

## بررسی احتمالاتی اثر ناکاملی‌ها در قابلیت اعتماد شبکه‌های دولایه فضاکار

محمد رضا شیدایی\*<sup>۱</sup> و مسعود نگین<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشگاه ارومیه

### چکیده

ارزیابی و تضمین ایمنی سازه‌های شبکه دولایه فضاکار بدون در نظر گرفتن اثر پارامترهای تصادفی غیرممکن است. در واقع وجود ناکاملی‌های اولیه در ساخت و یا مونتاژ شبکه‌های دولایه با دارا بودن صدها و یا هزاران عضو اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بسیاری از این ناکاملی‌ها از قبیل وجود انحنای اولیه در اعضا، خروج از مرکزیت در اعمال بار محوری، تغییرات موضعی در خواص مصالح و یا ناهمگن بودن آن، و یا وجود تنش‌های پسماند در اعضا که دارای طبیعت ذاتی تصادفی می‌باشند، ظرفیت باربری اعضا را کاهش می‌دهند. در نتیجه در ارزیابی رفتار خرابی واقعی سازه ضروری است توزیع تصادفی ناکاملی‌های مذکور منظور گردد. لذا در این مقاله تأثیر احتمالاتی ناکاملی‌ها در قابلیت اعتماد سازه‌های شبکه دولایه فضاکار با به‌کارگیری آنالیز شبیه‌سازی مونت کارلو در قالب نرم‌افزار OpenSees مطالعه گردیده است. نتایج حاصله حاکی از حساسیت رفتار خرابی شبکه‌های دولایه فضاکار به توزیع تصادفی ناکاملی‌های اولیه می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** شبکه‌های دولایه فضاکار، ناکاملی‌های اولیه، احتمالات، قابلیت اعتماد، آنالیز مونت کارلو.

### ۱- مقدمه

سازه‌ها نیز اساساً طبیعت تصادفی خواهد داشت. بنابراین ضروری است که در برآورد رفتار واقعی سازه‌ها وجود عدم قطعیت در پارامترهای سیستم در نظر گرفته شود. در این راستا مطالعات متعددی توسط محققین مختلف صورت گرفته است که هر کدام از آن‌ها با در نظر گرفتن یک یا چند تا از متغیرهای تصادفی مذکور به بررسی رفتار واقعی سیستم‌های سازه‌ای فضاکار پرداخته‌اند. [۳] Wong, Wada تأثیر احتمالاتی وجود ناکاملی در مقاومت نهایی اعضا و اندازه نبودن طول اعضا و نیز خطاهای انسانی را در رفتار مکانیکی شبکه‌های دو لایه فضاکار بررسی کرده و نشان دادند که خطاهای انسانی مثل خطاهای مونتاژ، می‌تواند تأثیر قابل توجهی در ظرفیت باربری این سازه‌ها داشته باشند. [۴] La Tegola تغییرات تصادفی هندسی موجود در مقاطع اعضا و همچنین وجود انحنای اولیه تصادفی در طول اعضا را در ارزیابی و محاسبه ظرفیت نهایی سازه‌های شبکه‌ای فضاکار مورد ملاحظه قرار داده است. [۵] El-Sheikh حساسیت شبکه‌های دو لایه فضاکار نسبت به وجود ناکاملی از نوع اندازه نبودن طول اعضا را بررسی کرده و نواحی بحرانی که نباید اعضای ناکامل در آن مورد استفاده قرار گیرد را تعیین نموده است. [۶] El-Sheikh همچنین این نوع ناکاملی را در شبکه‌های سه لایه فضاکار بررسی و تأثیر آن بر ظرفیت باربری و رفتار خرابی این سازه‌ها را مطالعه نموده است.

امروزه از سازه‌های شبکه دولایه فضاکار به نحو گسترده و روزافزونی در انواع پروژه‌های ساختمانی بزرگ مقیاس با دهانه‌های وسیع و عاری از ستون استفاده می‌شود. هر چند که این سازه‌ها معمولاً از درجه نامعینی بالایی برخوردار هستند و بر این اساس انتظار می‌رود که ایمنی بالایی در قبال خرابی داشته باشند اما شواهد تجربی موجود در مورد وقوع خرابی پیشرونده در این سازه‌ها نشان دهنده اهمیت مسأله خرابی در این نوع سازه‌ها بوده و انجام تحقیقات بیشتر در مورد رفتار خرابی شبکه‌های دولایه فضاکار را ایجاب می‌نماید [۱]. در واقع ناکاملی‌هایی از قبیل انحنای اولیه عضو، خروج از مرکزیت در اعمال بار محوری، تغییرات موضعی در خواص مصالح و ناهمگن بودن آن، و یا وجود تنش‌های پسماند در عضو، باعث کاهش ظرفیت باربری سازه شده و در نحوه رفتار خرابی سازه نقش اساسی ایفا می‌نمایند [۲].

علاوه بر این، توصیف رفتار سیستم‌های سازه‌ای واقعی به‌طور اجتناب‌ناپذیری وابسته به برخی منابع عدم قطعیت‌ها یا پارامترهای تصادفی است. این مسأله بخصوص در سازه‌های شبکه دولایه فضاکار با دارا بودن صدها و یا حتی هزاران عضو و گره‌های مربوطه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. به عبارت دیگر ساخت شبکه‌های دولایه کامل و دقیق یعنی بدون ناکاملی‌های اولیه تقریباً غیرممکن می‌باشد. در نتیجه واکنش این

یکسانی می‌تواند هر عددی در این دامنه را اختیار نماید. این اعداد تصادفی با استفاده از کامپیوتر و به‌کارگیری الگوریتم‌های مولد اعداد تصادفی به وجود می‌آیند. روش‌های مختلفی برای تکثیر اعداد تصادفی بسط داده شده‌اند و سابروتین‌ها و برنامه‌های کامپیوتری مربوطه برای ایجاد اعداد تصادفی با هر توزیع دلخواه وجود دارند. در نرم‌افزار OpenSees، که برای انجام این تحقیق بکار گرفته شده، برای تولید اعداد تصادفی از الگوریتم‌های استاندارد شده زبان ++C استفاده می‌شود [۸].

در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در حالت کلی با تولید اعداد تصادفی با توزیع مورد نظر و با انجام آنالیزهای مورد نیاز به تعداد دفعات تعیین شده، احتمال خرابی سیستم محاسبه می‌گردد. در عمل، احتمال خرابی با ایجاد تعداد محدودی از اعداد تصادفی به دست می‌آید لذا احتمال خرابی محاسبه شده، تنها برآوردی از احتمال خرابی واقعی سیستم خواهد بود. البته با افزایش تعداد دفعات شبیه‌سازی این برآورد به مقدار واقعی آن نزدیک‌تر خواهد شد. اگرچه این روش در حالت کلی یک روش پرهزینه و وقت‌گیر است، با این همه با توجه به افزایش سریع ظرفیت‌های محاسباتی کامپیوترهای دیجیتالی و نیز بهبود الگوریتم‌های تحلیلی روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به خاطر ویژگی‌ها و قابلیت‌های خاص آن کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل مهندسی دارد [۹].

### ۳- مدل‌سازی متغیر تصادفی

رفتار اعضای فشاری تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر نحوه رفتار خرابی سازه‌های شبکه‌دولایه دارد. انتقال بار در اعضای شبکه‌های دولایه عمدتاً به‌صورت نیروی محوری انجام می‌گیرد، وقتی عضوی از سازه تحت نیروی کششی به حالت تسلیم می‌رسد سختی آن به صفر کاهش یافته و این حالت تا رسیدن به مرحله سخت‌شدگی کرنشی تداوم پیدا می‌کند. از طرفی وقتی عضوی تحت نیروی فشاری کمانه می‌کند قادر به تحمل بار بیشتری نبوده و با افزایش کوتاه‌شدگی عضو، برای حفظ حالت تعادل می‌باید نیروی محوری عضو کاهش یابد. به عبارت دیگر عضو فشاری پس از کمانش رفتار نرم‌شدگی کرنشی از خود نشان می‌دهد. زمانی که بار وارد بر سازه از بار حدی الاستیک فراتر رود کمانش عضو فشاری باعث کاهش ناگهانی ظرفیت باربری عضو شده و در نتیجه بازتوزیعی در نیروهای داخلی سازه پدید می‌آید. اگر سازه تاب مقاومت در برابر این بازتوزیع را داشته باشد قادر به تحمل بار اضافی خواهد بود در غیر اینصورت اعضای دیگری از سازه خراب شده و امکان خرابی متوالی اعضا یعنی وقوع خرابی پیشرونده در سازه وجود خواهد داشت.

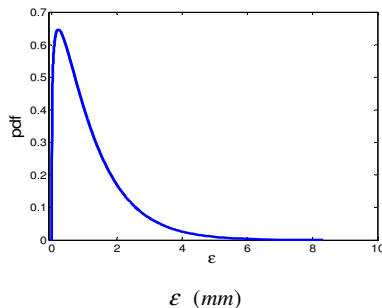
در این مقاله تأثیر ناکاملی‌های مختلف یاد شده در قابلیت اعتماد سازه‌های شبکه‌دولایه با به‌کارگیری آنالیز شبیه‌سازی مونت‌کارلو مطالعه شده است. برای این منظور با مدل‌سازی احتمالاتی بار کمانشی عضو فشاری و به‌کارگیری آن در آنالیز شبکه‌های دولایه فضاکار، قابلیت اعتماد این سیستم‌ها محاسبه گردیده است. از آنجایی که انجام آنالیزهای تصادفی و قابلیت اعتماد سازه‌ای در حضور صدها متغیر تصادفی و در نظر گرفتن رفتارهای غیرخطی در آنالیزها بسیار حجیم و وقت‌گیر می‌گردند، لذا در این مطالعه سعی شده است با استفاده از تعریف کلاسیک قابلیت اعتماد، با روش مستقیم و ساده‌تری به هدف فوق دست یافته شود. لازم به ذکر است که کلیه آنالیزهای سازه‌ای در قالب نرم‌افزار المان‌های محدود OpenSees صورت گرفته است [۷].

### ۲- روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

در روند پیش‌گویی رفتار پدیده‌های فیزیکی یا سیستم‌های سازه‌ای، موقعیت‌هائی وجود دارند که به خاطر طبیعت تصادفی بودن و پیچیدگی فرموله کردن مسأله، توصیف رفتار مورد مطالعه نمی‌تواند به صورت ریاضی ارائه شود یا اگر یک مدل ریاضی بتواند رفتار سیستم مورد نظر را توصیف نماید امکان بدست آوردن یک راه تحلیلی مستقیم برای مدل ریاضی مربوطه وجود ندارد. در چنین موقعیت‌هائی به علت دشوار بودن فرموله کردن ریاضی مسأله، شبیه‌سازی، تنها ابزاری است که برای به‌دست آوردن جواب‌های مورد نظر استفاده می‌شود. شبیه‌سازی یک فرآیند ایجاد ماهیت پدیده‌های واقعی بدون دست یافتن به خود واقعیت است. به عبارت دیگر شبیه‌سازی یک تکنیک ویژه است که با استفاده از آن می‌توان برخی از نتایج عددی مربوط به یک رفتار فیزیکی مورد مطالعه را بدون انجام آزمایش‌های لازم به‌دست آورد. در میان روش‌هائی که در شبیه‌سازی مطرح هستند روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو یکی از متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در حل مسائل مهندسی پیچیده در زمینه‌های مختلف، برای تحلیل آماری عدم قطعیت‌های موجود می‌باشد. این روش بخصوص در مسائل پیچیده‌ای که متغیرهای تصادفی توسط معادلات غیرخطی مرتبط شده‌اند بسیار مفید است. تحلیل مونت‌کارلو را می‌توان مانند مجموعه‌ای از آزمایش‌ها تصور کرد که بجای اجرا در آزمایشگاه، توسط کامپیوتر انجام می‌پذیرند.

بنیان همه روش‌های شبیه‌سازی بر ایجاد اعداد تصادفی استوار است. عدد تصادفی یکنواخت استاندارد، متغیری است که مقدار آن در دامنه [۰، ۱] با توزیع یکنواخت قرار داشته باشد و با احتمال

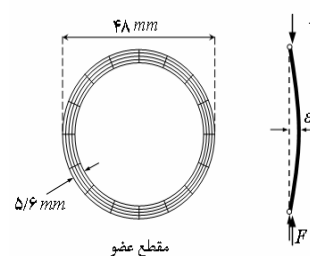
برای شبیه‌سازی ناکاملی هندسی اولیه به صورت تصادفی نیز فرض شده است که مقدار این ناکاملی یعنی  $\varepsilon$  در وسط ستون دارای توزیع احتمال گاما باشد. پارامترهای توزیع گاما طوری انتخاب گردیده‌اند که میانگین این مقدار برابر یک هزارم طول عضو گردد، یعنی  $\mu_{\varepsilon} = 0.001L = 1/2 \text{ mm}$  که ناکاملی غالب در این نوع اعضای سازه‌ای است. همچنین ماگزیمم ناکاملی به مقدار  $\varepsilon_{max} = 0.01L = 12 \text{ mm}$  محدود گردیده است. زیرا می‌توان به سادگی از به کار بردن چنین اعضایی که دارای انحنای قابل ملاحظه‌ای هستند اجتناب کرد. به این ترتیب از طریق ایجاد اعداد تصادفی با توزیع گاما و مشخصات فوق تابع چگالی احتمال این ناکاملی ایجاد می‌گردد (شکل (۲)).



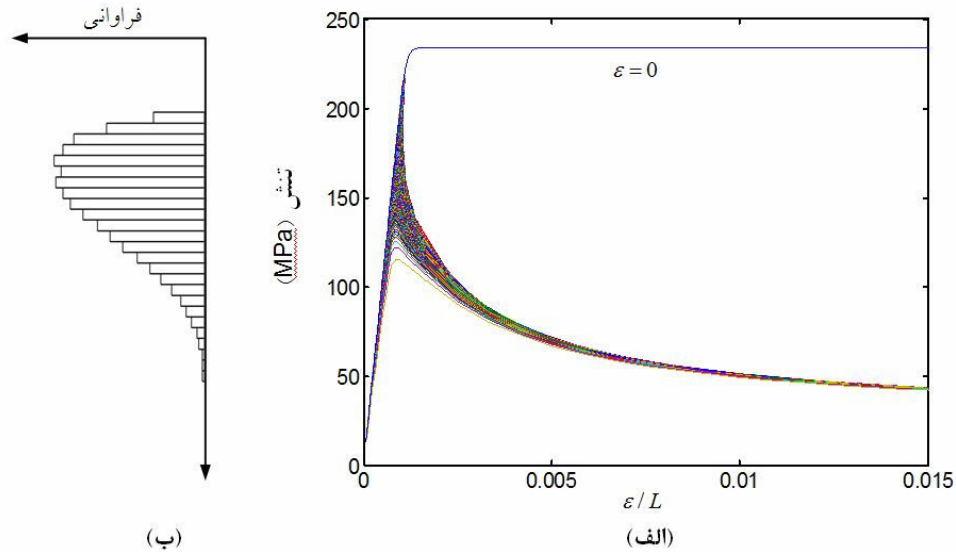
شکل ۲- چگالی احتمال ناکاملی هندسی اولیه در وسط عضو فشاری با توزیعی از نوع گاما

سپس به‌ازای هر کدام از این ناکاملی‌ها آنالیزهای مورد نظر انجام گرفته و برای هر یک از آن‌ها مقدار بار یا نیروی ماگزیمی که عضو تحمل می‌نماید محاسبه شده است. در شکل (۳) نمودارهای بار-جابجایی مربوطه به‌ازای هر کدام از آن ناکاملی‌ها نشان داده شده است. البته این شکل بر حسب تنش‌های متناظر رسم گردیده است. به این ترتیب با انجام محاسبات آماری لازم می‌توان توزیع آماری مربوطه و یا پارامترهای آماری مورد نظر را نیز به‌دست آورد. در این مورد نمودارهای چگالی احتمال و توزیع تجمعی بار کمانشی عضو فشاری بر حسب تنش‌های مربوطه مطابق شکل (۴) به‌دست آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود سختی پس‌کمانشی منفی عضو، حساسیت شدیدی به میزان ناکاملی اولیه دارد. به هر حال میانگین و انحراف معیار استاندارد تنش‌های کمانشی عضو فشاری فوق به ترتیب برابر با  $\mu_{\sigma} = 186 \text{ N/mm}^2$  و  $\sigma_{\sigma} = 19 \text{ N/mm}^2$  محاسبه شده‌اند. در نتیجه رابطه تنش- کرنش محوری اعضا بصورت نشان داده شده در شکل (۵) در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شده و بار کمانشی ستون بصورت پارامتر تصادفی مورد نظر مسأله در نظر گرفته شده است.

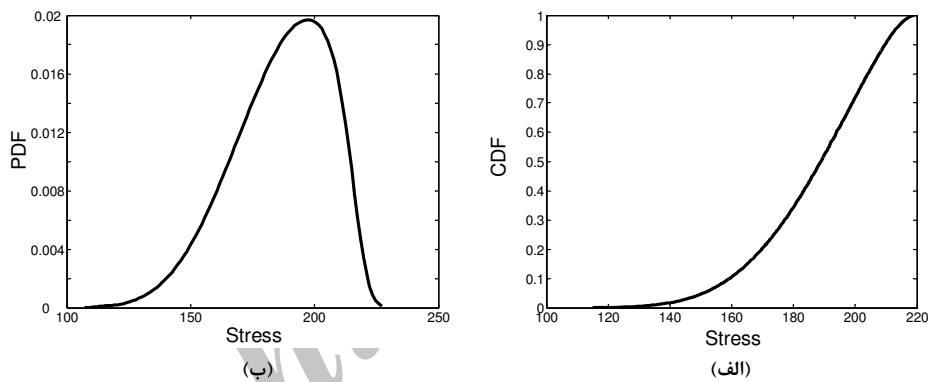
رفتار عضو فشاری با انتهای مفصلی تابعی از سه مشخصه اصلی نسبت لاغری، تنش تسلیم مصالح و میزان ناکاملی اولیه عضو بوده و بر این اساس می‌تواند از حالت خیلی ترد تا حالت خیلی نرم متغیر باشد. در این تحقیق برای به‌دست آوردن رفتار تصادفی کمانشی اعضا، یک عضو خرپایی دو سر مفصل با ناکاملی هندسی اولیه، که ویژگی‌های آن در شکل (۱) آمده است، در نظر گرفته شده است. ناکاملی هندسی اولیه به شکل یک نیم موج سینوسی فرض گردیده است به طوری که حداکثر انحراف اولیه آن در محل وسط دهانه برابر  $\varepsilon$  باشد. عضو فشاری مذکور در نرم‌افزار OpenSees با بیست المان تیر-ستون غیرخطی (Displacement Based Beam-column Element) با طول‌های مساوی به صورت الاستو-پلاستیک کامل مدل گردیده است، که در چهار نقطه انتگرال‌گیری می‌شود. گفتنی است انتگرال‌گیری در طول عضو براساس قانون گوس-لاگرانژ انجام گرفته و فرضیات تیر برنولی برقرار هستند. مقطع عضو از نوع لوله فولادی با قطر خارجی ۴۸ میلی‌متر و ضخامت دیواره ۵/۶ میلی‌متر بوده و طول عضو برابر ۱۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم فولاد برابر ۲۴۰ MPa و ضریب ارتجاعی مصالح نیز برابر ۲۱۰۰۰۰ MPa فرض شده‌اند. این مقطع مطابق شکل (۱) با استفاده از مدل Fibre Section در نرم‌افزار OpenSees ایجاد گردیده است به طوری که کل مقطع در امتداد محیطی به شانزده و در امتداد شعاعی به چهار قسمت مساوی تقسیم شده است. با تحلیل غیرخطی مصالح و هندسی مدل مزبور، رفتار بارمحوری - تغییرمکان محوری آن تحت آنالیز از نوع کنترل تغییرمکان (Displacement-Control) و با استفاده از الگوریتم نیوتن-رافسون به‌دست می‌آید [۱۰].



شکل ۱- مشخصات هندسی و مشبندی مدل عضو فشاری



شکل ۳- الف) نمودارهای بار-جابجایی عضو فشاری با ناکاملی های هندسی فرضی مسأله ب) هیستوگرام فراوانی تنش کمانشی



شکل ۴- نمودارهای الف) چگالی احتمال و ب) توزیع جمعیتی تنش کمانشی عضو فشاری، متناظر با نتایج تحلیلی شکل (۳)

#### ۴- مدل تحلیلی

در این مطالعه یک سازه شبکه دولایه از نوع انحرافدار (offset) با پلان مربعی و با مشخصات ارائه شده در شکل (۶) انتخاب گردیده است. این سازه در محل چهار گره گوشه‌ای لایه پایینی آن بر روی چهار تکیه‌گاه مفصلی ساده مستقر گردیده است. تمامی اعضا از نوع لوله و با مشخصات عضو فشاری بحث شده در بخش قبلی می‌باشند. طراحی این مدل تحت بار مرده شامل وزن پوشش و اتصالات، برابر ۵۰ دکانیوتن بر مترمربع و سربار برف برابر ۲۰۰ دکانیوتن بر مترمربع صورت گرفته است. در این مدل بار گسترده یکنواخت در مساحت بارگیر هر گره لایه بالایی ضرب و مقادیر متناظر به صورت متمرکز بر گره‌های لایه فوقانی اعمال شده است. همچنین چهار عضو گوشه‌ای جان سازه به صورت مقاطع دایره‌ای توپر در نظر گرفته شده‌اند و به این ترتیب از خرابی

موضعی این اعضا و ناپایداری کل سازه جلوگیری شده است، اما بقیه اعضا از نوع نیمرخ لوله‌ای انتخاب شده‌اند. طراحی به روش تنش مجاز و بر اساس ضوابط آیین‌نامه AISC انجام گرفته و در روند طراحی مدل مذکور مشاهده شده که فشار حاکم بر طرح است.

#### ۵- نتایج تحلیلی

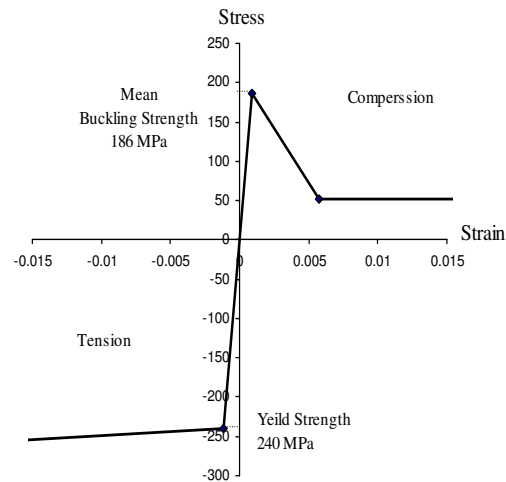
همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد در این مسأله فقط مقدار بار کمانشی ستون جهت مدل‌سازی ناکاملی‌های اولیه فرضی به صورت پارامتر تصادفی در نظر گرفته شده است. برای این منظور در ادامه توزیع احتمال تنش کمانشی عضو فشاری مذکور به‌عنوان پایه‌ای برای آنالیز سازه شبکه دولایه فضاکار مورد استفاده قرار گرفته است.

برای تصادفی بودن این ناکاملی‌ها از آنجایی که سازه فوق دارای ۵۱۲ عضو دو سر مفصل می‌باشد، در هر آنالیز از بین آن مقادیر تنش‌ها که هر کدام متناظر با یک مقدار ناکاملی هستند، ۵۱۲ مقدار بصورت تصادفی انتخاب شده و با توزیع احتمال یکنواختی بین اعضا توزیع گردیده‌اند. این کار بایستی به تعداد دفعات زیادی تکرار شود تا نتایج حاصل قابل اعتماد باشند. نتایج به‌دست آمده برای ۱۰۰۰ شبیه‌سازی انجام شده به‌صورت نمودارهای بار-جابجایی برای گره میانی از لایه پایین سازه در شکل (۷-الف) ارائه شده است. برای وضوح بیشتر و نیز تعریف خرابی سیستم، این شکل دوباره در شکل (۷-ب) تکرار شده و فقط تعدادی از منحنی‌ها به‌عنوان نمونه نشان داده شده‌اند.

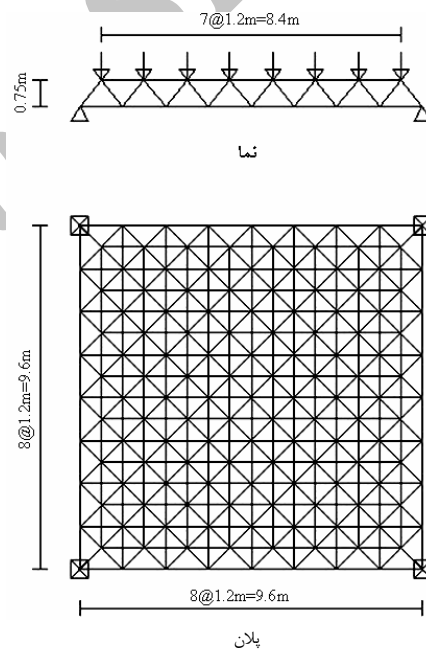
اگر در این سیستم با توجه به شکل (۷-ب) نقاط ماگزیمم اول به‌عنوان نقطه خرابی یا ظرفیت سیستم در نظر گرفته شوند می‌توان با انجام محاسبات آماری لازم، توزیع آماری بار خرابی سیستم و پارامترهای آماری مربوطه را به‌دست آورد که در این مورد نمودارهای چگالی احتمال و توزیع تجمعی ظرفیت نهایی کمانشی سیستم مطابق شکل (۸) به‌دست آمده‌اند. آماری شامل میانگین و انحراف معیار استاندارد ظرفیت کمانشی یا بار خرابی سیستم مورد مطالعه نیز به ترتیب برابر با  $\mu_p = 5842 \text{ N}$  و  $\sigma_p = 220 \text{ N}$  محاسبه شده‌اند.

#### ۶- قابلیت اعتماد

قابلیت اعتماد سازه‌ای، احتمال عملکرد مطلوب یک سیستم تحت شرایط کاری از پیش تعیین شده و برای زمان معین است. یعنی یک سازه بایستی در محدوده زمانی تعیین شده یا طول عمر آن سازه وظایف مورد نظر را به نحو مطلوب و بدون خرابی سیستم انجام دهد. قابلیت اعتماد یک سیستم را با نماد  $R$  نشان می‌دهند و برای راحتی آن را برحسب احتمال خرابی سیستم یعنی  $P_f$  به صورت  $R = 1 - P_f$  تعریف می‌کنند [۹]. در این مطالعه نیز برای تعریف قابلیت اعتماد سیستم از مفهوم احتمال خرابی سیستم استفاده گردیده است. از آنجایی که تنها متغیر تصادفی مسأله انحنای اولیه اعضا و یا تنش کمانشی متناظر در نظر گرفته شده است و توزیع احتمال خرابی سیستم مطابق شکل (۸) به‌دست آمده است، لذا برای تعریف قابلیت اعتماد سیستم می‌توان به شرح زیر عمل کرد. قابلیت اعتماد سیستم در یک مقدار بار مشخص مانند  $F_s$ ، با احتمال این که بار خرابی یا ظرفیت سیستم  $F$  از مقدار مزبور بیشتر باشد برابر خواهد بود. این تعریف را در قالب عبارت ریاضی زیر می‌توان نوشت:

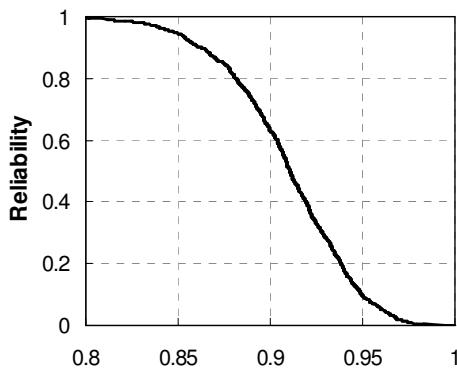
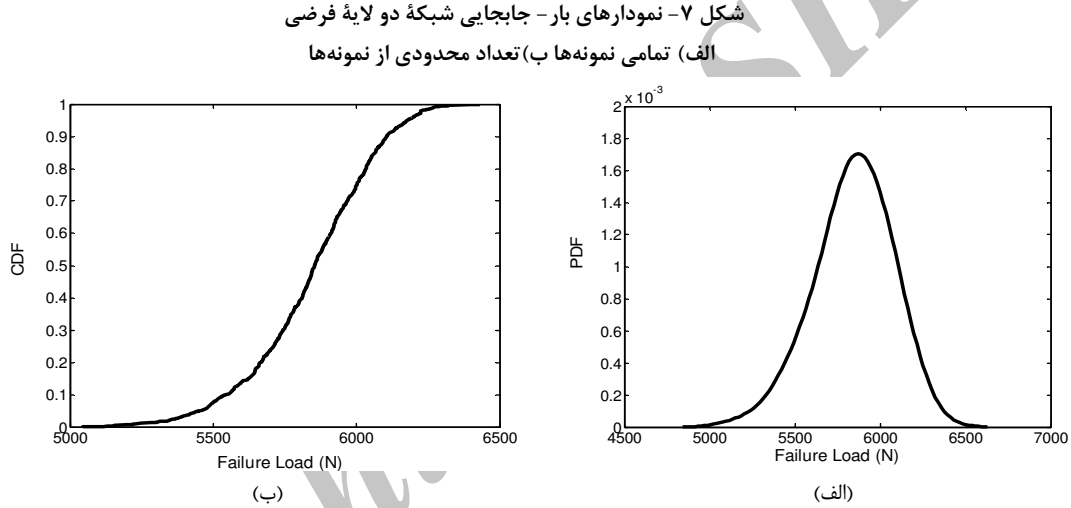
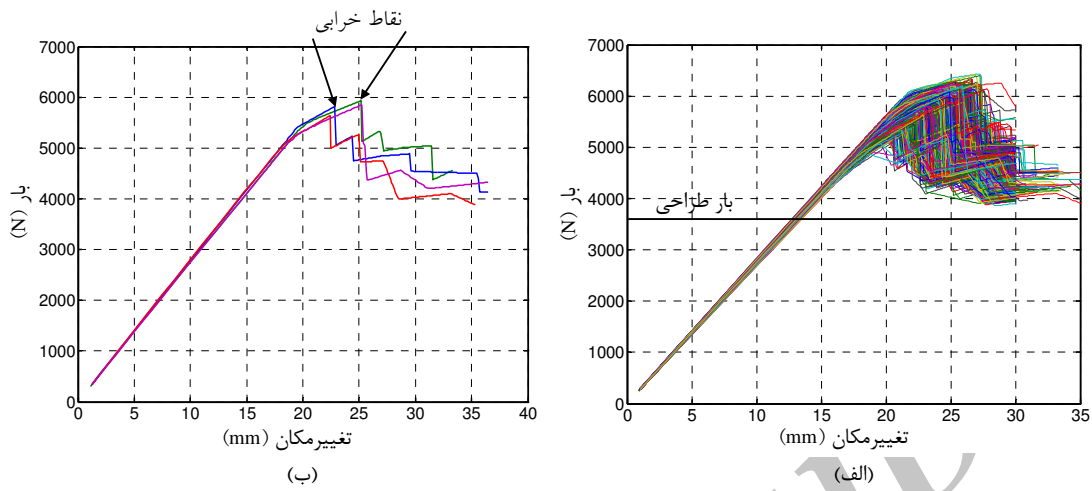


شکل ۵- مشخصات اعضا در کشش و فشار



شکل ۶- پیکربندی شبکه دولایه انتخاب شده

در این مرحله نیز باز از طریق انجام آنالیز شبیه‌سازی مونت کارلو برای هر یک از مقادیر تنش‌های کمانشی اعضا، یک آنالیز غیرخطی المان‌های محدود برای شبکه دولایه مزبور انجام گرفته و در واقع برای هر کدام از آن تنش‌های کمانشی، نیروی ماگزیمی را که سیستم تحمل می‌نماید محاسبه شده است. در این آنالیزها هر دو رفتار غیرخطی مصالح و هندسی سازه مورد نظر بوده‌اند. توضیح این که برای مدل‌سازی ناکاملی اعضا از همان مقادیر تنش‌های کمانشی و توزیع احتمال به‌دست آمده برای آن استفاده شده، لیکن



نسبت ظرفیت سازه ناکامل بر کامل

شکل ۹- قابلیت اعتماد شبکه دولایه

$$R(F_s) = P(F > F_s) \quad (1)$$

با توجه به توزیع احتمال خرابی محاسبه شده و با استفاده از تعریف فوق، قابلیت اعتماد سیستم شبکه دولایه مذکور به صورت شکل (۹) به دست آمده است.

لازم به توضیح است که منظور از سازه کامل سازه‌ای ایده‌آل و بدون ناکاملی است که بیشترین ظرفیت نهایی سیستم برای آن به دست آمده است. از آنجایی که ساخت سازه کامل واقعی عملاً غیرممکن می‌باشد، سازه‌ای که در طی عملیات فوق بیشترین ظرفیت را از خود نشان داده است به عنوان سازه کامل و یا نزدیک‌ترین سیستم به سازه کامل و ایده‌آل فرضی در نظر گرفته شده است.

از اطلاعات قید شده در نمودار شکل (۹) و یا داده‌های متناظر آن در جدول (۱)، می‌توان به نحو دیگری نیز در طرح ایمن سازه‌ها تحت اثر ناکاملی اولیه تصادفی استفاده کرد. بدین صورت که اگر در طراحی معمولی (یعنی بدون در نظر گرفتن طبیعت آماری و تصادفی ناکاملی‌های بحث شده) یک سازه شبکه‌دولایه فضاکار، دستیابی به قابلیت اعتمادی در حد فرضاً ۰/۹۸ مدنظر باشد، بایستی ظرفیت نهایی مورد نیاز سازه در ضریب افزایش باری که در ستون آخر جدول (۱) آمده است، یعنی در این مورد به ۱/۱۷ ضرب شود تا ایمنی مورد نظر طراحی حاصل گردد.

قابل توجه است که در حالت کلی وجود ناکاملی‌های تصادفی اولیه در مدل فرضی شبکه‌دولایه فضاکار، ظرفیت این سیستم را حداقل ۲ و حداکثر ۲۲ درصد کاهش داده است. این توضیحات، حساسیت سیستم‌های شبکه‌دولایه نسبت به ناکاملی‌های اولیه را نشان داده و اهمیت در نظر گرفتن اثر احتمالاتی این ناکاملی‌ها در طراحی را مشخص می‌کنند. علاوه بر این آگاهی از مقدار حداکثر بار قابل تحمل توسط سازه به طراح این امکان را می‌دهد که ایمنی سازه را در برابر هر میزان اضافه‌بار احتمالی اعمال شده بر سازه ارزیابی نماید و در صورت لزوم تدابیر خاصی جهت افزایش ایمنی سازه اتخاذ نماید.

#### ۸- خلاصه و نتیجه‌گیری

وجود ناکاملی‌ها در شبکه‌های دو لایه فضاکار که غالباً از تعداد زیادی گره و عضو تشکیل می‌شوند اجتناب‌ناپذیر بوده و توزیع ناکاملی‌ها در سازه از طبیعتی تصادفی برخوردار است. در این تحقیق روشی برای ارزیابی حساسیت ظرفیت باربری شبکه‌های دو لایه فضاکار به ناکاملی‌های تصادفی اعضا، بر مبنای روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو معرفی شده است. در این روش ابتدا طراحی شبکه دولایه فضاکار مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌ای موجود، برای دستیابی به طرحی ایمن با رعایت ضابطه حداقل وزن، انجام گرفته است، سپس مطالعه دقیق تحلیلی به روش مونت کارلو بر روی رفتار کمانشی تصادفی اعضای فشاری ناکامل صورت گرفته و بر این اساس مدل احتمالاتی مناسبی برای رفتار کمانشی تصادفی اعضا استخراج گردیده است. سپس به کمک مدل احتمالاتی مزبور اعمال ناکاملی‌ها با توزیع تصادفی بر روی همه اعضای سازه صورت گرفته است، به این ترتیب مقدار ناکاملی از عضوی به عضو دیگر با طبیعتی تصادفی تغییر یافته است. رفتار خرابی و ظرفیت نهایی باربری سازه با انجام تحلیل غیرخطی کلی تعیین شده و مطابق روش شبیه‌سازی مونت کارلو این روند تحلیلی به تعداد دفعات

داده‌های نمودار شکل (۹) به صورت عددی در جدول (۱) نیز آورده شده‌اند. ستون‌های دوم و سوم میزان افت ظرفیت سیستم در اثر وجود ناکاملی‌های هندسی مورد نظر را نشان می‌دهند. در این جدول علاوه بر اطلاعات مذکور ستون دیگری نیز تحت عنوان ضریب افزایش بار اضافه شده است. به این ترتیب برای این که طراح سازه به میزان ایمنی مورد نظر خود دست یابد کافی است ظرفیت نهایی مورد نیاز سیستم را به مقدار ضریب افزایش بار مذکور در ستون آخر جدول (۱) ضرب نماید.

جدول ۱- قابلیت اعتماد مدل سازه شبکه‌دولایه فضاکار

قابلیت اعتماد	نسبت ظرفیت سازه ناکامل بر کامل		ضریب افزایش بار
	مقدار	درصد	
۱	۰/۷۸۴	۷۸/۴	۱/۲۲
۰/۹۹	۰/۸۱۳	۸۱/۳	۱/۱۹
۰/۹۸	۰/۸۳۱	۸۳/۱	۱/۱۷
۰/۹۷	۰/۸۳۸	۸۳/۸	۱/۱۶
۰/۹۶	۰/۸۴۳	۸۴/۳	۱/۱۶
۰/۹۵	۰/۸۴۸	۸۴/۸	۱/۱۵
۰/۶۴	۰/۸۵۲	۸۵/۲	۱/۱۵
۰/۹۳	۰/۸۵۴	۸۵/۴	۱/۱۵
۰/۹۲	۰/۸۵۷	۸۵/۷	۱/۱۴
۰/۹۱	۰/۸۵۸	۸۵/۸	۱/۱۴
۰/۹۰	۰/۸۶۲	۸۶/۲	۱/۱۴
۰/۸۵	۰/۸۷۵	۸۷/۵	۱/۱۳
۰/۸۰	۰/۸۸۱	۸۸/۱	۱/۱۲
۰/۷۵	۰/۸۸۸	۸۸/۸	۱/۱۱
۰/۷۰	۰/۸۹۳	۸۹/۳	۱/۱۱

#### ۷- بحث و بررسی نتایج

برای طرح سازه‌ای با میزان قابلیت اعتماد دلخواه، می‌توان به نحو مؤثری از نمودار شکل (۹) و یا جدول (۱) استفاده کرد. به عنوان نمونه برای طراحی سازه‌ای با قابلیت اعتمادی مثلاً برابر با ۰/۹۹، طبق جدول (۱) دیده می‌شود که ظرفیت سازه ناکامل برابر با ۸۱/۳ درصد ظرفیت سازه کامل گردیده است که ۱۸/۷ درصد از ظرفیت سازه ایده‌آل کمتر می‌باشد. به عبارت دیگر برای طراحی یک سازه ایمن با قابلیت اعتماد ۰/۹۹ بایستی ظرفیت طراحی ۱۸/۷ درصد بیشتر در نظر گرفته شود. و یا مثلاً برای طراحی یک سازه با قابلیت اعتماد ۰/۹۵ ملاحظه می‌شود که ظرفیت سازه ناکامل ۸۴/۸ درصد ظرفیت سازه کامل خواهد گردید. که ۱۵/۲ درصد از ظرفیت سازه ایده‌آل کمتر می‌باشد.

- Double-Layer Space Truss", *International Journal of Space Structures*, 1992, 7 (3), 223-235.
- [4] La Tegola, A., "Ultimate Limit States of Space Reticular Structures with Random Behavior Elements", *International Journal of Space Structures*, 1992, 7 (4), 345-352.
- [5] El-Sheikh, A.I., "Sensitivity of Space Trusses to Member Geometric Imperfections", *International Journal of Space Structures*, 1995, 10 (2), 89-98.
- [6] El-Sheikh, A.I., "Effect of Member Length Imperfections on Triple-Layer Space Trusses", *Journal of Engineering Structures*, 1997, 19 (7), 540-550.
- [7] McKenna, F., Fenves, G.L., Scott, M.H., Open system for earthquake engineering simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Available from <http://opensees.berkeley.edu>.
- [8] Haukaas, T., "Finite Element Reliability and Sensitivity Methods for Performance-Based Engineering", Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, USA, 2003.
- [9] Nowak, A.S., Collins, K.R., "Reliability of Structures", McGrawHill, 2000.
- [10] Mazzoni, S., Mckenna, F., Fenves, G.L., "The OpenSees Command Language Manual", Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2005.
- زیادی تکرار شده است. در نهایت براساس مقادیر ظرفیت باربری حداکثر حاصل از تحلیل نمونه‌های مختلف، نمودارها و جداول قابلیت اعتماد سازه استخراج گردیده است.
- مطالعات انجام شده بر مبنای آنالیز شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر روی شبکه دو لایه انتخابی از نوع انحراف‌دار، حاکی از حساسیت و کاهش ظرفیت قابل توجه این سازه‌ها در اثر ناکاملی‌های هندسی تصادفی اولیه بوده است. با استخراج نمودارهایی نظیر نمودار شکل (۹) و به کارگیری آنها در طراحی سازه، می‌توان به راحتی بار طراحی لازم برای حصول ایمنی مورد نیاز را تعیین کرد. در حقیقت این نمودارها به طراح کمک خواهند کرد تا طراحی‌های خود را با سطح ایمنی مورد نظر بدون نیاز به انجام آنالیزهای طولانی قابلیت اعتماد برای هر طرح خاص، انجام دهد.
- عمومیت بخشیدن نتایج تحلیلی این تحقیق به سایر خانواده‌های متداول شبکه‌های دولایه فضاکار قابل توصیه نبوده و برای تعیین قابلیت اعتماد دیگر انواع شبکه‌های دولایه فضاکار به ناکاملی اعضا، ضروری است مطالعات جداگانه‌ای به روال مشابه صورت گیرد.
- ۹- مراجع
- [1] Suto, F., Wada, A., Sugihara, K., "Some Aspects of Reliability and Safety of Space Frames", *International Journal of Space Structures*, 1988, 3 (4), 197-216.
- [2] Sheidaii, M. R., Abedi, K., "An Investigation into the Buckling Behavior of the Compression Members Using Finite Elements Method", First national congress of thin wall structures, Urmia, Iran, 2003, pp 131-138.
- [3] Wada, A., Wang, Z., "Influence of Uncertainties on Mechanical Behavior of a