,۱۷ و ۰,۹۸) | ۲,۳۱۸ | ۰,۰۱۰۲۲۵ |
| جستجوی نقطه طراحی با روش PSO [۱۴] | (۰,۰۰۱۱۱۸۹۲ و ۱۶۵,۴۳۷۲۳) | (۰,۱۷۳ و ۰,۹۸) | ۲,۳۳۰۹ | ۰,۰۰۹۸۷۹ |
| الگوریتم پیشنهادی | (۰,۰۰۱۱۱۲۵۱۴ و ۱۶۵,۷۸۸۲) | (۰,۱۶۲ و ۰,۹۸۶) | ۲,۳۳۱ | ۰,۰۰۹۸۷۶ |

جدول ۵. پارامترهای آماری متغیرهای مثال (۴)

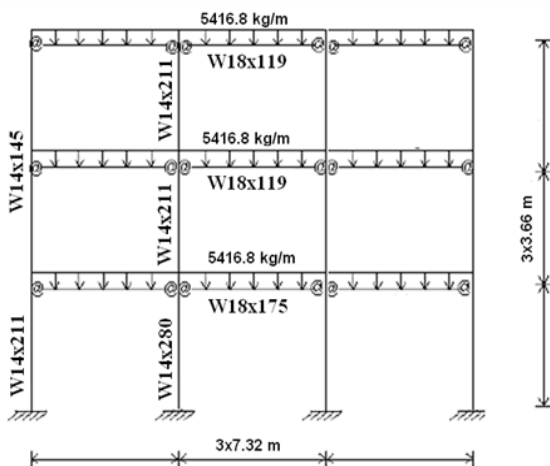
| متغیر | تابع چگالی احتمال | پارامترهای آماری | |
|----------------|-------------------|-------------------|----------------|
| | | میانگین | ضریب تغییرات % |
| W | نرمال | ۵۰,۰۰۰ | ۲۰ |
| E | لوگ نرمال | $۲,۱ \times 10^6$ | ۵ |
| P(t) | لوگ نرمال | ۱۰۰۰ | ۲۰ |
| I | لوگ نرمال | ۲۱۴۰ | ۱۰ |
| ξ | لوگ نرمال | ۰,۰۵ | ۱۰ |
| Z | لوگ نرمال | ۲۴۹ | ۱۰ |
| F _y | لوگ نرمال | ۲۴۰۰ | ۵ |

۴- معرفی سازه مورد بررسی در تحقیق

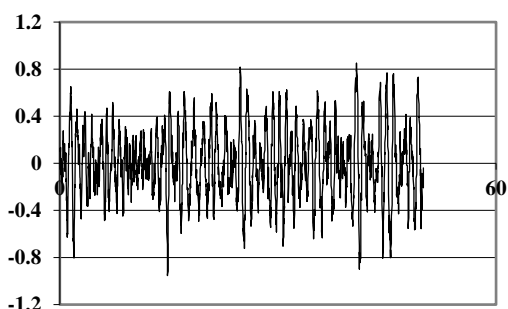
مطابق شکل (۲)، قاب مورد بررسی یک قاب سه طبقه بوده که تیرها و ستون‌های آن به ترتیب از فولادی با حد تسلیم ۲۵۰۰ و ۳۴۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع ساخته شده‌اند. همچنین ضریب استهلاک قاب ۰,۵٪، دهانه و ارتفاع قاب نیز به ترتیب برابر ۷/۳۲ و ۳/۶۶ متر در نظر گرفته شده است. به منظور اعمال بار لرزه‌ای، یک شتاب نگاشت مصنوعی بر اساس روش احتمالاتی اغتشاش سفید فیلتر شده به سازه اعمال شده است. این شتاب نگاشت با در بر داشتن چندین فرکانس متفاوت، می‌تواند پاسخ سازه را طی یک لرزه با دوام زیاد و فرکانسی نزدیک به فرکانس سازه نمایان سازد. برای این منظور از روش فیلتر اصلاح شده نگاراجیاح و نراسیمحان [۲۸] استفاده شده که در حوزه S به صورت رابطه زیر ارائه شده است.

$$F(s) = \frac{4\xi_g \omega_g S}{S^2 + 2\xi_g \omega_g S + \omega_g^2} \quad (17)$$

که در آن ξ_g و ω_g به ترتیب مقادیر استهلاک زمین و فرکانس هستند [۲۷ و ۲۸]. شتاب نگاشت مذکور در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲. قاب سه طبقه مورد بررسی



شکل ۳. شتاب نگاشت مصنوعی احتمالاتی تولید شده با استفاده از روش اغتشاش سفید

۴-۱- متغیرهای تصادفی و تابع شرایط حدی

مسئله

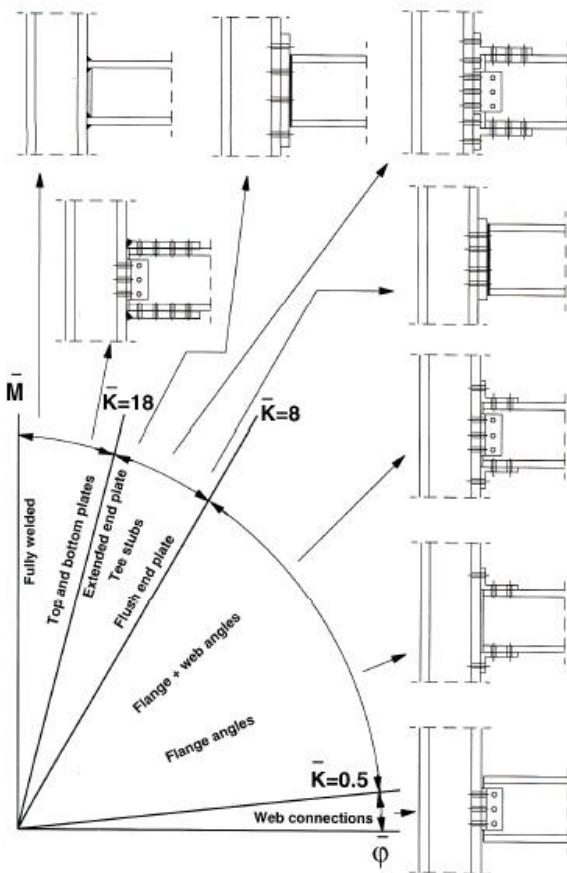
اغلب اتصالاتی که در طراحی به عنوان اتصال صلب در نظر گرفته می‌شوند، در عمل به صورت نیمه صلب عمل کرده، سبب می‌شوند رفتار نهایی سازه طی زمین لرزه‌ها مطابق طرح پیش‌بینی شده نباشد [۲۹]. این عامل می‌تواند پی‌آمد مشکلات اجرا و یا ماهیت ذاتی عملکرد اتصال به دلیل شکل هندسی آن باشد. بر اساس معیار تقسیم بندی اتصالات نیمه صلب آئین نامه اروپا، نسبت تعریف شده سختی برای هر اتصال مطابق فرمول زیر تعریف می‌شود:

$$K = \frac{K_i L}{(EI_b)} \quad (18)$$

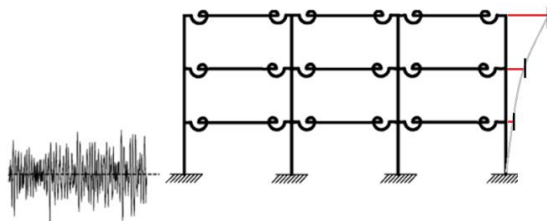
در رابطه فوق، پارامترهای L ، E و I_b به ترتیب طول، مدول الاستیسیته و ممان اینرسی تیر و K_i ضریب تعیین کننده صلبیت می باشد [۳۰]. در این تقسیم بندی، تنها در حالتیکه ضریب K_i اتصال برابر ۲۵ باشد می‌توان انتظار داشت اتصال، تمامی لنگر وارده از تیر را به ستون منتقل کند. بدین ترتیب مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود برخی از اتصالاتی که هم اکنون به عنوان اتصال صلب شناخته شده و در حال استفاده هستند اغلب لنگر وارده را به صورت کامل منتقل نکرده و حتی با توجه به هندسه اتصال، می‌توان برخی از آنها را در ردیف اتصالات نیمه صلب قرار داد.

در این مثال با در نظر گرفتن مشکلات اجرا و موضوع فوق، رفتار اتصال به عنوان یک متغیر تصادفی در قاب‌های خمشی در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۲ با توجه به آنکه از دو نوع پروفیل به عنوان تیر برای قاب سه طبقه مذکور استفاده شده است، مقادیر سختی K^1 برای طبقه اول و K^2 برای طبقات بالایی، به عنوان متغیرهای تصادفی مساله در نظر گرفته شده‌اند. در کنار دو مقدار سختی عنوان شده، وزن سازه (W)، مدول الاستیسیته (E) و دامنه شتاب ورودی (M_{Acc}) نیز به عنوان متغیرهای تصادفی تاثیرگذار سازه لحاظ می‌شوند.

خصوصیات آماری این متغیرها در جدول (۶) ارائه شده است.



شکل ۴. تقسیم بندی سختی اتصال متناسب با نوع اجرا [۳۰]



شکل ۵. تغییر مکان بیشینه طبقات تحت شتاب مصنوعی

جدول ۶. پارامترهای مربوط به متغیرهای تصادفی

| متغیر | تابع چگالی احتمال | پارامترهای آماری | |
|-----------|-------------------|-------------------|--------------|
| | | میانگین | ضریب تغییرات |
| $K1$ | لوگ نرمال | $0.19 K_{b1}$ | ۰.۱ |
| $K2$ | لوگ نرمال | $0.19 K_{b2}$ | ۰.۱ |
| W | نرمال | ۲۸۸۷ | ۰.۱۵ |
| M_{Acc} | نرمال | $0.14g$ | ۰.۰۸ |
| E | نرمال | 2.1×10^6 | ۰.۱۲ |

ارائه پاسخ برای مسئله ناتوان بوده است، لیکن برآورد پاسخ با استفاده از روش‌های فرااکتشافی بجای روش گزاردانی در فضای کاهش یافته امکان‌پذیر بوده که نتیجه آن در جدول مزبور ارائه شده است. مشاهده می‌شود احتمال خرابی ارائه شده توسط الگوریتم پیشنهادی با بکارگیری تنها ۴۱۷ نمونه با جواب حاصله از روش مونت کارلو با تعداد ۲۰۰,۰۰۰ نمونه مطابقت دارد. ضمن آنکه الگوریتم پیشنهادی نقطه با بیشترین احتمال خرابی را نیز جهت استخراج نتایج حساسیت ارائه نموده است.

نکته قابل توجه در جدول ۷ تخمین غیر ایمن روش‌های مرتبه اول از احتمال خرابی قاب خمشی مورد مطالعه است. مشاهده می‌شود که شاخص قابلیت اطمینان تخمین زده شده در این روش‌ها بیشتر از مقدار واقعی شاخص قابلیت اطمینان قاب است. دلیل آن محدب بودن تابع شرایط حدی می‌باشد. روش‌های مرتبه اول با خطی در نظر گرفتن تابع شرایط حدی در نقطه طراحی، از انحنای موجود تابع صرف‌نظر می‌کنند که این امر سبب می‌شود احتمال خرابی برای مسائل غیرخطی نظیر مساله حاضر به صورت تقریبی ارائه گردد. به منظور برآورد نتایج آنالیز حساسیت، محتمل‌ترین حالت خرابی قاب که به کمک رابطه ۳ محاسبه شده در رابطه ۱۲ بکار گرفته شده است. برای این منظور از نقطه $(0.88, 0.88, 3572, 0.41, 1896417)$ که از الگوریتم پیشنهادی به عنوان محتمل‌ترین حالت خرابی محاسبه شده به عنوان ورودی در رابطه ۱۲ به کار گرفته شده و متعاقباً نتایج حساسیت برابر با $(0.47, 0.47, 0.68, 0.14, 0.27)$ محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده اثر زیاد اتصالات بر احتمال خرابی قاب است به گونه‌ای که پس از بار وارد شده بر سازه بیشترین اثر را بر مقدار ایمنی سازه داشته است.

با در نظر گرفتن متغیرهای تعریف شده فوق، قابلیت اطمینان و محتمل‌ترین حالت خرابی سازه تحت ارتعاشات تصادفی وارده از شتاب مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور با اعمال شتاب نگاشت معرفی شده به سازه، بیشترین جابجایی هر طبقه طی آنالیزهای مختلف محاسبه شده است. سپس مقادیر جابجایی نسبی طبقات طی هر مرحله با مقدار مجاز مقایسه و تجاوز از مقادیر آئین نامه، به معنی خرابی سازه در نظر گرفته شده است. مطابق توضیحات فوق و شکل ۵ تابع شرایط حدی برای سازه مورد بررسی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$G(X) = \Delta_{all} - \Delta_d, \quad (19)$$

$$\Delta_d = drift.st = \frac{D.st_{Max}}{H}$$

که در آن $G(X)$ بیانگر تابع شرایط حدی مسئله، Δ_{all} مقدار جابجایی نسبی مجاز و Δ_d جابجایی نسبی محاسبه شده طبقه و برابر نسبت بیشترین تغییرمکان نسبی محاسبه شده طبقه از هر آنالیز ($D.st_{Max}$) به ارتفاع آن طبقه (H) می‌باشد.

۲-۴- نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان قاب مورد

بررسی

در تحقیق حاضر تحلیل سازه‌ای قاب مورد نظر توسط نرم‌افزار مبتنی بر اجزای محدود Drain-۲DX انجام گرفته و الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در محیط نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شده است. نتایج تحلیل سازه حاصل از برنامه Drain-۲DX به صورت فایل متنی ارائه می‌شود که با استفاده قابلیت نرم‌افزار Matlab در اجرای فایل‌های اجرایی و خواندن فایل‌های متنی، ارتباط میان دو برنامه جهت حصول پاسخ برقرار شده است.

جدول ۷ نتایج حاصله از ارزیابی قابلیت اطمینان را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی و روش‌های متداول قابلیت اطمینان نمایش می‌دهد. قابل ذکر است که روش مرتبه اول قابلیت اطمینان ارائه شده توسط هاسوفر و لیند از

جدول ۷. مقایسه دقت نتایج الگوریتم پیشنهادی و روش‌های متداول قابلیت اطمینان

| روش هاسوفر و لیند | روش جستجوی فرااکتشافی مبتنی بر روش مرتبه اول | روش پیشنهادی | شبیه‌سازی مونت کارلو | روش مورد استفاده |
|-------------------|--|--------------|----------------------|-----------------------|
| - | ۰,۰۰۶۸ | ۰,۰۲۷ | ۰,۰۲۷ | احتمال خرابی |
| - | ۲,۴۷ | ۲,۰۴ | ۲,۰۴ | شاخص قابلیت اطمینان |
| - | ۱۲۰۰ | ۴۱۷ | ۲۰۰,۰۰۰ | تعداد انجام تحلیل قاب |

۵- نتیجه‌گیری

برآورد احتمال خرابی در روش شبیه‌سازی وزنی مبتنی بر تخصیص وزن به نمونه‌های تولید شده در بازه‌هایی معین است. در مقاله حاضر از الگوریتم بهینه‌ساز کرم شب‌تاب و تابع پایه شعاعی جهت توانمندسازی و کاهش محاسبات در روش شبیه‌سازی وزنی استفاده و یک الگوریتم ترکیبی برای این منظور ارائه شد. روش بهینه‌ساز کرم شب‌تاب توانایی ارائه نقاط بهینه موضعی را دارد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از این ویژگی برای یافتن نقاط محتمل موضعی و دقت در وزن‌دهی به نمونه‌ها استفاده نموده است زیرا این نقاط بیشترین اثر را در برآورد صحیح احتمال خرابی در روش شبیه‌سازی وزنی دارند. برای این منظور از ایده به هنگام کردن تابع درون‌یاب بر اساس موقعیت بهترین مشاهدات در الگوریتم بهینه‌ساز استفاده شده است. روش درون‌یابی تابع پایه شعاعی که جهت

کاهش حجم محاسبات استفاده شده علیرغم سادگی و محاسبات کمی که نیاز داشته، نتایج مطلوبی را جهت تخمین تابع شرایط حدى از خود نشان داده است. الگوریتم پیشنهادی جهت برآورد نتایج قابلیت اطمینان و آنالیز حساسیت یک قاب خمشی فلزی بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که روش‌های مرتبه اول قابلیت اطمینان در مقایسه با روش‌های شبیه‌سازی احتمال خرابی را کمتر از احتمال خرابی واقعی قاب ارائه می‌دهند و بنابراین نتیجه حاصله از این روش‌ها برای برآورد ایمنی قاب‌ها قابل اطمینان نیست. همچنین در بررسی نتایج حساسیت پارامترهای تصادفی مورد استفاده در آنالیز قاب مشخص شد که اثر صلبیت اتصالات پس از مقدار بار وارد شده به سازه بیشترین اثر را در ایمنی این قاب‌ها دارا است. این نتایج در مقاوم‌سازی این نوع قاب‌ها به منظور افزایش ایمنی با حداقل هزینه بسیار موثر خواهد بود.

مراجع

- [1] لطف‌اللهی یقین؛ محمد علی؛ نگین؛ مسعود؛ "مطالعه اثر انحنای اولیه تصادفی اعضا بر قابلیت اعتماد قاب های فولادی"، مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس، دوره دهم (۴)، ۱۳۸۹، ۶۹-۵۷.
- [2] Nowak, A.S., Collins, K.R. (2000). "Reliability of Structures". New York: McGraw-Hill.
- [3] Hasofer, A.M., Lind, N.C. (1974). "Exact and invariant second-moment code format". Engrg Mech Division ASCE; Vol. 100, Page. 111-121.
- [4] Rahman, S., Wei, D. (2006). "A univariate approximation at most probable point for higher-order reliability analysis". Solids and Structures, Vol. 43, Page. 2820-2839.
- [5] Choi, S.K., Grandhi, R.V., Canfield, R.A. (2007). "Reliability-based Structural Design". London, Springer.
- [6] Ibrahim, Y. (1991). "Observations on applications of importance sampling in structural reliability analysis". Structural Safety, Vol. 9, Page. 269-281.
- [7] Zio, E., Pedroni, N. (2010). "An optimized Line Sampling method for the estimation of the failure probability of nuclear passive systems". Reliability Engineering & System Safety, Vol. 95 (12), Page. 1300-1313.
- [8] Angelis, M., Patelli, E., Beer, M. (2015). "Advanced Line Sampling for efficient robust reliability analysis". Structural Safety, Vol. 52, Page. 170-182.
- [9] Miao, F., Ghosn, M. (2011). "Modified subset simulation method for reliability analysis of structural systems". Structural Safety, Vol. 33, Page. 251-260.

- [10] Li, H.S., Ma, Y.Z., Cao, Z. (2015). "A generalized Subset Simulation approach for estimating small failure probabilities of multiple stochastic responses". *Computers & Structures*, Vol. 153, Page. 239-251.
- [11] Elegbede, C. (2005). "Structural reliability assessment based on particles swarm optimization". *Structural Safety*, Vol. 27, Page. 171-186.
- [12] Zuev, K.M., Katafygiotis, L.S. (2011). "The horseracing simulation algorithm for evaluation of small failure probabilities". *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 26, Page, 157-164.
- [13] Cheng, j., Li, Q.S. (2008). "Reliability analysis of structures using artificial neural network based genetic algorithms". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 197, Page, 3742-3750.
- [14] Schueremans, L., Van Gemert, D. (2005). "Benefit of splines and neural networks in simulation based structural reliability analysis". *Structural Safety*, Vol. 27, Page. 246-261.
- [15] Allaix, D.L., Carbone, V.I. (2011). "An improvement of the response surface method". *Structural Safety*, Vol. 33, Page. 165-172.
- [16] Zhang, J., Chen, H.Z., Huang, H.W., Luo, Z. (2015). "Efficient response surface method for practical geotechnical reliability analysis". *Computers & Geotechnics*, Vol. 69, Page. 496-505.
- [17] Elhewy A.H., Mesbahi, E., Pu, Y. (2006). "Reliability analysis of structures using neural network method". *Probabilistic Engineering Mechanics*. Vol. 21(1), Page. 44-53.
- [18] Kaymaz, I. (2005). "Application of Kriging method to structural reliability problems". *Structural Safety*, Vol. 27(2), Page. 133-151.
- [19] Gavin, H.P., Yau, S.C. (2008). "High-order limit state functions in the response surface method for structural reliability analysis". *Structural Safety*, Vol. 30(2), Page, 162-179.
- [20] Rashki, M. Miri, M. Azhdary Moghaddam, M. (2012). "A new efficient simulation method to approximate the probability of failure and most probable point". *Structural Safety*, Vol. 39, Page. 22-29.
- [۲۱] راشکی، م. میری، م. اژدری‌مقدم، م. (۱۳۹۳). "ارائه روشی جهت رتبه بندی اهمیت و تاثیر متغیرهای تصادفی بر احتمال خرابی سازه‌ها". *روش‌های عددی در مهندسی*، سال ۳۳، شماره ۲.
- [22] Yang, X.S. (2008). "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms". Luniver Press, UK.
- [۲۳] فورگی‌نژاد، ا. امیرآبادی، ح. خلیلی، خ. (۱۳۹۳). "مدل سازی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی با شبکه عصبی و بهینه سازی آن با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب". *مجله مدل سازی در مهندسی*، سال ۱۲، شماره ۷۳.
- [24] Kiureghian, A.D., Dakessian. T. (1998). "Multiple design points in structural reliability". *Structural safety and reliability*, Rotterdam, Balkema.
- [25] Kim, S.H., Na, S.W. (1997) "Response surface method using vector projected sampling point". *Structural Safety*, Vol. 19(1), Page. 3-19.
- [26] Gayton, N., Bourinet, J.M., Lemaire, M. (2003). "CQ2RS: a new statistical approach to the response surface method for reliability analysis". *Structural Safety*, Vol. 25(1), Page. 99-121.
- [27] Rofooei, F.R., Aghababaii Mobarake, A., Ahmadi, G. (2001). "Generation of artificial earthquake records with a nonstationary Kanai Tajimi model". *Engineering Structures*, Vol. 23, Page. 827-837.
- [28] Nagarajaiah, S., Narasimhan, S. (2006). "Smart base-isolated benchmark building part II: phase I, sample controllers for linear isolation". *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 13, Page. 589-604.
- [29] Kartal, M.E., Basaga, H.B., Bayraktar, A., Muvafik, M. (2010). "Effects of Semi-Rigid Connection on Structural Responses". *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 17(10).
- [30] Mazzolani, F., Piluso V. (1996). "Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames". CRC Press.