

تحلیل دینامیکی ناخطی سازه قاب پرتال در فضای عدم قطعیت

فرزاد شهبابیان*¹ و جواد علامتیان²

¹دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

²استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه عمران، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: 1388/01/29، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: 1390/07/27، تاریخ تصویب: 1390/10/24)

چکیده

وجود عدم قطعیت در هر یک از قسمت‌های تحلیل سازه مانند ویژگی‌های مواد، هندسه سازه، بارگذاری و الگوهای تحلیلی سبب دور شدن نتیجه‌ها از مقادیر واقعی می‌گردد. یک راهکار عملی برای حل این مشکل انجام تحلیل احتمال اندیشانه و شبیه‌سازی رفتار سازه در اثر این عدم قطعیت‌ها می‌باشد. در این شیوه‌ها از روش‌های آماری برای شبیه‌سازی کمیت‌هایی که دارای عدم قطعیت می‌باشند، استفاده می‌گردد. در این مقاله، تحلیل دینامیکی ناخطی احتمال اندیشانه برای سازه‌ی قاب پرتال انجام می‌پذیرد. کمیت‌های دارای عدم قطعیت شامل جرم حجمی، ضریب کشسانی و ابعاد و اندازه‌های مقطع عضو می‌باشند. برای شبیه‌سازی این عامل‌ها از روش مونت- کارلو استفاده می‌شود. شبیه‌سازی هر کمیت با سه نوع تابع چگالی احتمال مختلف و هر کدام با سه مقدار متفاوت ضریب پراکندگی انجام می‌پذیرد. تحلیل دینامیکی قاب برای هر نمونه‌ی شبیه‌سازی شده با شیوه‌های عددی انجام می‌شود و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در این رهگذر، حساسیت پاسخ بیشینه سازه به ضرایب پراکندگی و نوع تابع چگالی احتمال متغیرهای ورودی مشخص می‌شود و احتمال خرابی سازه در حالت‌های مختلف تعیین می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل دینامیکی ناخطی، تحلیل احتمال اندیشانه، روش مونت کارلو، قاب پرتال

مقدمه

کرد. ارگونال [3] مدلی را برای کاهش خسارات ناشی از زمین لرزه ارائه کرد که در آن ماهیت متغیرهای تأثیرگذار به صورت غیر قطعی در نظر گرفته شدند. چو و همکاران [4] با انجام تحلیل احتمال اندیشانه، تغییرمکان جانبی قاب‌های با ستون‌های بتنی را که در معرض خوردگی قرار داشتند، محاسبه کرد.

روش‌های احتمال اندیشانه را می‌توان در دو گروه دسته‌بندی کرد. در نخستین گروه، ویژگی‌های آماری پاسخ، از فرآیندهای شبیه‌سازی به‌دست می‌آیند. متداول‌ترین روش، فرایند شبیه‌سازی مونت-کارلو می‌باشد [5 - 7]. این شیوه بر پایه‌ی تولید پاسخ سازه به‌صورت عددی استوار است. با افزایش شمار درجه‌های آزادی سازه و نیز تعداد عامل‌های دارای عدم قطعیت، محاسبات این روش به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد.

در گروه دوم روش‌های تحلیل عدم قطعیت سازه‌ها، ویژگی‌های آماری پاسخ، از رابطه‌سازی تحلیل بر اساس متغیرهای تصادفی به‌دست می‌آیند. به‌عنوان نمونه، می‌توان واریانس، انحراف معیار و دیگر ویژگی‌های آماری پاسخ را از رابطه‌های بنیادی تحلیل اجزای محدود حساب

به دلیل وجود عدم قطعیت‌های فراوان در سازه‌ها، دانش قابلیت اطمینان کاربرد گسترده‌ای در فرآیندهای تحلیل و طراحی دارد. تحلیل قابلیت اطمینان سازه‌ها راه را برای شناخت اثر متغیرهای تصادفی موجود در بارها (استاتیکی و دینامیکی)، ویژگی‌های مواد، هندسه سازه، ابعاد و اندازه‌های مقطع و الگوهای تحلیل و طراحی هموار می‌سازد. در سال‌های اخیر، مطالعه‌ی سازه‌ها در فضای عدم قطعیت ناشی از تصادفی بودن ویژگی مواد، بارگذاری، هندسه و ... مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [1 و 2]. اهمیت این‌گونه مطالعات بیشتر از پژوهش‌هایی می‌باشد که از طبیعت آماری ویژگی‌های سازه چشم‌پوشی می‌کنند. اگر عدم قطعیت ناشی از داده‌ها، مبهم یا ناکافی باشد، آنگاه تحلیل یقین اندیشانه به‌کار می‌رود. در مقابل، اگر امکان تعیین ویژگی‌های آماری کمیت‌های دارای عدم قطعیت وجود داشته باشد، تحلیل احتمال اندیشانه مناسب‌ترین انتخاب است. کارهای انجام شده در این زمینه بسیار گسترده است. پائولا [1] روش کارایی را در تحلیل احتمال اندیشانه سازه‌های خریاگونه که دارای مشخصات تصادفی بودند، پیشنهاد

این راه قاب پرتال و فرآیند تحلیل آن برای نشان دادن کارایی روش انتخاب شده است. در نتیجه، می توان دیگر سازه ها را نیز با الگوی مشابه بررسی نمود.

تحلیل دینامیکی ناخطی به روش تابع اولیه گیری تخمین- تصحیح مرتبه ی بالا

بارهای وارد به سازه در دو گروه ایستا و پویا قرار می گیرند. ویژگی های بارهای ایستا نسبت به زمان ثابت، یا تغییرهای آنها اندک می باشد. بارهای مرده و زنده در این دسته جا دارند. این بارها در تحلیل ایستای سازه ها به کار می روند. در بارگذاری پویا، تغییرهای زمانی بار چشم گیر است و در مدت زمان کوتاهی، بار قابل توجهی به سازه وارد می شود. ضربه، انفجار و زمین لرزه، نمونه هایی از این بارگذاری ها می باشند. این بارها، سبب ایجاد سرعت و شتاب در سازه می گردند. مالش گره ها در اثر حرکت نسبی، نیروهای میرایی را پدید می آورند. شتاب سازه نیروهای جرمی را به دنبال دارد. راهکارهای گوناگونی برای نوشتن رابطه ی حرکت وجود دارد. قانون دوم نیوتن، اصل همیلتون و اصل کار مجازی نمونه هایی از این روش ها می باشند. با بهره جستن از میرایی لزجی، رابطه ی حرکت در لحظه ی t^{n+1} به صورت زیر خواهد بود:

$$[M]^{n+1} \{\ddot{D}\}^{n+1} + [C]^{n+1} \{\dot{D}\}^{n+1} + \{f(D^{n+1})\} = \{P(t^{n+1})\} \quad (1)$$

در اینجا، $[M]^{n+1}$ ، $[C]^{n+1}$ ، $\{\ddot{D}\}^{n+1}$ ، $\{\dot{D}\}^{n+1}$ ، $\{f(D^{n+1})\}$ و $\{P(t^{n+1})\}$ به ترتیب، ماتریس های جرم، میرایی و بردارهای شتاب، سرعت، تغییر مکان گرهی، نیروی داخلی و بار خارجی در لحظه ی t^{n+1} می باشند. پاسخ های رابطه ی حرکت با روش های عددی یا تحلیلی به دست می آیند. در راهکارهای تحلیلی، پاسخ دقیق معادله ی حرکت در دسترس قرار می گیرد. این شیوه ها توانایی محدود دارند و تنها برای سازه های یک درجه آزادی خطی، با بارگذاری ویژه، به کار می روند. در برابر اینها، روش های عددی در سامانه های خطی و ناخطی، با درجه های آزادی نامحدود و بارگذاری کلی استفاده می شوند. این راهکارها بر پایه ی تابع اولیه گیری عددی معادله ی حرکت استوار می باشند. بنابراین، پاسخ های آنها تقریبی است. دقت پاسخ ها، به نوع

کرد [8]. روش های آشفتگی [9]، شیوه ی بسط نیومن [10]، روش حالت تغییر شکل تقریبی عمده (APDM) و راهکار حالت تغییر شکل دقیق (EPDM) [11] نمونه هایی از این فرایندها می باشند.

روش کار انجام شده در این مقاله، در دسته بندی گروه نخست تحلیل احتمال اندیشانه سازه ها قرار دارد. به سخن دیگر، ویژگی های آماری پاسخ تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه ها با شبیه سازی این فرایندها انجام می پذیرد.

کمیت های دارای عدم قطعیت شامل جرم حجمی، ضریب کشسانی، ابعاد و اندازه های مقطع عضو می باشند. برای شبیه سازی این عامل ها از روش مونت- کارلو استفاده می شود. شبیه سازی هر کمیت با سه نوع تابع چگالی احتمال یکنواخت، نرمال و لگ نرمال و هر کدام با سه مقدار ضریب پراکندگی 5٪، 10٪ و 15٪ انجام می پذیرد. تحلیل دینامیکی ناخطی قاب برای هر نمونه ی شبیه سازی شده با شیوه های عددی انجام می گیرد. با مقایسه نتایج حاصل با یکدیگر، حساسیت پاسخ بیشینه سازه نسبت به ضرایب پراکندگی و نوع تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی مشخص می شود. از مقایسه نتایج تحلیل احتمال اندیشانه با نتایج تحلیل یقین اندیشانه که در آن میانگین مقدار متغیرهای تصادفی مبنای محاسبات قرار می گیرد، احتمال خرابی سازه برآورد می گردد.

باید دانست، شیوه به کار رفته در این مقاله برای تحلیل قابلیت اطمینان دینامیکی سازه ها، افزایش زمان محاسبات را به دنبال خواهد داشت. برای برطرف نمودن این کاستی و کاهش زمان تحلیل های دینامیکی، از شیوه های تخمین- تصحیح مرتبه بالا استفاده می شود. این روش کارایی بالایی داشته و سبب می گردد بتوان تحلیل قابلیت اطمینان دینامیکی سازه ها را با روش شبیه سازی مونت کارلو انجام داد.

همچنین، قاب پرتال تحلیل شده تنها یک الگوی سازه ای متداول می باشد که برای بررسی اثر عدم قطعیت ها به کار رفته است. نویسندگان بر آن بوده اند که نشان دهند، تحلیل دینامیکی تا چه اندازه نسبت به عدم قطعیت های گوناگون حساسیت دارد. روشن است، تکرار این فرآیند برای دیگر سازه ها نیز شدنی است و محدودیتی از این نظر وجود ندارد. یکی از هدف های این مقاله نیز فراهم آوردن بستر مناسبی برای تحلیل احتمالاتی سازه ها در حالت دینامیکی می باشد، که در

در اینجا، Δt و $\{\ddot{D}\}^{n-i}$ ، به ترتیب، گام زمانی تحلیل دینامیکی و بردار شتاب گام زمانی $n-i$ می باشد که پیش از این حساب شده است. سپس، تخمین های سرعت و تغییر مکان در رابطه ی (1) قرار داده می شوند و شتاب گام زمانی $n+1$ ($\{\ddot{D}\}^{n+1}$) با حل یک سامانه ی معادله های خطی به دست می آید. در ادامه، تغییر مکان و سرعت گام زمانی $n+1$ از رابطه های ضمنی (4) و (5) تصحیح می شوند:

$$\{D\}^{n+1} = \{D\}^n + \Delta t \{\dot{D}\}^n + \left(\frac{1}{2} - \sum_{i=0}^{OOA-1} \xi_i\right) \Delta t^2 \{\ddot{D}\}^n + \xi_0 \Delta t^2 \{\ddot{D}\}^{n+1} + \Delta t^2 \sum_{i=1}^{OOA-1} \xi_i \{\ddot{D}\}^{n-i} \quad (4)$$

$$\{\dot{D}\}^{n+1} = \{\dot{D}\}^n + \left(1 - \sum_{i=0}^{OOA-1} \eta_i\right) \Delta t \{\ddot{D}\}^n + \eta_0 \Delta t \{\ddot{D}\}^{n+1} + \Delta t \sum_{i=1}^{OOA-1} \eta_i \{\ddot{D}\}^{n-i} \quad (5)$$

در رابطه های (2)، (3)، (4) و (5)، کمیت های ξ_i و η_i ، عامل های وزنی بردار شتاب گام $n-i$ ، در رابطه های تغییر مکان و سرعت صریح و ضمنی می باشند که دقت پایداری تابع اولیه را می سنجند. مرتبه ی دقت تابع اولیه نیز OOA است. با انتخاب مرتبه ی دقت 6 (روش PC-6)، عامل های وزنی بهینه به دست می آیند [12].

برای راستی آزمایی روش تحلیل دینامیکی و برنامه ی رایانه ای، نوسانگر میله و فنر در نظر گرفته می شود. این سامانه از یک میله ی سنگین به جرم m و طول L که در دو سر به دو بلوک متصل است و در صفحه ی افق حرکت می کند، تشکیل شده است. بلوک پایینی با فنر به سختی S نگهداری می شود و در موقعیت شکل 1، دستگاه در حالت تعادل قرار دارد ($\theta_0 = 60^\circ$). با چشم پوشی از مالش و اثر دادن تغییر مکان نخستین به بلوک ها و رها کردن آنها، معادله ی نوسان سامانه به صورت زیر به دست می آید [13].

$$\ddot{D} + \frac{\sin \theta_0}{L \cos^2 \theta_0} \dot{D}^2 + \frac{3S \cos^2 \theta_0}{m} D = 0$$

$$D(t=0) = D_0 \quad \dot{D}(t=0) = 0 \quad (6)$$

و دقت تابع اولیه بستگی دارد. در تابع اولیه گیری عددی، تابع تقریبی را برای تغییر مکان، سرعت یا شتاب می پذیرند. با جایگذاری این رابطه ها در معادله ی حرکت و حل آن، پاسخ به دست می آید. هزینه ی تحلیل، به ویژگی های تابع اولیه وابسته است. هدف این مقاله انجام تحلیل دینامیکی ناخطی می باشد. بنابراین، روش های عددی به کار می روند.

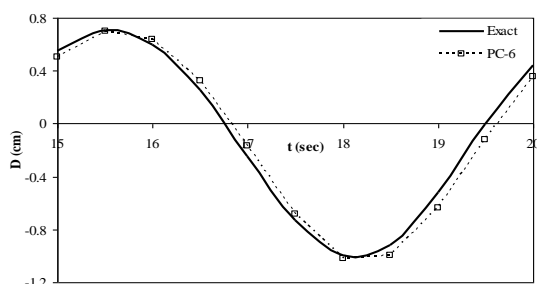
راهکارهای عددی تحلیل دینامیکی با گسسته سازی زمان انجام می پذیرند. در این شیوه ها، دامنه به شمار محدودی گام زمانی تقسیم می شود و پاسخ های هر نمو، از تابع اولیه گیری گام به گام معادله ی (1) به دست می آیند. یادآوری می کند، راهکارهای تابع اولیه گیری عددی در دو گروه صریح و ضمنی جا دارند. باید توجه داشت که روش های صریح و ضمنی در حالت کلی به یکدیگر تبدیل می شوند. این کار با انتخاب عامل های تابع اولیه انجام می پذیرد. همچنین، پاره ای از راهکارهای عددی تحلیل دینامیکی با ترکیب فن های صریح و ضمنی به دست می آیند. این روش ها با نام فرآیندهای تخمین-تصحیح شناخته می شوند. روش های مزبور، سادگی و هزینه ی پایین فن های صریح و دقت فرآیندهای ضمنی را همزمان دارند. این الگوها، با تخمین پاسخ ها از روش های صریح آغاز می گردند. با بهره جستن از رابطه های فن های ضمنی، تخمین ها تصحیح می شوند. فرآیند تصحیح، تا دستیابی به پاسخ های مناسب ادامه می یابد. روش های تخمین-تصحیح تنها با عملگرهای برداری پیش می روند و به دلیل استفاده از رابطه های ضمنی، دقت پاسخ ها مناسب خواهد بود. در این مقاله، از فرآیند تابع اولیه گیری تخمین-تصحیح مرتبه ی بالا استفاده می شود [12].

در این شیوه، تخمین های سرعت و تغییر مکان از رابطه های زیر به دست می آیند:

$$\{D\}^{n+1} = \{D\}^n + \Delta t \{\dot{D}\}^n + \left(\frac{1}{2} - \sum_{i=0}^{OOA-1} \xi_i\right) \Delta t^2 \{\ddot{D}\}^n + \Delta t^2 \sum_{i=1}^{OOA-1} \xi_i \{\ddot{D}\}^{n-i} \quad (2)$$

$$\{\dot{D}\}^{n+1} = \{\dot{D}\}^n + \left(1 - \sum_{i=0}^{OOA-1} \eta_i\right) \Delta t \{\ddot{D}\}^n + \Delta t \sum_{i=1}^{OOA-1} \eta_i \{\ddot{D}\}^{n-i} \quad (3)$$

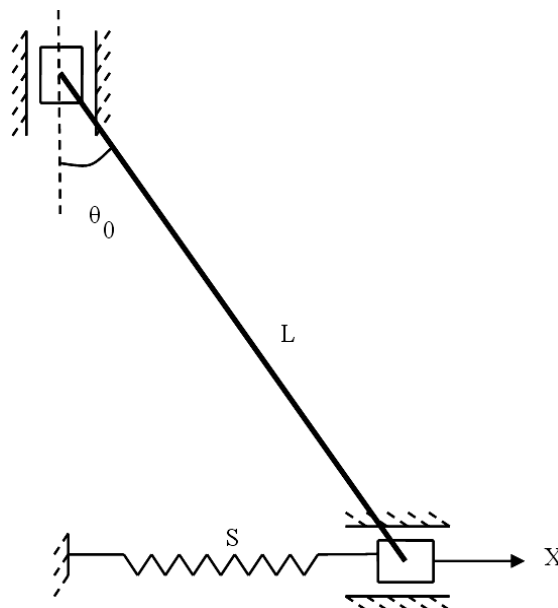
ناخطی دارد. بنابراین، برنامه‌ی رایانه‌ای تهیه شده و روش تخمین- تصحیح به کار رفته در آن دارای دقت مناسب می‌باشد.



شکل 2: نمودارهای تغییر مکان- زمان دستگاه میله و فنر با گام زمانی 0/5 ثانیه.

عدم قطعیت‌ها در تحلیل دینامیکی

تحلیل سازه باید رفتار واقعی را در یک راهکار عملی نشان دهد. وجود عدم قطعیت در هر یک از قسمت‌های تحلیل مانند ویژگی‌های مواد، ابعاد، هندسه‌ی سازه، بارگذاری و الگوهای تحلیلی سبب دور شدن نتیجه‌ها از مقادیر واقعی می‌گردد. به‌سختی دیگر، با تغییر هر یک از این کمیت‌ها، پاسخ سازه دگرگون می‌شود. اثر این عدم قطعیت‌ها را می‌توان با دانش قابلیت اعتماد سامانه‌ها بررسی کرد. تحلیل قابلیت اعتماد برای ارزیابی احتمال عدم کارایی هر یک از مجموعه‌های تابع‌های کارایی به کار می‌رود. بسیاری از ویژگی‌های سازه دارای مقادیرهای یقین‌اندیشانه نمی‌باشند. به‌عنوان نمونه، خواص مواد از آزمایش تعداد محدودی نمونه در شرایط استاندارد به دست آمده‌اند. حال آنکه، تعیین ویژگی‌های مواد مصرفی برای هر عضو یا سازه، به‌صورت جداگانه دشوار و پرهزینه است. یک راهکار عملی برای حل این مشکل انجام تحلیل احتمال اندیشانه و شبیه‌سازی رفتار سازه در اثر این عدم قطعیت‌ها می‌باشد. در این شیوه‌ها از روش‌های آماری برای شبیه‌سازی کمیت‌هایی که دارای عدم قطعیت می‌باشند، استفاده می‌گردد. در ادامه، تحلیل با هر یک از مقادیرهای شبیه‌سازی شده، به‌صورت جداگانه انجام می‌پذیرد. به‌سختی دیگر، نتیجه‌های تحلیل به تعداد شبیه‌سازی‌ها در دسترس قرار می‌گیرد. اکنون، می‌توان اثر عدم قطعیت پنداشتی را در پاسخ سازه بررسی کرد و احتمال عدم کارایی (خرابی) سازه را در اثر این عدم قطعیت مشخص نمود.



شکل 1: دستگاه میله و فنر.

این نوسان ناخطی است و پاسخ دقیق آن با کوچک پنداشتن $\sin\theta_0/L\cos^2\theta_0$ ، از روش‌های آشفتگی به صورت زیر حساب می‌شود [13]:

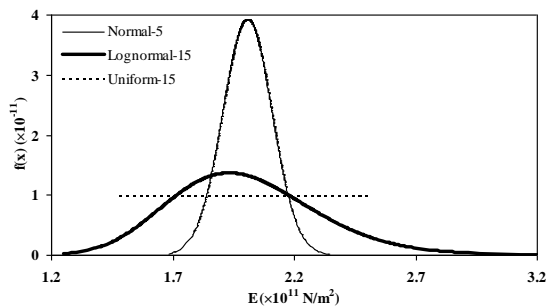
$$D(t) = D_0 \cos(\omega t) + \frac{D_0^2 \sin \theta}{6L(\cos \theta)^2} [4\cos(\omega t) - 3 - \cos(2\omega t)] + \frac{D_0^2}{3} \left[\frac{\sin \theta}{L(\cos \theta)^2} \right]^2 \left[\frac{61}{24} \cos(\omega t) - \frac{2}{3} \cos(2\omega t) + \frac{1}{8} \cos(3\omega t) - 2 \right] \quad (7)$$

در اینجا، ω با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$\omega^2 = \frac{9S(\cos \theta)^2}{m \left[3 + \left(\frac{\sin \theta}{L(\cos \theta)^2} \right)^2 D_0^2 \right]} \quad (8)$$

تحلیل عددی با روش تخمین- تصحیح مرتبه‌ی 6 (PC-6) و برنامه‌ی رایانه‌ای تهیه شده انجام می‌پذیرد. برای انجام این کار، گام زمانی 0/5 ثانیه به کار می‌رود. همچنین، طول میله، سختی فنر و جرم متمرکز، به ترتیب، $1/75134 \text{ N}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ و $3/50268 \text{ N}/\text{cm}$ ، $25/4 \text{ cm}$ فرض می‌شوند. شکل 2 نمودارهای تغییر مکان- زمان لحظه‌های 15 تا 20 ثانیه را برای پاسخ دقیق و روش تخمین- تصحیح (PC-6) نشان می‌دهند. آشکار است، تحلیل دینامیکی عددی (PC-6) دقت مناسبی در تخمین پاسخ نوسان‌های

از سوی دیگر، در این کار پژوهشی، که سازه در حالت دینامیکی تحلیل می شود، زمان و حجم محاسبات به عنوان یک محدودیت می باشد و با افزایش تعداد نمونه ها، زمان تحلیل افزایش می یابد. به عبارت دیگر، برای هر متغیر غیرقطعی با یک توزیع خاص (نرمال، لگ نرمال و یکنواخت) و سه ضریب پراکندگی مختلف (5٪، 10٪ و 15٪)، هر بار هزار نمونه شبیه سازی انجام می شود و با هر نمونه یک بار سازه تحلیل می گردد (در جمع 9000 بار تحلیل غیرخطی دینامیکی). در نتیجه برای جلوگیری افزایش چشمگیر زمان و حجم محاسبات و نیز امکان اجرای برنامه تهیه شده در محیط فرترن، تعداد 1000 نمونه شبیه سازی شده برای هر متغیر غیرقطعی انتخاب گردید.



شکل 3: نمودار تابع چگالی احتمال (PDF) برای نمونه های شبیه سازی شده ی ضریب کشسانی.

تحلیل دینامیکی ناخطی احتمال اندیشانه

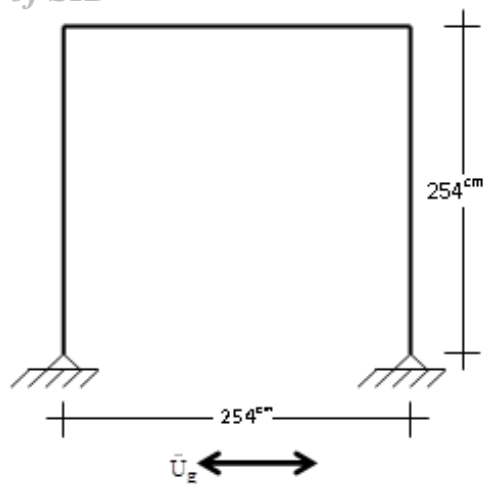
برای انجام تحلیل، یک قاب پرتال به صورت شکل 4 در نظر گرفته می شود. این قاب با فرض رفتار غیرخطی هندسی تحلیل می گردد. رابطه سازی تحلیل با روش اجزای محدود در مختصات همچرخشی انجام می پذیرد. این جزء توسط فلیپا رابطه سازی شده است [14]. در نظر گرفتن اثرهای غیرخطی مواد، می تواند مبنایی برای انجام پژوهش های آینده در قالب کارهای جدید باشد. باید دانست، در تحلیل این قاب سه جزء به کار می رود. همچنین، قاب هشت درجه ی آزادی (چهار دوران در چهار گره، دو تغییر مکان افقی و دو تغییر مکان عمودی در گره های بالای قاب) دارد. این قاب از فولاد با ضریب کشسانی 2×10^{11} نیوتن بر مترمربع ساخته شده است. جرم حجمی عضوهای قاب پنج برابر جرم حجمی فولاد

هدف این مقاله بررسی تأثیر عدم قطعیت های مواد و ابعاد مقطع در تحلیل دینامیکی سازه ها می باشد. به سخن دیگر، ویژگی های مواد شامل جرم حجمی و ضریب کشسانی و نیز ابعاد و اندازه های مقطع عضوها دارای عدم قطعیت پنداشته می شوند. با شبیه سازی جداگانه ی هر یک از این کمیت ها توسط روش مونت-کارلو، اثر آنها در تحلیل دینامیکی سازه ها بررسی می گردد.

شبیه سازی با روش مونت-کارلو

روش مونت-کارلو فن عددی تولید نتیجه های یک پدیده، بدون انجام آزمایش فیزیکی می باشد. برای انجام این کار، می توان از نتیجه های آزمایش های پیشین و یا دیگر داده های عددی همسان بهره جست. به سخن دیگر، روش مونت-کارلو آزمایشی است که به جای انجام آزمایشگاه، توسط رایانه اجرا می شود. در این مقاله، تحلیل مونت-کارلو برای شبیه سازی عامل های دارای عدم قطعیت استفاده می گردد. این عامل ها شامل، جرم حجمی، ضریب کشسانی و ابعاد و اندازه های مقطع عضو (طول و عرض مقطع) می باشند. شبیه سازی هر کمیت با سه توزیع یکنواخت، نرمال و لگ نرمال انجام می پذیرد. تولید نمونه ها برای هر نوع تابع چگالی احتمال با سه ضریب پراکندگی 5٪، 10٪ و 15٪ انجام می شود. در هر فرایند مونت-کارلو (یک توزیع و یک ضریب پراکندگی)، 1000 نمونه شبیه سازی می شوند. شبیه سازی نمونه ها با استفاده از تابع های کتابخانه ای نرم افزار فرترن انجام می پذیرد. تابع کتابخانه ای به کار رفته DRNLNL می باشد. به عنوان مثال نمودار تابع چگالی احتمال¹ (PDF) برای نمونه های شبیه سازی شده ی ضریب کشسانی در شکل 3 نشان داده شده است.

نخستین ملاک نویسندگان برای انتخاب 1000 نمونه شبیه سازی شده این است که این نمونه ها بتوانند توزیع انتخابی برای متغیرهای غیرقطعی (نرمال، لگ نرمال یا یکنواخت) را با دقت مناسب ارائه دهند. از آنجا که در این مقاله، تولید نمونه ها با استفاده از تابع کتابخانه ای DRNLNL در نرم افزار فرترن انجام شده است، با تولید تعداد 1000 نمونه شبیه سازی شده، تابع چگالی احتمال نمونه های تولید شده به گونه مناسبی ارائه شده است (به عنوان نمونه شکل 3).



شکل 4: قاب پرتال برای تحلیل دینامیکی ناخطی در اثر شتاب پایهی السنترو.

شایان توجه است، در این مقاله، همه متغیرهای تصادفی همزمان در تحلیل دینامیکی وارد می شوند. دلیل این موضوع این است که در حالت واقعی، نمی توان عدم قطعیتها را تنها به یک عامل نسبت داد و دیگر کمیتها را قطعی و یقین اندیشانه پنداشت. در نتیجه، همه کمیتهایی که در طبیعت آنها عدم قطعیت وجود دارد، در نظر گرفته می شوند. به سخن دیگر، قطعی پنداشتن یک کمیت و وارد نمودن همه عدم قطعیتها در یک کمیت خاص نمی تواند بیانگر ویژگیها و شرایط واقعی سازهها باشد.

این قاب دارای بارگذاری دینامیکی در اثر شتاب پایهی السنترو است. برای انجام این کار، 5 ثانیهی نخست از شتاب پایهی السنترو به قاب وارد می شود. دلیل این موضوع، پدید آمدن بیشینه شتاب پایهی زلزله در بازه زمانی 0-5 ثانیه می باشد. نمودار شتاب پایه این زلزله در شکل 5 نشان داده شده است. باید دانست، برای تحلیل دینامیکی از روش عددی تخمین-تصحیح مرتبهی شش (PC-6)، استفاده می شود. شایان توجه است در این روش، معادله های غیرخطی همزمان با انجام تحلیل دینامیکی حل می شوند. به سخن دیگر، همزمان با تحلیل دینامیکی، اثرهای غیرخطی نیز در فرآیند محاسبات وارد می شوند و نیاز به الگوریتم جداگانه ای نمی باشد.

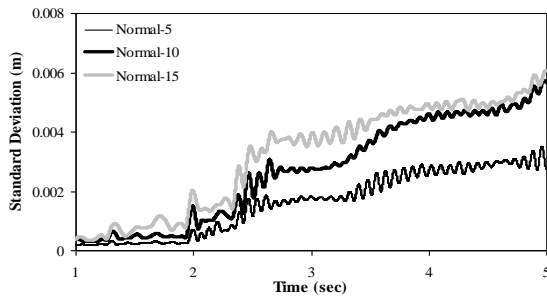
برای انجام این کار، نویسندگان یک برنامه رایانه ای در نرم افزار فرترن نوشته اند. گام زمانی در این تحلیلها 0/0005 ثانیه می باشد. دلیل اصلی انتخاب این گام زمانی

می باشد. به سخن دیگر، جرم حجمی عضوهای قاب 39500 کیلوگرم بر مترمکعب فرض می گردد. دلیل این پنداشت در نظر گرفتن اثر جرم کفها، تاولها و دیگر جرمهای اضافی در تحلیل دینامیکی می باشد. به سخن دیگر، با استفاده از این روش می توان اثر بارهای مرده و زنده را در پاسخ دینامیکی سازه وارد کرد، چراکه بارهای مرده و زنده منشأ وزنی دارند و باعث افزایش جرم سازه می شوند.

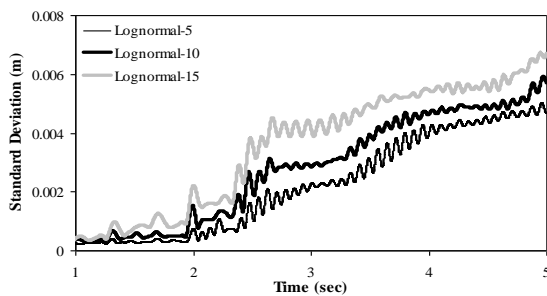
شایان توجه است، هدف این پژوهش، تحلیل احتمالاتی رفتار دینامیکی سازه ناشی از غیرقطعی بودن ویژگیهای هندسی و مواد سازه، مستقل از نوع بارگذاری، است. انتخاب زمین لرزه به عنوان بارگذاری دینامیکی برای واقعی تر شدن موضوع مورد بحث می باشد. روشن است، در نظر گرفتن سایر عوامل ایجاد کننده عدم قطعیت مانند بارهای وارد بر سازه، طول عضوها، شرایط تکیه گاهی و ... نیز می تواند به عنوان یک کار مستقل، مورد توجه قرار گیرد. هدف این پژوهش بستر سازی مناسب برای بررسی حساسیت پاسخ دینامیکی سازه در فضای عدم قطعیت می باشد. همچنین، نشان داده می شود برای یک تحلیل کارآ و همه جانبه، با لحاظ کردن تمهیدات مربوط به ایمنی سازه، لازم است افزون بر تحلیلهای موجود، تحلیل احتمالاتی نیز مورد توجه قرار گیرد. به سخن دیگر، در نظر گرفتن هر عدم قطعیت دیگری نیز با فرآیند مشابهی شدنی است.

باید دانست، ماتریس جرم سازه سازگار می باشد و براساس الگوی ماتریس جرم عضو قابی برپا می شود [15]. همچنین، برای الگوسازی رفتار یک سازه واقعی که میرایی آن ناچیز می باشد، تحلیل قاب پرتال در حالت نامیرا انجام می پذیرد.

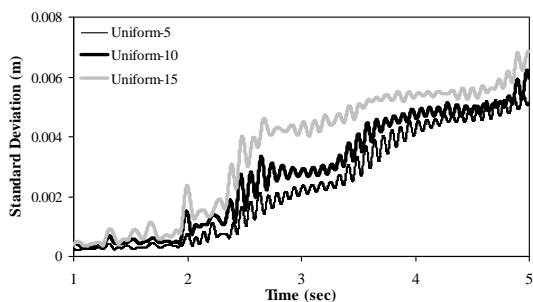
از سوی دیگر، تیرها و ستونهای قاب از یک مقطع همسان ساخته شده اند. این مقطع مستطیل شکل بوده و عرض و ارتفاع آن به ترتیب، 0/1 متر و 0/3 متر می باشند. باید افزود، مقادیر عددی ارائه شده برای ضریب کشسانی، جرم حجمی و ابعاد مقطع، همان مقادیرهای میانگین این کمیتها می باشند.



شکل 6: انحراف معیار تغییر مکان بالای قاب در توزیع نرمال.



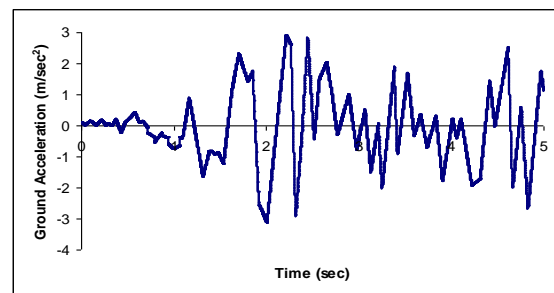
شکل 7: انحراف معیار تغییر مکان بالای قاب در توزیع لگنرمال.



شکل 8: انحراف معیار تغییر مکان بالای قاب در توزیع یکنواخت.

هر نقطه از نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های 6، 7 و 8 مربوط به یک گام زمانی 0/0005 ثانیه‌ای است و در هر بار تحلیل، 10000 نمو زمانی وجود دارد. در هر گام زمانی، انحراف معیار مربوط به پاسخ‌های حاصل از 1000 بار تحلیل انجام شده محاسبه می‌گردد. با داشتن مقدار انحراف معیار پاسخ سازه در هر گام زمانی، برای هر نوع توزیع از حالت‌های 9 گانه، می‌توان نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های 6، 7 و 8 را تهیه کرد. با استفاده از این نمودارها می‌توان انحراف معیار پاسخ سازه در هر گام زمانی را پیش بینی نمود. همچنین می‌توان مقادیر بیشینه انحراف معیار پاسخ سازه را در هر حالت تعیین

کوچک در تحلیل دینامیکی، افزایش دقت روش عددی تخمین- تصحیح PC-6 در کنار حفظ پایداری آن می‌باشد، چراکه در غیر این صورت، خطاهای عددی تحلیل دینامیکی نیز به خطاهای شبیه‌سازی نمونه‌ها افزوده شده و نمی‌توان نتیجه‌گیری مناسبی از فرآیند تحلیل قابلیت اطمینان داشت [12]. با توجه به در نظر گرفتن پنج ثانیه‌ی نخست زلزله‌ی السنترو و نیز گام زمانی 0/0005 ثانیه‌ای، در هر تحلیل 10000 نمو زمانی وجود دارد و در هر نمو، تغییر مکان‌های قاب حساب می‌شوند. بنابراین، نمودار تغییر مکان- زمان قاب با دقت مناسب به دست می‌آید.



شکل 5: شتاب پایه‌ی السنترو برای تحلیل دینامیکی قاب پرتال.

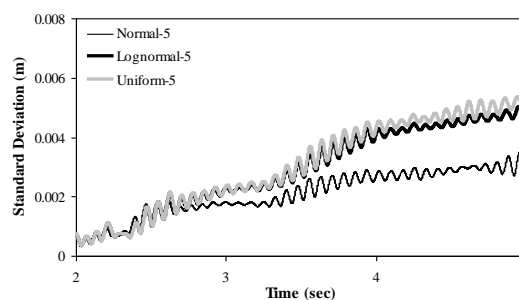
شبیه‌سازی مونت-کارلو برای چهار عامل ضریب کشسانی، جرم حجمی، عرض و ارتفاع مقطع عضوها انجام می‌پذیرد. به عنوان نمونه، اگر کمیت‌ها دارای توزیع نرمال فرض شوند، هزار نمونه برای ضریب کشسانی، جرم حجمی، عرض و ارتفاع مقطع به دست می‌آید. در این حالت، هزار بار سازه تحلیل دینامیکی می‌شود و در هر تحلیل یکی از نمونه‌های تولید شده به کار می‌رود. فرآیند مشابهی برای توزیع‌های یکنواخت و لگنرمال تکرار می‌گردد.

شکل‌های 6، 7 و 8 انحراف معیار تغییر مکان افقی بالای قاب را به ترتیب برای توزیع‌های نرمال، لگنرمال و یکنواخت نشان می‌دهند.

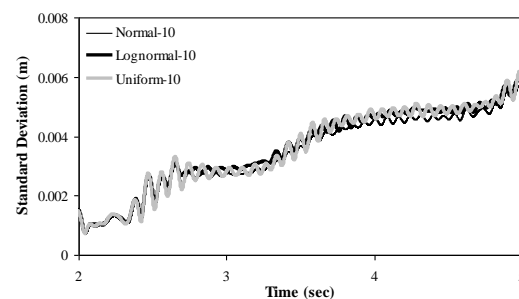
همانطور که در شکل‌های 9، 10 و 11 دیده می‌شود، انحراف معیار در دو حالت لگ نرمال و یکنواخت بیشتر از حالت نرمال می‌باشد. البته این اختلاف ناچیز است و از ثانیه 3 به بعد خود را نشان می‌دهد. با استفاده از نمودارهای فوق، مقدار انحراف معیار پاسخ سازه در هر حالت تحلیل احتمال اندیشانه و در هر گام زمانی تعیین می‌گردد. توجه به این نکته ضروری است که با داشتن نمودارهایی از این قبیل، کاستی موجود در تحلیل یقین اندیشانه که در آن از جنبه‌های آماری متغیرهای تأثیرگذار بر پاسخ سازه صرف‌نظر می‌شود، جبران می‌گردد. به عبارت دیگر، با استفاده از نمودارهای فوق می‌توان با استخراج مقدار انحراف معیار پاسخ سازه، قابلیت اطمینان سازه را در هر بازه دلخواه زمانی، پیش بینی و ایمنی سازه را در فضای عدم قطعیت برآورد نمود.

اکنون، سنجش نتیجه‌های تحلیل از یک جنبه دیگر انجام می‌پذیرد. در این مقاله، هزار نمونه برای عامل‌های دارای عدم قطعیت شبیه‌سازی شد. بنابراین، در هر لحظه‌ی زمانی، هزار پاسخ از تحلیل سازه برای توزیع‌ها با ضریب‌های پراکندگی گوناگون به‌دست آمده‌است. به عنوان نمونه، اگر توزیع نرمال با ضریب پراکندگی 5٪ در نظر گرفته شود، در لحظه‌ی زمانی t ، هزار پاسخ برای تغییرمکان افقی بالای قاب حساب می‌گردد. اکنون، بیشینه مقدار مطلق از میان این هزار پاسخ مشخص می‌شود. چنانچه، این فرایند برای دیگر لحظه‌های زمانی تحلیل ($0 \leq t \leq 5$ sec) تکرار گردد، نمودار پاسخ بیشینه‌ی تغییرمکان افقی بالای قاب، برای توزیع نرمال با پراکندگی 5٪ به‌دست می‌آید. این شیوه را می‌توان برای دیگر توزیع‌های با ضریب‌های پراکندگی گوناگون به‌کاربرد. شکل‌های 12، 13 و 14 نمودارهای بیشینه پاسخ تغییرمکان افقی بالای قاب را در ثانیه‌ی پایانی تحلیل ($4 \leq t \leq 5$ sec)، به ترتیب برای توزیع‌های نرمال، لگ‌نرمال و یکنواخت نشان می‌دهند. برای فراهم کردن امکان بررسی نتایج دو تحلیل احتمال اندیشانه و یقین اندیشانه در این شکل‌ها، نمودار پاسخ Mean از تحلیل سازه با مقدارهای میانگین عامل‌های دارای عدم قطعیت (ضریب کشسانی 2×10^{11} نیوتن بر مترمربع، جرم حجمی عضوها 39500 کیلوگرم بر مترمکعب، عرض مقطع 0/1 متر و ارتفاع مقطع 0/3 متر)، به‌دست آمده‌است. نمودار

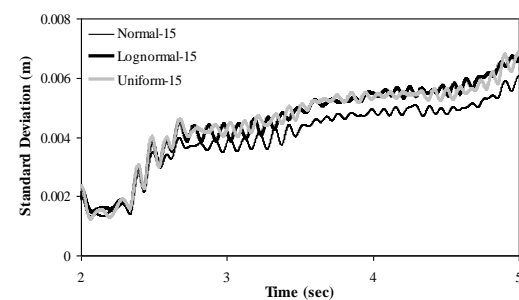
کرد. به عنوان مثال بیشینه انحراف معیار در توزیع‌های مختلف در حدود 0.007 متر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در هر نوع توزیع احتمال با افزایش ضریب پراکندگی، انحراف معیار افزایش یافته‌است. از جمله، در ثانیه 4 افزایش مقدار انحراف معیار پاسخ سازه برای توزیع نرمال با ضریب پراکندگی 10٪ نسبت به 5٪ بیش از 100٪ می‌باشد. برای سنجش اثر توزیع‌های آماری، نمودار انحراف معیار برای حالت‌های گوناگون، بطور همزمان رسم می‌شوند. شکل‌های 9، 10 و 11 نمودارهای انحراف معیار را به ترتیب برای ضریب‌های پراکندگی 5٪، 10٪ و 15٪ نشان می‌دهند.



شکل 9: انحراف معیار تغییرمکان بالای قاب با ضریب تغییرات 5٪.



شکل 10: انحراف معیار تغییرمکان بالای قاب با ضریب تغییرات 10٪.



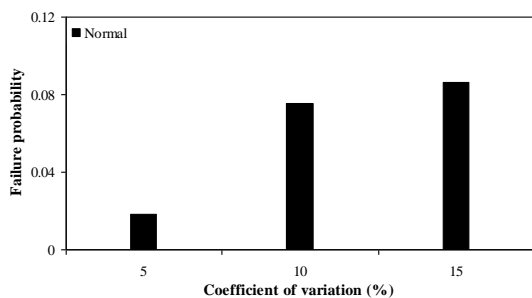
شکل 11: انحراف معیار تغییرمکان بالای قاب با ضریب تغییرات 15٪.

اندیشانه را برای بررسی دقیق و همه جانبه رفتار سازه در فضای واقعی که همان فضای عدم قطعیت است، تأکید می‌کند.

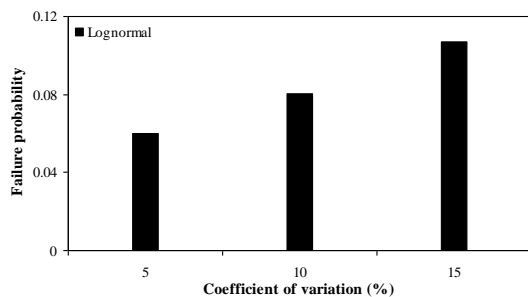
اگر احتمال خرابی سازه به صورت امکان افزایش تغییر مکانهای غیر قطعی از تغییر مکان محاسبه شده در حالت یقین اندیشانه تعریف گردد، آنگاه احتمال خرابی سازه به روش مونت کارلو، از رابطه (9) بدست می‌آید:

$$p_f = \frac{n}{N} \quad (9)$$

در این رابطه N تعداد کل پاسخ سازه و n تعدادی از پاسخ‌هاست که مقدار آنها از حد مجاز که در این مقاله مقدار میانگین در نظر گرفته می‌شود، بیشتر می‌گردد. باید دانست، سنجش جابجایی یکی از مهمترین معیارهای ارزیابی عملکرد سازه‌هاست. هدف این مقاله نشان دادن اثرپذیری این معیار از عوامل دارای عدم قطعیت می‌باشد. در این راستا، منظور از واژه خرابی، احتمال افزایش تغییر مکان سازه نسبت به سطح عملکرد مطلوب می‌باشد. شایان توجه است، می‌توان معیارهای دیگری را نیز در نظر گرفت و به عنوان ملاک خرابی معرفی نمود. بدین ترتیب، پس از بررسی نتایج حاصل از تحلیل، احتمال خرابی سازه محاسبه می‌شود. شکل‌های 15، 16 و 17 احتمال خرابی سازه را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهند.

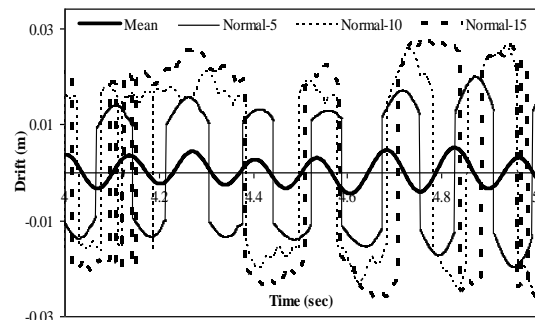


شکل 15: احتمال خرابی سازه در توزیع نرمال.

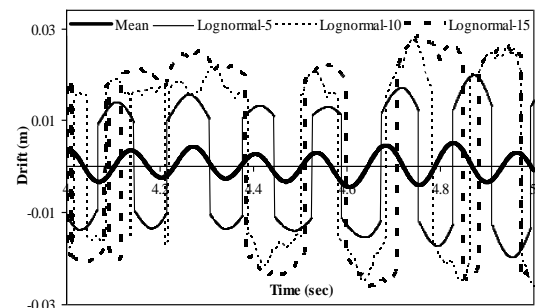


شکل 16: احتمال خرابی سازه در توزیع لگ نرمال.

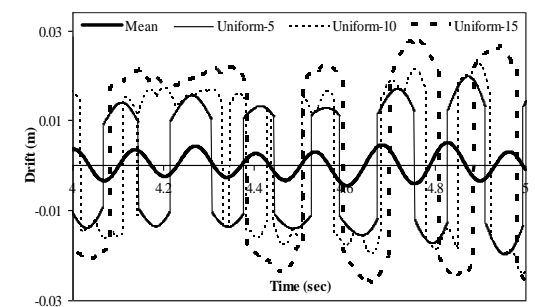
پاسخ Mean به عنوان نتیجه تحلیل یقین اندیشانه پنداشته می‌شود.



شکل 12: بیشینه پاسخ تغییر مکان افقی بالای قاب برای توزیع نرمال.

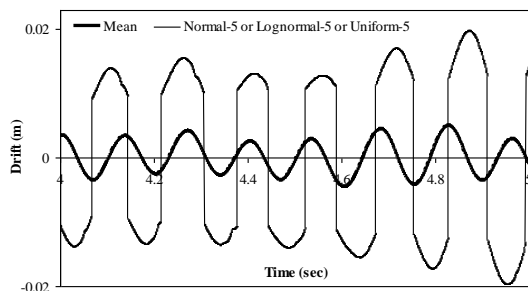


شکل 13: بیشینه پاسخ تغییر مکان افقی بالای قاب برای توزیع لگ نرمال.

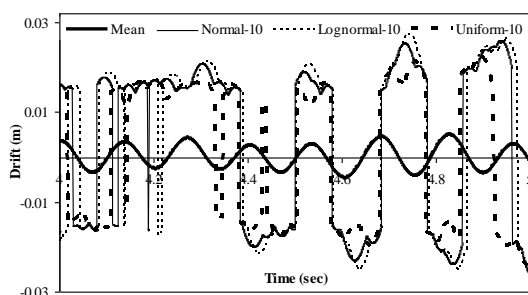


شکل 14: بیشینه پاسخ تغییر مکان افقی بالای قاب برای توزیع یکنواخت.

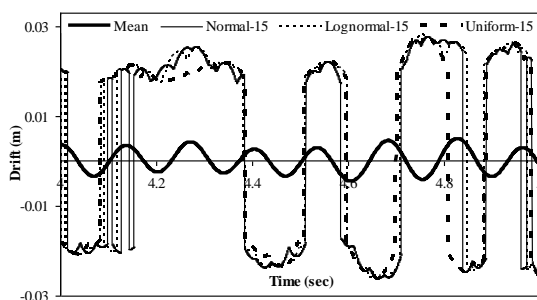
همان‌طور که در شکل‌های 12، 13 و 14 دیده می‌شود اختلاف پاسخ بیشینه در حالت احتمال اندیشانه با حالت یقین اندیشانه رایج که در آن میانگین مقادیر مشخصات سازه بدون توجه به جنبه‌های آماری مبنای محاسبات قرار می‌گیرد، با زیاد شدن ضریب پراکندگی افزایش می‌یابد. این حقیقت لزوم انجام تحلیل احتمال



شکل 19: تغییر مکان افقی بیشینه‌ی بالای قاب با ضریب پراکندگی 5٪.

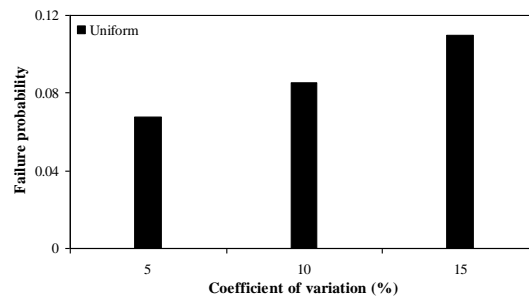


شکل 20: تغییر مکان افقی بیشینه‌ی بالای قاب با ضریب پراکندگی 10٪.



شکل 21: تغییر مکان افقی بیشینه‌ی بالای قاب با ضریب پراکندگی 15٪.

شکل 19 نشان می‌دهد، که پاسخ‌های همه‌ی توزیع‌ها با ضریب پراکندگی 5٪ (نرمال، لگ‌نرمال و یکنواخت)، یکسان می‌باشند. در نتیجه، تابع‌های چگالی مختلف برای ضریب‌های پراکندگی کوچک عملکرد یکسانی دارند. از سوی دیگر، با افزایش ضریب پراکندگی در شکل‌های 20 و 21، اختلاف بین مقادیر میانگین تغییر مکان افقی بالای قاب که حاصل تحلیل یقین‌اندیشانه است با مقادیر بیشینه که نتیجه رویکردی احتمال‌اندیشانه در تحلیل سازه می‌باشد، افزایش می‌یابد و به بیش از 300 درصد می‌رسد. نکته قابل توجه دیگر آن است که این تفاوت

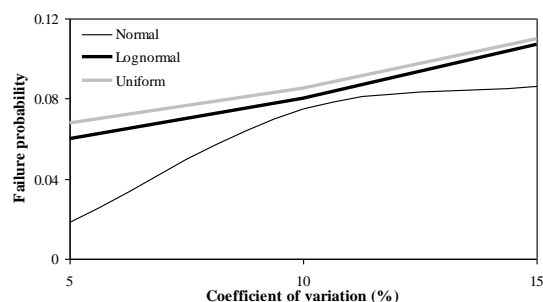


شکل 17: احتمال خرابی سازه در توزیع یکنواخت.

در شکل‌های 15، 16 و 17 دیده می‌شود که احتمال افزایش پاسخ‌های بیشینه سازه در حالت احتمال‌اندیشانه با افزایش ضریب پراکندگی نسبت به حالت یقین‌اندیشانه بیشتر می‌گردد. بدین ترتیب چنانچه مقادیر میانگین مینای طراحی سازه قرار گیرند، احتمال خرابی ممکن است تا 11 درصد برسد.

باید دانست، همه احتمال‌های به دست آمده برای خرابی بیشتر از 0.001 می‌باشد. در نتیجه، تعداد 1000 نمونه شبیه‌سازی شده مناسب است.

برای دستیابی به نمونه‌ای از نمودارهای کاربردی که بتوان با سرعت و دقت، احتمال خرابی سازه به معنی برآورده نشدن یک حالت حدی (نظیر تغییر مکان جانبی) را پیش بینی نمود، احتمال خرابی سازه برای توابع چگالی مختلف با ضرایب پراکندگی متفاوت در شکل 18 مقایسه گردیده‌است.



شکل 18: مقایسه‌ی احتمال خرابی سازه در توزیع‌های مختلف.

برای سنجش اثر توزیع‌های آماری، نمودار پاسخ بیشینه برای حالت‌های گوناگون، همزمان رسم می‌شوند. شکل‌های 19، 20 و 21 نمودارهای پاسخ بیشینه را در ثانیه‌ی پایانی تحلیل (sec $4 \leq t \leq 5$)، به ترتیب برای ضریب‌های پراکندگی 5٪، 10٪ و 15٪ نشان می‌دهند.

بررسی نمودارها نشان داد که، انحراف معیار در دو حالت لگ نرمال و یکنواخت اندکی بیشتر از حالت نرمال می‌باشد. با داشتن نمودارهای فوق، کاستی موجود در تحلیل یقین‌اندیشانه که در آن از جنبه‌های آماری متغیرهای تأثیرگذار بر پاسخ سازه صرف‌نظر می‌شود، جبران می‌گردد. به عبارت دیگر، با استفاده از این گونه نمودارها، می‌توان قابلیت اطمینان سازه را در هر بازه دلخواه زمانی، پیش بینی و ایمنی سازه را در فضای عدم قطعیت برآورد نمود.

3- بررسی نمودارهای پاسخ بیشینه سازه نشان می‌دهد که اختلاف بین مقادیر فوق با پاسخ حاصل از تحلیل یقین‌اندیشانه سازه با مقدارهای میانگین عامل‌های تصادفی قابل توجه می‌باشد، به طوری که در بعضی حالت‌ها این اختلاف به بیش از 300٪ رسیده‌است.

4- مقایسه نمودارهای پاسخ بیشینه سازه نشان می‌دهد که اگرچه پاسخ بیشینه سازه با افزایش ضریب پراکندگی افزایش یافته‌است، ولی همزمان با افزایش ضریب پراکندگی، اختلاف بین توزیع‌های آماری کاهش یافته‌است. به عبارت دیگر پاسخ سازه به ضریب پراکندگی بیشتر از نوع توزیع آماری متغیرهای تصادفی، حساس می‌باشد.

5- در این مقاله احتمال خرابی سازه به صورت امکان افزایش تغییر مکان‌های غیر قطعی از مقدار میانگین در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که با افزایش ضریب پراکندگی، احتمال خرابی سازه بیشتر می‌شود و ممکن است تا 11 درصد برسد. البته باید به این نکته توجه داشت که بیشینه تغییر مکان‌ها در حالت اندیشانه ممکن است تا 3 برابر تغییر مکان‌ها در حالت یقین‌اندیشانه باشد. این واقعیت لزوم انجام تحلیل احتمال اندیشانه برای بررسی دقیق و همه‌جانبه رفتار سازه در فضای واقعی که فضای دارای عدم قطعیت است، را تأکید می‌کند.

6- نمودارهای احتمال خرابی ارائه شده در مقاله، احتمال وقوع پاسخ بیش از مقدار میانگین را نشان می‌دهند. می‌توان چنین فرآیندی را برای دیگر معیارها مانند احتمال وقوع پاسخ بیش 1.1 برابر پاسخ میانگین، به عنوان معیار هدف برای تأمین ایمنی سازه در نظر گرفت. به سخن دیگر، احتمال وقوع پاسخ در هر سطح عملکردی مورد انتظار، به روشی مشابه، قابل استخراج

بیشتر از آن که وابسته به نوع تابع چگالی احتمال باشد، به مقدار ضریب پراکندگی وابسته است. به عبارت دیگر مشخص می‌گردد که در فضای عدم قطعیت، پاسخ‌های بیشینه سازه به ضرایب پراکندگی بیشتر از نوع توزیع احتمال حساس می‌باشد. در یک نتیجه‌گیری کاربردی باید افزود که در طراحی سازه‌ها باید به نتایج حاصل از تحلیل احتمال اندیشانه توجه کرد.

نتیجه‌گیری

هدف این مقاله بررسی عدم قطعیت‌های مواد و ابعاد مقطع در تحلیل دینامیکی ناخطی سازه‌ها بود. به‌سختی دیگر، ویژگی‌های مواد شامل جرم حجمی، ضریب کشسانی و نیز ابعاد و اندازه‌های مقطع اعضا دارای عدم قطعیت پنداشته شدند. شبیه‌سازی هر کمیت با سه توزیع یکنواخت، نرمال و لگ‌نرمال با سه ضریب پراکندگی 5٪، 10٪ و 15٪ توسط روش مونت-کارلو انجام پذیرفت. در هر فرایند مونت-کارلو (یک توزیع و یک ضریب پراکندگی)، 1000 نمونه تولید شدند. تحلیل دینامیکی ناخطی برای هر یک از سازه‌های شبیه‌سازی شده، با شیوه‌های عددی انجام و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه گردیدند. برای تحلیل دینامیکی از روش عددی تخمین-تصحیح مرتبه‌ی 6 (PC-6) استفاده شد. با توجه به در نظر گرفتن پنج ثانیه‌ی نخست زلزله‌ی السنترو و نیز گام زمانی 0/0005 ثانیه‌ای، در هر تحلیل 10000 نمو زمانی وجود داشت که در هر یک، تغییر مکان‌های قاب با دقت مناسب محاسبه شدند. نتایج حاصل از تحلیل احتمال اندیشانه دینامیکی ناخطی برای سازه‌ی قاب پرتال عبارتند از:

1- نمودار انحراف معیار تغییر مکان افقی بالای قاب برای هر یک از حالت‌های 9 گانه (سه توزیع با سه ضریب پراکندگی) رسم و ملاحظه گردید که با افزایش مقدار ضریب پراکندگی، انحراف معیار افزایش یافته‌است. به عنوان مثال در ثانیه 4 افزایش مقدار انحراف معیار پاسخ سازه برای توزیع نرمال با ضریب پراکندگی 10٪ نسبت به 5٪ بیش از 100٪ بوده‌است. همچنین مشخص گردید که انحراف معیار در دو حالت لگ نرمال و یکنواخت بیشتر از حالت نرمال می‌باشد.

2- برای سنجش اثر توزیع‌های آماری، نمودار انحراف معیار برای حالت‌های گوناگون، همزمان رسم شدند.

پذیرد و آیین‌نامه‌ها به سمت استفاده از مبانی قابلیت اطمینان و انتخاب معیارهای طراحی بر اساس تمهیدات مربوط به بحث ایمنی سازه‌ها پیش می‌روند.

تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل انجام طرح پژوهشی شماره 7937 در دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. بدین وسیله از پشتیبانی و حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشکده و دانشگاه صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

است. این کار مقدمه‌ای بر روش‌هایی مانند شیوه‌های حالات حدی است که در آن‌ها بر مبنای سطح عملکرد مطلوب و با در نظر گرفتن شاخص‌های ایمنی خاص، ضرایب بار و مقاومت چنان انتخاب می‌شوند که احتمال خرابی سازه در یک محدوده مشخص که مورد نظر پدید آورندگان آیین‌نامه مربوطه می‌باشد، قرار گیرد. روشن است مطالعات انجام شده در این پژوهش، می‌تواند به عنوان بستری مناسب برای اهداف تدوین آیین‌نامه‌ها و به روز کردن آنها استفاده شود، کاری که هم اکنون در رابطه با ارتقاء آیین‌نامه‌های موجود در سطح جهان انجام می‌

مراجع

1. Paola, M. D. (2004). "Probabilistic analysis of truss structures with uncertain parameters." *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 19, PP. 321-329.
2. Li, J. and Chen, J.B. (2008). "The principle of preservation of probability and the generalized density evolution equation", *Structural Safety*, Vol. 30, PP. 65-77.
3. Ergonul, S. (2005). "A probabilistic approach for earthquake loss estimation." *Structural Safety*, Vol. 27, PP. 309-321.
4. Choe, D. E., Gardoni, P., Rosowsky, D. and Hawkaas, T. (2008). "Probabilistic capacity models and seismic fragility estimates for RC columns subject to corrosion." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 93, PP. 383-393.
5. Sciuva, M. D. and Lomario, D. (2003). "A comparison Monte Carlo and FORMs in calculating the reliability of a composite structure." *Composite Structures*, Vol. 59, PP. 155-162.
6. Melchers, R. E. and Ahammed, M. (2004). "A fast approximate method for parameter sensitivity estimation in Monte Carlo structural reliability." *Computers and Structures*, Vol. 82, PP. 51-55.
7. Noh, H. C. and Park, T. (2006). "Monte Carlo simulation-compatible stochastic field for application to expansion-based stochastic finite element method." *Computers and Structures*, Vol. 84, PP. 2363-2372.
8. Stefanou, G. and Papadrakakis, M. (2004). "Stochastic finite element analysis of shells with combined random material and geometric properties." *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 193, PP. 139-160.
9. Van den Nieuwenhof, B. and Coyette, J. P. (2003). "Modal approaches for the stochastic finite element analysis of structures with material and geometric uncertainties." *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 192, PP. 3705-3729.
10. Lei, Z. and Qiu, C. (2000). "Neumann dynamic stochastic finite element method of vibration for structures with stochastic parameters to random excitation." *Computers and Structures*, Vol. (77), PP. 651-657.
11. Falsone, G. and Ferro, G. (2007). "An exact solution for the static and dynamic analysis of FE discretized uncertain structures." *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 196, PP. 2390-2400.
12. Rezaiee-Pajand, M. and Alamatian, J. (2008). "Numerical time integration for dynamic analysis using new higher order predictor-corrector method." *Journal of Engineering Computations*, Vol. 25 (6), PP. 541-568.
13. Anvoner, S., (1970). *Solution of Problems in Mechanics of Machines-I*, Pitman Paperbacks, London.
14. Felippa, C.A., (1999). *Nonlinear Finite Element Methods*, <http://www.colorado.edu/courses.d/nfemd/>.
15. Paz, M., (1979). *Structural Dynamics: Theory and Computation*, McGraw Hill, New York.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Probability Density Function