

مطالعه رفتار سازه‌های ساختمانی با سقف‌ها و دیوارهای متشکل از شبکه‌های دو لایه فضاکار

شاهرخ مالک*^۱ و سیدمحمدحسین نوری رحیم آبادی^۲

^۱ عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۲ دانشجوی دوره دکترای مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

چکیده

در مقاله حاضر، به منظور بررسی امکان‌سنجی و شناخت نقاط ضعف و قوت کاربرد شبکه‌های دولایه فضاکار به عنوان سقف‌ها و دیوارها در سازه‌های مسکونی، آموزشی، بیمارستانی، تجاری و اداری متعارف در مناطق لرزه‌خیز، از طریق مجموعه مطالعاتی تحلیلی به روش‌های استاتیکی و دینامیکی، مدل‌های نمونه سازه‌های فضاکار مورد ارزیابی کتی قرار داده شده‌اند. در ارتباط با مدل‌های سازه‌های ساختمانی یک طبقه نمونه‌ای که منطبق با ملزومات روش‌های طراحی مبتنی بر تنش‌های مجاز طراحی گردیده و مورد مطالعه تحلیلی قرار داده شده‌اند، نتایج تحلیل بار افزون حاکی از آن بوده‌است که می‌توان ضمن کاهش قابل ملاحظه وزن سازه، به سختی و مقاومت به مراتب افزونتری در مقایسه با نمونه سازه قاب خمشی فولادی متناظر دست یافت. همچنین نشان داده شده‌است که با اعمال محدودیت نسبت لاغری بر تعدادی از اعضای بحرانی منتخب می‌توان میزان شکل‌پذیری سازه را به میزان قابل ملاحظه‌ای ارتقا داد. در زمینه اهمیت رفتار پس‌کمانشی اعضا نشان داده شده‌است که میزان شیب پس‌کمانشی منحنی‌های رفتاری اعضا تأثیر تعیین‌کننده‌ای در رفتار مجموعه سازه دارد. مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی تحت تأثیر تحریک سه مؤلفه‌ای زمین لرزه با حالت تک مؤلفه‌ای حاکی از آن است که صرفنظر نمودن از اثر مؤلفه قائم می‌تواند قابلیت اعتماد طرح را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. مقاومت قابل ملاحظه و شکل‌پذیری مطلوب حاصل از تحلیل مدل سازه فضاکار با اعمال محدودیت نسبت لاغری در تعدادی از اعضا کلیدی، تحت تأثیر زمین لرزه آلتادنا با بیشینه شتاب مقیاس شده به $1.0g$ (شتاب ثقل)، نوید دهنده آن است که با توجه به سبکی وزن، درجه نامعینی نسبتاً زیاد و قابلیت تولید انبوه صنعتی، سیستم سازه پیشنهادی به‌عنوان گزینه‌ای ذریبط در احداث سازه‌های ساختمانی متداول فوق‌الاشاره در مناطق لرزه خیز به شمار آید. بنابراین گسترش مطالعات نظری و آزمایشگاهی در این زمینه مورد توصیه است.

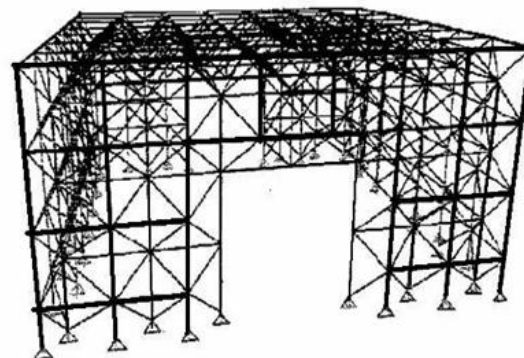
واژه‌های کلیدی: سازه فضاکار، شبکه دولایه، کمانش عضو، رفتار پس‌کمانشی، سازه ساختمانی، رفتار لرزه‌ای.

مقدمه

ملاحظه‌ای برای این نوع از سازه‌ها به‌وجود می‌آورد که در عین سبکی وزن، قابلیت باربری سازه را تحت تأثیر عوامل گوناگون و همچنین در مقابل گسیختگی پیش‌رونده افزایش می‌دهد. سازه‌های فضاکار قابلیت ارائه دیسه‌ها و ریخت‌های زیبای فضایی مسطح یا منحنی را دارا بوده، از دیدگاه زیباشناختی و همچنین آزادی عمل در ایجاد فضاهای مورد نیاز در تناسب با عملکرد معماری، گزینه‌ای مطلوب تلقی می‌شوند. اگر ظرفیت اعضا به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌باشد که از خرابی پیش‌رونده ناشی از ناپایداری اعضای بحرانی جلوگیری به عمل آید، نامعینی سازه تأثیر بسزائی در مقاومت سازه و ایجاد مسیر جایگزین انتقال بار خواهد داشت. فرم و ساختار درونی سازه فضاکار نیز به نحو مؤثری بر باربری نهایی مجموعه سازه تأثیرگذار خواهد بود. با انتخاب مناسب واحدهای تشکیل‌دهنده سازه فضاکار می‌توان گام مؤثری در جهت

سازه‌های فضاکار مورد مطالعه از مجموعه هم‌بندی شده‌ای از اعضای با عملکرد صرفاً محوری تشکیل گردیده‌اند. قابلیت عملکرد فضاکار این سیستم مهمترین ویژگی این نوع از سازه‌هاست. تاکنون اغلب مطالعات به سازه‌های پوشانه‌های فضاهای نسبتاً وسیعی معطوف گردیده‌اند که دهانه‌های آزاد نسبتاً قابل ملاحظه‌ای را در دو امتداد متعامد طلب می‌نموده‌اند و در چنین مواردی معمولاً این گونه سازه فضاکار عمدتاً تحت تأثیر بارهای ثقلی مورد مطالعه قرار داده می‌شوند. در این مقاله کاربری دیگری، که تاکنون به آن کمتر پرداخته شده، مورد توجه قرار داده شده است، که در آن شبکه‌های فضاکار، سقف‌ها و دیوارها را برای کاربری در ساختمان‌های مسکونی، آموزشی، تجاری، اداری و بیمارستانی تشکیل می‌دهند (شکل ۱). ویژگی رفتار سه بعدی سازه و مشارکت مجموعه اعضا و اجزاء سازه، مقاومت ذاتی و سختی قابل

ساختمان‌سازی مدولار برداشت که خود قابلیت تولید انبوه و کم هزینه و پر سرعت صنعتی را در ساخت و نصب به دنبال خواهد داشت.



شکل ۱: مدل سه بعدی سازه فضاکار

ساپل و کالینز [۱] با انتخاب مدل‌های رفتاری متفاوت اعضا برای شبکه‌های دو لایه پوشش فضاها، با در نظر گرفتن انواع رفتار متفاوت پس کمانشی برای اعضا شبکه‌های دو لایه فضاکار و ارائه یک روش تحلیلی ساده‌سازی شده، نتایج تحلیل مبتنی بر انواع مفروض رفتار فراکمانشی اعضا را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. مالک و ابوالحسن‌فام [۲] اثرات انعطاف‌پذیری پیوندهای نیامی را در ظرفیت باربری کلی سازه، علاوه بر ملحوظ داشتن رفتار فراکمانشی اعضا، با ارائه یک مدل تحلیلی مبتنی بر آزمایش‌های گزارش شده توسط مالک [۳] مورد بررسی قرار دادند. غلامپور و مالک [۴] اثرات میزان پیش‌تندگی بر انعطاف‌پذیری اتصالات و نتایجاً طول مؤثر و رفتار کمانشی و فراکمانشی اعضا لوله‌ای شبکه‌های دولایه فضاکار با پیوندهای نوع مرو (MERO) را از طریق آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند و منحنی‌های تجربی رفتاری ارائه نمودند. در ارتباط با رفتار دینامیکی سازه‌های فضاکار متشکل از شبکه دولایه متکی بر دو دیوار شبکه‌ای دولایه، می‌توان از مطالعات اشیکاو و همکاران [۵] نام برد که بر سازه با مصالح آلومینیومی انجام شده‌است.

مبانی مطالعات

با در نظر گرفتن اندر کنش آثار غیر خطی هندسی رفتار غیر خطی مصالح، مطالعه حاضر مبتنی بر مفروضات زیر می‌باشد:

اعضاء خرپای فضاکار منشوری بوده و در تحلیل، از اثر پیچش و همچنین اثر پواسن صرف‌نظر شده‌است. تحت تأثیر نیروی کششی، رفتار عضو به صورت الاستو پلاستیک کامل در نظر گرفته شده و از اثر سخت‌شدگی کرنشی صرف‌نظر گردیده‌است. فرض گردیده‌است که کمانش نارس موضعی اتفاق نخواهد افتاد. همچنین از آثار ناشی از انعطاف‌پذیری پیوندها، انعطاف‌پذیری اتصال اعضا به پیوندها و همچنین میزان سفت‌شدگی پیچ‌های اتصال نیز صرف‌نظر شده‌است.

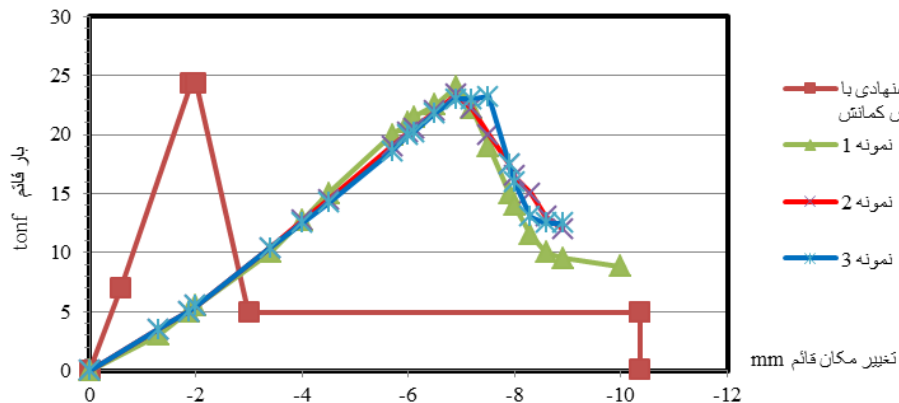
در اختیار مدل رفتاری تک عضو فشاری بدو منحنی رفتاری عضو کنترل شونده توسط نیرو مطابق با مرجع [۶]، مورد بهره‌گیری قرار داده شده‌است که در آن پس از کمانش افت مقاومت تا میزان مقاومت پس کمانشی به صورت ناگهانی در نظر گرفته می‌شود. متعاقباً شیب بخش رفتار پس کمانشی براساس منحنی رفتاری بار- تغییرمکان اصلاح شده، مطابق با منحنی‌های تجربی مرجع [۴] که برای مدل پایه هرمی شکل با هشت عضو با نیمرخ لوله‌ای به‌دست آمده‌است، نیز به صورت مدل پیشنهادی با شیب پس کمانشی در شکل ۲ منظور شده‌است تا آثار ملحوظ داشتن شیب پس کمانشی در نتایج حاصله مورد بررسی قرار داده شود. لازم به یادآوری است که در شکل ۲ تفاوت فیمابین سختی اولیه مدل پیشنهادی و منحنی‌های رفتاری حاصل از نتایج آزمایش‌های نمونه‌های هرمی شکل ۱، ۲ و ۳ متشکل از لوله‌های ۱/۵ اینچی با نسبت لاغری حدود ۸۰ مرتبط با آثار ناشی از رواداری‌های ساخت، ناکاملی‌ها، انعطاف‌پذیری پیوندها و اتصالات، میزان سفت‌شدگی پیچ‌ها و عوامل نظیر در مدل‌های تجربی بوده که در حالت فرض اتصالات مفصلی صلب ایده‌آل به- نحو اختیار شده در این تحقیق ملحوظ نگردیده‌است. به عبارت دیگر منحنی رفتاری پیشنهادی از دیدگاه مقاومت نهائی و شیب پس کمانشی ویژگی‌های منحنی‌های حاصل از آزمایش را در بر داشته، ولی از نظر میزان جابجائی‌ها تا بروز کمانش آثار عوامل مذکور در فوق را در بر نمی‌گیرد و در عین حال تحلیل مبتنی بر این مدل رفتاری از دیدگاه میزان جذب انرژی اعضا و مدول‌ها در جهت کرانه پائینی محسوب می‌شود. عبارت ریاضی برای رفتار بار تغییرمکان عضوی پیشنهادی در ابتدای منحنی به‌صورت:

$$\frac{P}{P_{SF}} = \frac{\Delta}{\Delta_{SF}} \quad (1)$$

و در قسمت پس کمانشی بر اساس نتایج آزمایش مرجع [۴] به صورت:

$$\frac{P}{P_{SF}} = -0.672 \frac{\Delta}{\Delta_{SF}} + 1.679 \quad (2)$$

ارائه می‌گردد. P بار محوری، Δ تغییر مکان محوری بوده و زیر نویس SF بر رفتار در موقعیت کمانش دلالت دارد.



شکل ۲: مقایسه مدل رفتاری پیشنهادی با منحنی‌های تجربی مرجع ۴ (مدل‌های هرمی شکل با اعضای ۱/۵ اینچی)

مدل اخیرالذکر نسبت لاغری برای تمامی اعضای دیوار به میزان ۸۰ محدود گردیده‌است. بار مرده برای تحلیل مدل ۳/۱ با توجه به امکان بهره‌گیری از پوشانه‌های سبک‌تر، برابر ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده‌است. سازه نوع ۴ با سیستم قاب خمشی شکل‌پذیر ایده‌آل متشکل از تیر و ستون فولادی اختیار گردیده‌است. نتایج تحلیل بار افزون این سازه‌ها با فرض رفتار عضو سازه فضاکار مطابق مرجع [۶] و با زوال ناگهانی مقاومت (بدون شیب پس کمانشی) در شکل (۳) ارائه شده‌است.

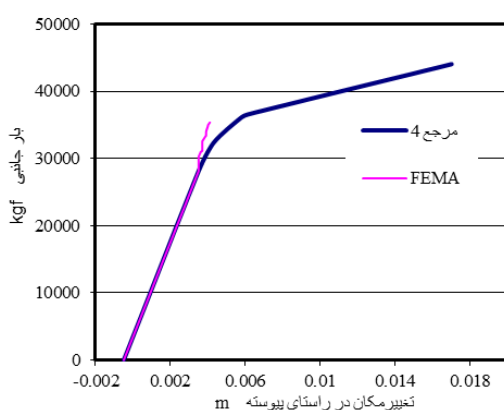
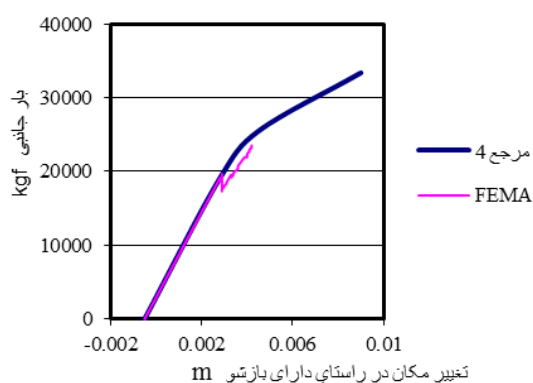
با توجه به شکل (۳) و جدول (۱) مقایسه وزن و ظرفیت باربری سازه‌های فضاکار نوع ۱ و ۲ نشان می‌دهد که اضافه کردن اعضا و یا مقاومت مقاطع تنها عوامل مؤثر در افزایش باربری سازه به‌شمار نمی‌روند، بلکه نحوه هم‌بندی اعضا نقش تعیین‌کننده‌ای خواهد داشت. در جدول (۱) مشاهده می‌شود که با اعمال محدودیت نسبت لاغری ۸۰ به تمامی اعضا، در مدل ۳، بدون تغییر محسوس وزن اسکلت سازه در مقایسه با مدل‌های ۱، ۲ و ۴، افزایش مقاومتی در حدود ۲/۸ برابر در مقایسه با سازه مدل ۲ حاصل شده‌است. در عین حال، مدل ۳ با وزنی در حدود وزن معادل با مدل سازه قاب خمشی (مدل نوع ۴)، به افزایش مقاومتی در حدود ۲/۷۵ برابر مقاومت مدل قاب خمشی نائل گردیده‌است که افزایش مقاومت

تحلیل بار افزون سازه‌های فضاکار نمونه اولیه

نتایج تحلیل مدل ریاضی نمونه‌ای از یک سازه فضاکار تک دهانه یک‌طبقه با ابعاد ۷/۶×۷/۶×۳/۵ متر با نتایج حاصل از تحلیل یک قاب خمشی متشکل از مجموعه تیرها و ستون‌ها در دو امتداد متعامد با همین ابعاد مقایسه گردیده‌است. در طراحی هر دو سیستم کوشش به‌عمل آمد ضوابط آیین‌نامه متحدالشکل ساختمان [۷] و همچنین مراجع [۸ - ۱۰] ملحوظ گردد.

در بارگذاری ثقیل، بار مرده برابر با ۵۵۰ کیلوگرم بر متر مربع - معادل بار مرده ساختمان‌های متداول بدون به‌کارگیری انواع پوشانه‌های سبک سازگار با کاربری سازه فضاکار - و بار زنده برابر با ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده‌اند. در هر سه نوع مدل سازه فضاکار مورد مطالعه، شبکه فضاکار سقف شامل تاشه مربع روی مربع بوده‌است ولی سه نوع متفاوت تاشه شبکه‌ای برای دیوارها در نظر گرفته شده‌اند. در نوع اول، شبکه دیوار متشکل از خرپاهای صفحه‌ای متعامد بدون یال افقی (مدل ۱) بوده و نوع دوم شامل همین تاشه ولی با حضور یال افقی در دیوار (مدل ۲) می‌باشد. دیوارهای مدل‌های ۳، ۳/۱ و ۳/۲ شامل هم‌بندی واحدهای نمونه هرمی شکل می‌باشند. تفاوت مدل ۳ با مدل‌های ۳/۱ و ۳/۲ در اعمال محدودیت از دیدگاه نسبت لاغری اعضا در مدل ۳ می‌باشد که در

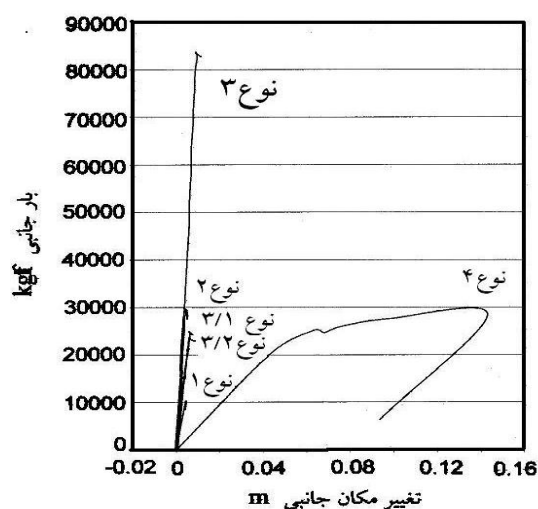
با توجه به نتایج تحلیل بار افزون و اثر مسلط بروز و توالی کماتش اعضاء لاغر در محدود گردیدن شکل پذیری، مطالعاتی به منظور ارتقاء شکل پذیری سازه با اعمال محدودیت بر نسبت لاغری اعضاء کلیدی بحرانی به عمل آمد. نتایج تحلیل ها حاکی از آن بوده است که به عنوان مثال، با اعمال محدودیت نسبت لاغری ۴۰ برای اعضای قائم و ۸۰ برای تمامی اعضاء جان همراه با منظورداشتن اثر شیب پس کماتشی، شاهد ارتقاء نسبی شکل پذیری سازه فضاکار و کاهش احتمال بروز ناپایداری های عددی بوده ایم. منحنی حاصل از تحلیل بار افزون یک نمونه نظیر با اعمال محدودیت لاغری به شرح فوق در مقایسه با نتایج تحلیل با استفاده از منحنی رفتاری FEMA [۶] در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ۴: رفتار بار- تغییر مکان سازه فضاکار بر اساس مدل های رفتاری مراجع [۴] و [۶]

(محدودیت نسبت لاغری اعضای قائم دیوار برابر ۴۰ و اعضای جان برابر ۸۰)

چشمگیری به نظر می رسد. معذک نتایج تحلیل بدون ملحوظ داشتن شیب پس کماتشی منجر به رفتاری سخت، مقاوم و غیر شکل پذیر گردیده است. بر اساس این مدل رفتاری، خلاصه نتایج مطالعات تحلیلی بار افزون نشانگر رفتار با شکل پذیری به مراتب افزون تر مدل قاب خمشی شکل پذیر ایده آل در مقایسه با سایر مدل های مبتنی بر رفتار فاقد شیب پس کماتشی اعضاء شبکه های فضاکار بوده در حالیکه سختی حاصل از این مدل های سازه های فضاکار به مراتب افزون تر از مدل قاب خمشی مزبور بوده است. در اینجا یاد آوری این نکته حائز اهمیت است که این نوع رفتار ویژگی ذاتی این نوع از سازه های فضاکار محسوب نمی شود و چنانکه خواهیم دید، مدل رفتاری با منظور داشتن شیب پس کماتشی همزمان با اعمال محدودیت بر نسبت لاغری اعضای بحرانی رفتار به مراتب شکل پذیرتری ارائه خواهد داد. در مورد مدل ۳/۲ با وزنی حدود ۵۰ درصد وزن قاب خمشی، تحت تأثیر همان بار قائم، این نمونه سازه فضاکار قادر به تحمل بار جانبی حداکثری تقریباً مساوی با قاب خمشی بوده است. همچنین قابل ذکر است که مدل ۳/۱ با کاهش بار مرده طراحی از ۵۵۰ به ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مربع، در مقایسه با مدل ۳/۲ حدود ۲۰٪ کاهش وزن و در عین حال، حدود ۵٪ افزایش مقاومت جانبی نشان داده است که بیانگر اثر مثبت قابلیت کاهش بار مرده در سیستم سازه های فضاکار بوده است.



شکل ۳: مقایسه رفتار سازه های مورد مطالعه با روش بار افزون و فرض رفتار عضو مطابق مرجع [۶]

مهیای می‌نماید، به این ترتیب، علاوه بر قابلیت تعریف رفتار خمیری - محوری، این برنامه قادر است رفتار پس کمانشی عضو را نیز با ایده‌آل‌سازی سه خطی از نمودار دلخواه که از آزمایش و یا نتایج آنالیز تک عضوی به‌دست آمده‌است، به نحو قابل استفاده در نرم افزار، تعریف نماید.

به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود، اثر اعمال محدودیت نسبت لاغری به‌شرح فوق همراه با منظور داشتن شیب پس کمانشی منجر به ارتقای قابل ملاحظه شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی نمونه تحلیل شده‌است. در چارچوب مطالعات حاضر، برنامه‌ای به زبان فرترن نوشته شد که اطلاعات ورودی مرتبط با انواع رفتار عضو را برای تحلیل

جدول ۱: خلاصه نتایج تحلیل بار افزون مدل‌های اولیه سازه‌های فضاکار و قاب خمشی مورد مطالعه

مدل	شرح	بار ثقلی کل (KN)	وزن اسکلت سازه (KN)	ظرفیت باربری جانبی (KN)
۱	شبکه متشکل از خرپاهای صفحه‌ای متعامد بدون یال افقی در دیوار	۷۷۰/۸۳	۲۰/۸۳۰	۱۰۵/۰۰۰
۲	شبکه متشکل از خرپاهای صفحه‌ای متعامد با یال افقی در دیوارها	۷۷۱/۳۴	۲۱/۳۴۰	۳۰۰/۰۰۰
۳	شبکه متشکل از واحدهای هرمی شکل تکرارشونده با اعمال محدودیت نسبت لاغری اعضای دیوار به میزان ۸۰	۷۸۱/۵۳	۲۲/۴۹۰	۸۳۰/۰۰۰
۳/۱	شبکه متشکل از واحدهای هرمی شکل تکرارشونده بدون اعمال محدودیت در نسبت لاغری اعضا با بار مرده گسترده کاهش یافته	۳۸۳/۴۰	۱۲/۲۰۰	۲۵۰/۰۰۰
۳/۲	شبکه متشکل از واحدهای هرمی شکل تکرارشونده بدون اعمال محدودیت در نسبت لاغری اعضا با فرض بار مرده مطابق سایر مدل‌ها	۷۷۳/۵۳	۱۴/۴۹۰	۲۴۰/۰۰۰
۴	مدل قاب خمشی شکل‌پذیر متشکل از تیر و ستون در دو امتداد متعامد	۷۷۰/۵۲	۲۵/۷۲۰	۳۰۰/۰۰۰

محدودیت، با محدودیت نسبت لاغری به میزان ۸۰ برای اعضای حوالی گوشه‌ها و با اعمال همان میزان محدودیت در اعضای جان دیوار و همچنین کل اعضای سازه صورت گرفته‌است. نسبت افزایش وزن به افزایش ظرفیت نشان می‌دهد که بهترین نتیجه معمولاً در حالتی حاصل می‌شود که اعضای قطری دیوار از نظر میزان نسبت لاغری محدود شده باشند. طبعاً بیشترین مقادیر سختی و ظرفیت باربری در راستای بدون بازشو به دست می‌آید. همچنین بررسی میزان تغییر مکان در راستای دارای بازشو نیز حاکی از رفتار انعطاف‌پذیرتری در این راستا می‌باشد.

مطالعه تأثیر ابعاد باز شو

شکل (۶) نتایج بررسی رفتار در راستای دارای بازشو را با تغییرات اندازه بازشو در سه سازه فضاکار مورد مطالعه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود کاهش تعداد اعضا به دلیل افزایش بازشو مستقیماً بر سختی سازه تأثیر داشته و تغییر مکان جانبی نهایی نیز با افزایش بعد بازشو افزایش

مطالعه پارامتری مقدماتی

به منظور بررسی اثر پارامترهای مرتبط با ابعاد سازه و مدول‌های تشکیل دهنده بدواً سه مدل سازه به ابعاد 7×7 متر (سازه 7×7 S7)، 9×9 متر (سازه 9×9 S9) و 11×11 متر (سازه 11×11 S11) به ارتفاع $3/5$ متر با تاشه کلی نشان داده شده در شکل (۱) ولی با میزان چگالی متفاوت و با ابعاد متفاوت بازشو به ترتیب ۲، ۴ و ۶ متر مورد بررسی قرار داده شدند. ابتدا مراحل تحلیل و طراحی مشابه قبل انجام گردید و سپس تحلیل غیرخطی استاتیکی (بارافزون) تحت اثر بارهای جانبی با یا بدون اعمال محدودیت در نسبت لاغری تعداد منتخبی یا تمام اعضا صورت گرفت نتایج این مجموعه از تحلیل‌ها در شکل (۵) ارائه شده‌است. لازم به یادآوری است که در این تحلیل‌ها که عمدتاً جنبه مقایسه‌ای داشته‌اند، اثر شیب پس کمانشی در رفتار اعضا ملحوظ نگردیده‌است.

تحلیل برای هر سازه در چهار حالت از دیدگاه ایجاد محدودیت در نسبت لاغری اعضا در حالت‌های بدون

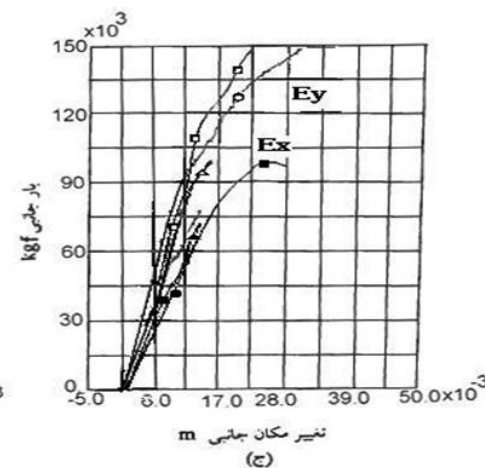
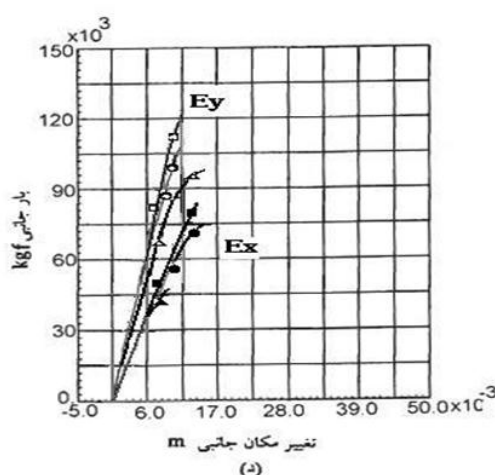
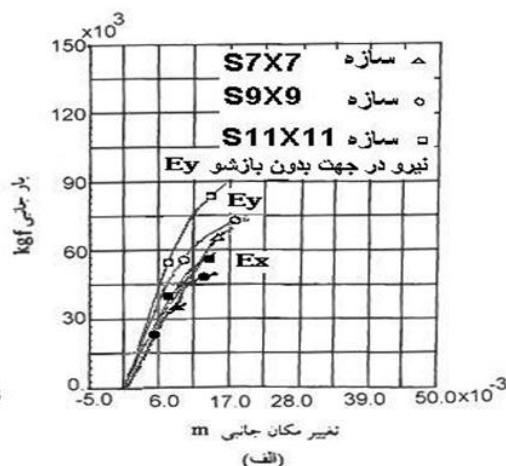
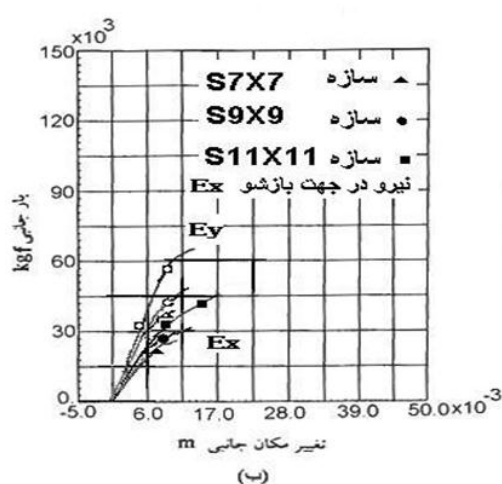
که در آن C_x کسینوس هادی محور طولی عضو جان واقع در دیوار موازی با محور X و C_y کسینوس هادی محور طولی عضو جان واقع در دیوار هم‌راستا با محور Y می‌باشند. n_x و n_y تعداد همه اعضای جان واقع در یک ردیف تحتانی به ترتیب در راستاهای X و Y می‌باشند. P_{mc} عبارت است از نیروی محوری بحرانی تک عضو جان (که در اینجا برای تمام اعضای جان ردیف تحتانی یکسان فرض گردیده‌است).

بر این اساس، رابطه ساده فوق تخمین اولیه‌ای به عنوان کرانه پایینی برای انتخاب چگالی (تعداد مدول در بعد طولی دیوار) و مشخصات مقطع اعضا به دست می‌دهد.

یافته‌است. سازه $S11x11$ با بازشوی ۱۰ متری نمونه‌ای از سازه‌هایی است که در آن‌ها تنها دو دیوار متقابل در سمت بدون بازشو به همراه سقف در برابر نیروهای جانبی مقاومت می‌نمایند. لذا در این حالت همکاری بیشتری از سوی اعضای سقف در باربری جانبی سازه وجود دارد. شبکه‌های دو لایه فضاکار در چنین سازه‌هایی تحت تأثیر بار جانبی، تحت خمش کلی حول محور درون صفحه میان‌تار خود قرار می‌گیرند.

رابطه زیر را می‌توان برای تخمین تقریبی کرانه پایینی ظرفیت نهایی باربری جانبی کل دیوارهای متشکل از شبکه‌های دو لایه چنین سازه‌هایی، P_{total} ، به کار برد:

$$P_{total} = P_{mc} n_x C_x + P_{mc} n_y C_y \quad (۳)$$



شکل ۵: مقایسه نتایج تحلیل ۳ مدل سازه:

الف- با اعمال محدودیت به میزان ۸۰ صرفاً در گوشه‌ها

ب- بدون محدودیت

ج- با اعمال محدودیت نسبت لاغری ۸۰ برای همه اعضای دیوار

د- با اعمال محدودیت نسبت لاغری ۸۰ برای اعضای قطری دیوار

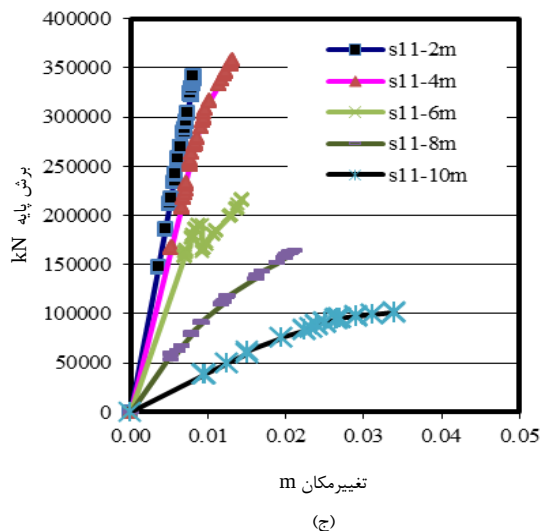
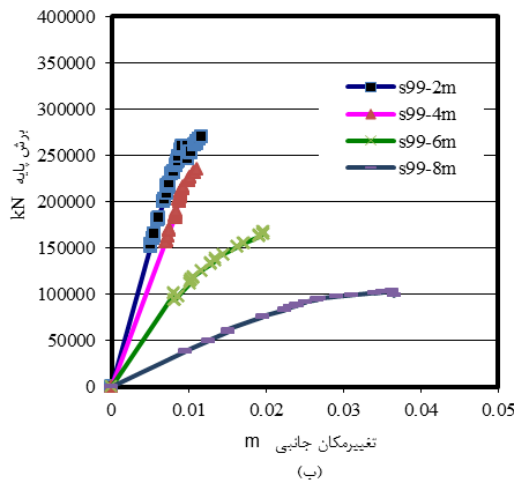
منحنی‌های نتایج حاصله مرتبط با راستای دارای باز شو (x) با نشانه‌های توپر و در راستای بدون باز شو (y) به صورت توخالی نشان داده شده‌اند.

تحلیل تاریخچه زمانی سازه فضاکار نمونه

تحلیل تاریخچه زمانی برای یک سازه فضاکار نمونه از نوع 5×7 صورت گرفته است که سازه‌ای یک طبقه تک دهانه به ابعاد $7/6 \times 7/6$ در پلان و به ارتفاع $3/5$ متر می‌باشد. دیواره‌های این سازه مطابق با شکل (۱) در امتداد محور X دارای باز شو به ابعاد 2×2 متر در وسط ضلع جانبی بوده و در امتداد متعامد (امتداد محور Y)، فاقد باز شو می‌باشند. تمامی واحدهای تشکیل دهنده سازه به صورت مدول‌های هرمی شکل در نظر گرفته شده‌اند. این سازه از ۹۵۶ عضو لوله‌ای تشکیل شده است. فاصله تا محور لایه‌های شبکه دیوار ۳۰ سانتیمتر و فاصله دو لایه شبکه سقف ۵۰ سانتیمتر است. نسبت میرایی سازه برابر مقدار توصیه شده برای سازه‌های فضاکار در مرجع [۱۱]، برابر با ۰.۲٪ میرایی بحرانی و به صورت میرایی ریلی منظور گردیده است.

در تحلیل تاریخچه زمانی از شتاب نگاشت‌های تصحیح شده زلزله سال ۱۹۸۷ آلتادنا (ایستگاه ۲۴۴۰۲، مطابق با شکل ۷) با بیشینه شتاب افقی 4300 mm/s^2 و همچنین زلزله نیوهال (ایستگاه ۲۴۲۷۹، سال ۱۹۸۷) با بیشینه شتاب افقی 5700 mm/s^2 استفاده شده است. فاصله زمانی ثبت داده‌ها $0/02$ ثانیه بوده است.

در انتگرال گیری غیرخطی از روش نیومارک با پارامترهای α و β به ترتیب برابر با $0/5$ و $0/25$ استفاده شده است.

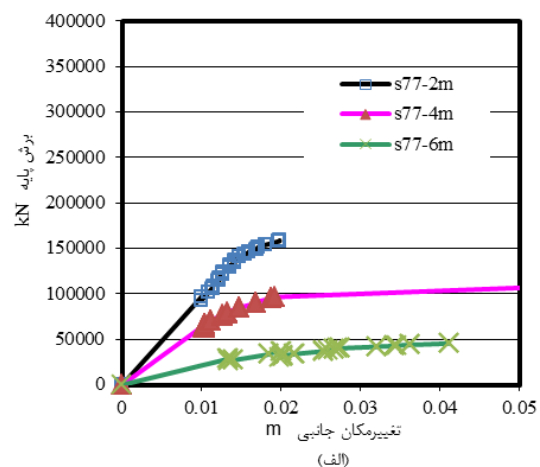


شکل ۶: مقایسه اثر تغییرات اندازه باز شو در سازه‌های فضاکار مورد مطالعه

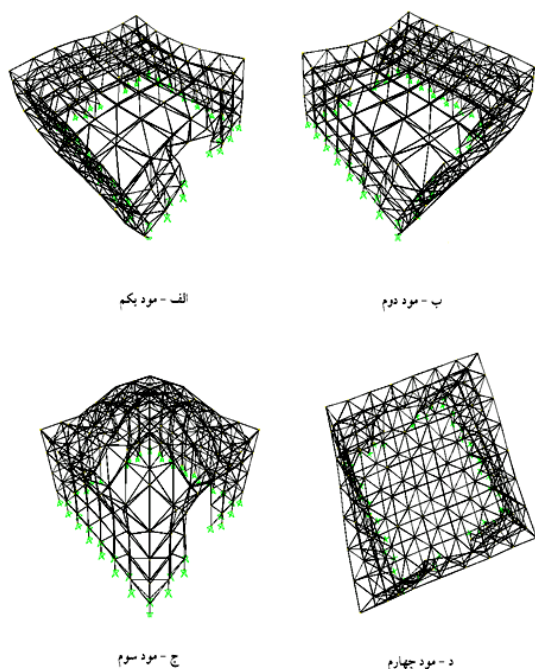
جدول (۲) مشخصه‌های شتاب نگاشت‌های مزبور را ارائه می‌کند.

جدول ۲: مشخصات شتاب نگاشت‌های مورد استفاده

راستای مؤلفه انتقالی زلزله	A_{max} cm/s^2	t_{max} sec	$T_d(\text{DUR})$ sec	T_p Sec
ALTATENA-x	۴۳۹	۲/۸۴	۲	۰/۳۶
ALTADENA-y	۱۷۶	۳/۱۴	۶	۰/۱۴
ALTADENA-z	۱۵۱	۳/۳	۵	۰/۱۴
NEWHALL-x	۵۷۸	۴/۳۲	۶	۰/۶۸
NEWHALL-y	۵۷۲	۵/۳۴	۶	۰/۳۲
NEWHALL-z	۵۳۷	۵/۳۸	۷	۰/۳۴



سازه به روش دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی) تحلیل گردیده است.
در شکل (۸) چهار مود شکل اول سازه ترسیم گردیده اند.

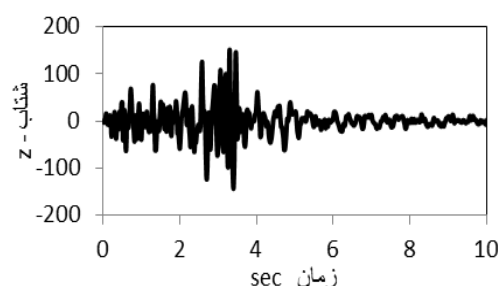
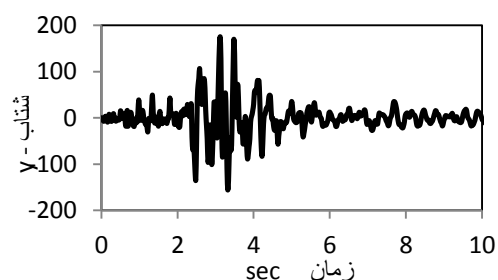
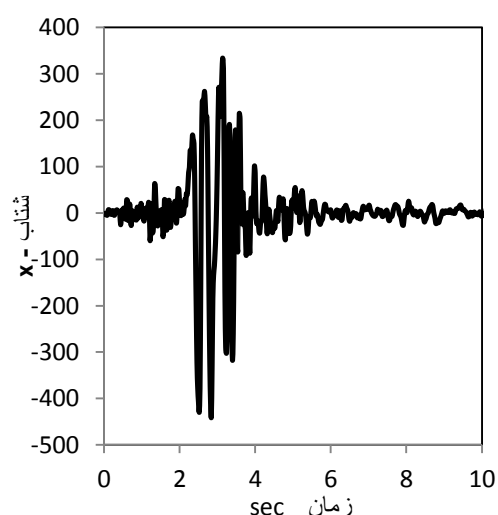


شکل ۸: چهار مود اول سازه فضاکار مورد مطالعه

نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی به صورت تاریخچه زمانی تغییرات برش پایه در راستای دارای باز شو در دو حالت اعمال شتاب نگاشت تک مؤلفه ای و سه مؤلفه ای با بیشینه شتاب مقیاس شده به $0.75g$ (برای نمایش ملموس تر نتایج) در شکل (۹) نشان داده شده است. لازم به یاد آوری است که این مجموعه تحلیل ها بر مدل سازه طراحی شده به شرح پیش گفته بر اساس روش معادل استاتیکی با ملحوظ داشتن صرفاً تک مؤلفه افقی آن هم با بیشینه شتاب $0.35g$ و بدون اعمال محدودیت در نسبت لاغری اعضا و بدون در نظر گرفتن شیب پس کمانشی صورت گرفته است.

ملاحظه می شود که با این مفروضات، در تحلیل تحت تأثیر تحریک سه مؤلفه ای تکیه گاه ها، در مقایسه با تحریک تک مؤلفه ای، برش پایه به سرعت رو به زوال گذاشته است. در این حالت با توجه به عدم اعمال محدودیتی برای نسبت لاغری اعضا و با توجه به اعمال آثار ناشی از زلزله با بیشینه شتابی به مراتب افزون تر از بیشینه شتاب منظور شده در طراحی سازه، نیل به حالت حدی از طریق بروز کمانش پیش رونده اعضا منجر به ناپایداری

که در آن A_{max} بیشینه شتاب ثبت شده در راستای مورد نظر، t_{max} زمان وقوع شتاب بیشینه از ابتدای ثبت شتاب نگاشت، $T_d(DUR)$ طول زمان موثر شتاب نگاشت و T_p زمان تناوب غالب شتاب نگاشت می باشند که از داده های شتاب نگاشت ها با استفاده از نرم افزار Seismosignal استخراج شده اند.



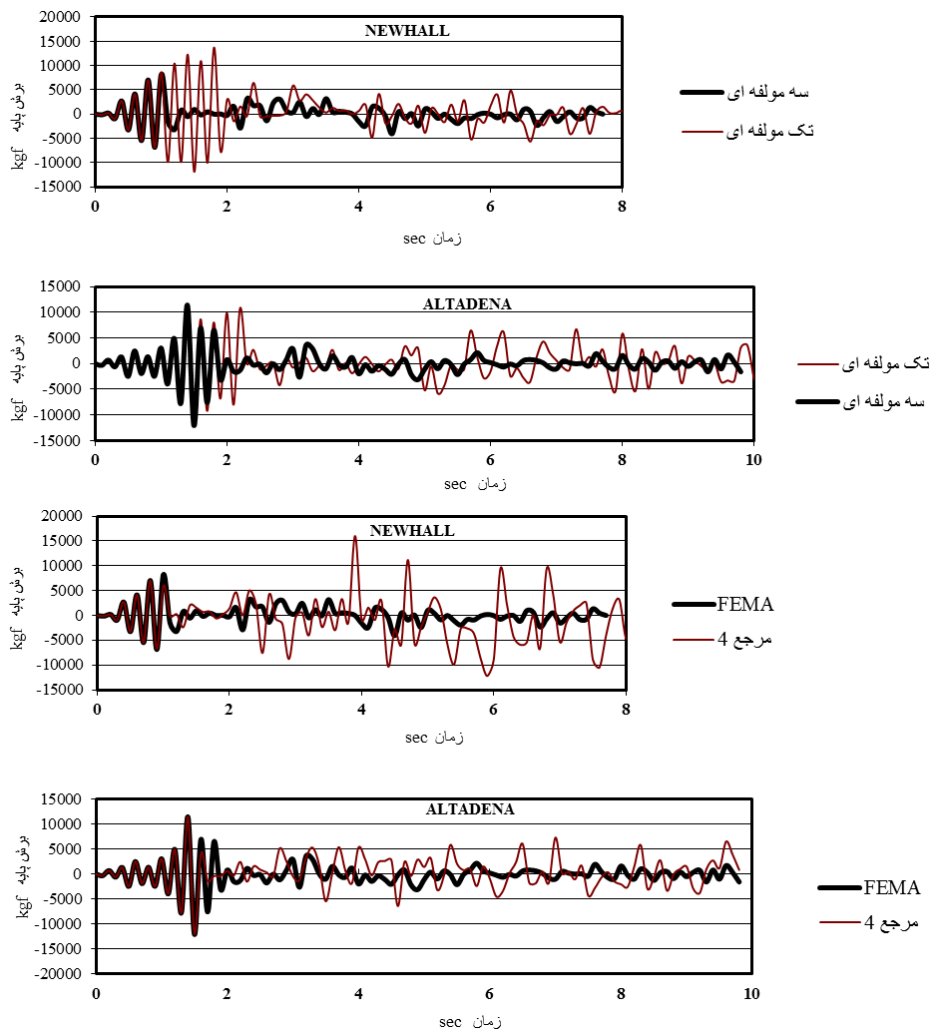
شکل ۹: شتاب نگاشت ALTADENA (سه مؤلفه ای انتقالی)
(شتاب بر حسب سانتیمتر بر مجذور ثانیه)

ابتدا بارمرده و زنده به صورت استاتیکی به سازه اعمال شده و طراحی سازه به روش تنش مجاز به نحوی صورت پذیرفته است که مناسب ترین مقاطع موجود در استاندارد DIN-1025 [۱۲] به کار گرفته شوند. سپس

ملاحظه‌ای در ارتباط با اثر مؤلفه قائم حرکت زمین نشان داده‌است و ملاحظه می‌شود عدم ملحوظ داشتن اثر مؤلفه قائم تحریکات ناشی از زلزله در تحلیل، به نتایج غیرواقعی و به طراحی سازه در جهت عدم اطمینان منجر می‌گردد. به عبارت دیگر، احتمال زیادی وجود دارد که برخی از اعضای که در تحلیل تک مؤلفه‌ای نیروی داخلی قابل ملاحظه‌ای جذب ننموده‌اند، با ملحوظ داشتن اثر مؤلفه قائم، به حالت حدی رسیده، سبب ناپایداری سازه شوند. از این دیدگاه، به ویژه اعضای قطری دیوارها رفتار بحرانی‌تری نشان می‌دهند.

گردیده‌است. دلیل این امر افزایش قابل اعتنای نیروهای محوری اعضا کلیدی در اثر اعمال آثار ناشی از مؤلفه قائم زمین‌لرزه در حالت تحریک سه مؤلفه‌ای و بروز کمانش زودرس این اعضا در مقایسه با حالت تک مؤلفه‌ای می‌باشد و بیانگر آن است که اثر مؤلفه قائم حرکت زمین، در نیروی محوری عضو قطری شاخص می‌باشد. با مراجعه به جدول ۲، این رفتار به‌ویژه تحت تأثیر زلزله نیوهال، که در آن میزان بیشینه شتاب در راستای قائم قابل ملاحظه و در حدود بیشینه شتاب در راستاهای افقی بوده‌است، چشمگیر می‌باشد.

سازه فضاکار مورد مطالعه، علیرغم طول دهانه نسبتاً کوچک، به دلیل رفتار مسلط سه بعدی، حساسیت قابل



شکل ۹: رفتار دینامیکی غیرخطی سازه S7X7 تحت اثر شتاب نگاشت‌های ثبت شده در NEWHALL و ALTADENA با بیشینه شتاب مقیاس شده به $0.75g$ و بدون اعمال محدودیت در نسبت لاغری اعضا

(الف) و (ب) مقایسه نتایج حاصل از تحریک سه‌مؤلفه‌ای انتقالی با تحریک تک مؤلفه‌ای

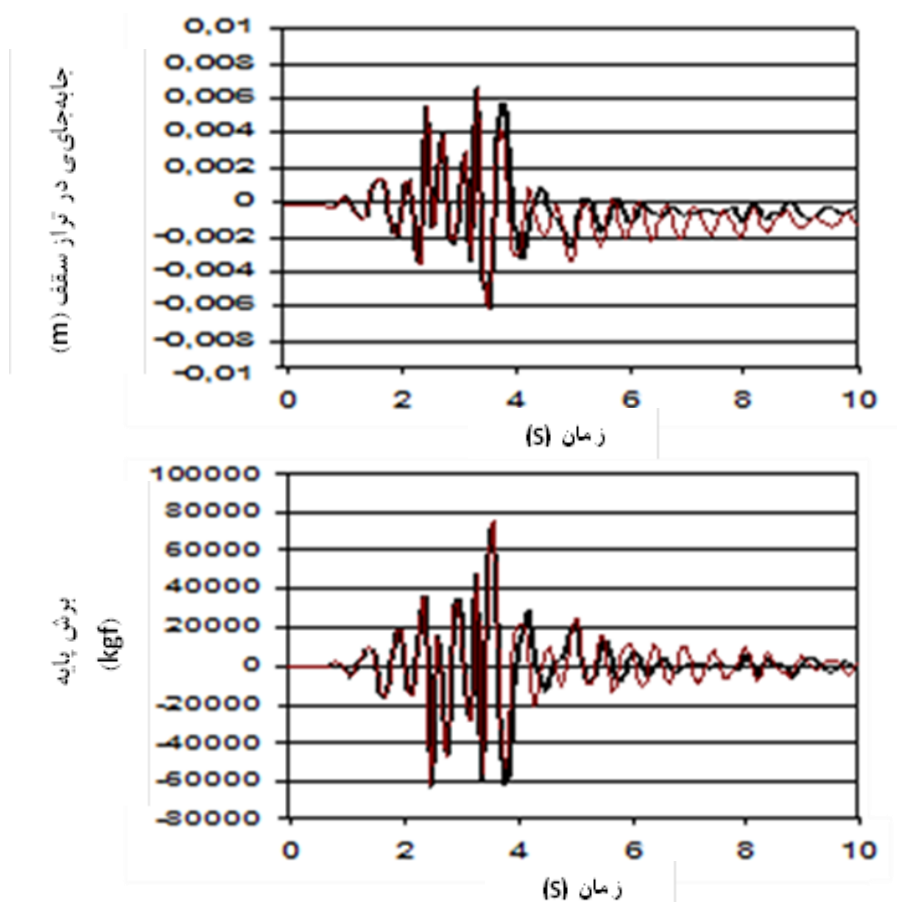
(پ) و (ت) مقایسه نتایج حاصل از تحلیل با فرض منحنی رفتاری اعضا بدون شیب پس‌کمانشی بر اساس مرجع [۶] (FEMA) با منحنی رفتاری با ملحوظ داشتن شیب پس‌کمانشی مطابق مرجع [۴]

بیشینه شتاب معادل شتاب ثقل ($g = 1$)، قادر به تحمل آثار ناشی از زلزله با میزان تغییر مکان‌های قائم و افقی تحت کنترل در گره میانی سقف و با میزان نیروهای قابل تحمل داخلی اعضا در حیطه رفتار غیرخطی، بوده‌است.

بررسی تاریخچه زمانی برش پایه در این حالت بر مقاومت مطلوب سازه در صورت قائل گردیدن برخی محدودیت‌ها برای نسبت لاغری تعدادی از اعضای سازه، حتی بدون ملحوظ داشتن شیب پس‌کمانشی، دلالت دارد. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که زمان وقوع مقادیر بیشینه برش پایه با زمان وقوع مقادیر بیشینه شتاب تطابق داشته و سازه پس از تحمل تلاش‌های وارده در تراز خطر بسیار قابل ملاحظه با بیشینه شتاب مقیاس شده به مقدار بسیار کم احتمال برابر با شتاب ثقل ($1.0g$) قادر به ارائه پاسخ مطلوب و سازگار با افت شتاب ناشی از زمین لرزه بوده‌است.

در شکل (۹) تاریخچه زمانی تغییرات برش پایه نشان می‌دهد که در نظرگرفتن شیب پس‌کمانشی در منحنی رفتاری بار-تغییرمکان عضو، مطابق نتایج تجربی مرجع [۴]، به حفظ مقاومت سازه منجر شده‌است که نشان دهنده باز توزیع مناسب‌تر نیرو در مجموعه اعضا در حالت اعمال شیب پس‌کمانشی مزبور بوده‌است.

حال با استفاده از مدل رفتاری عضو فشاری مطابق FEMA356 و همچنین با فرض مدل رفتاری با اعمال شیب پس‌کمانشی حاصل از آزمایش‌های مرجع ۴، که هنوز مدلی کاملاً محافظه‌کارانه برای نسبت‌های لاغری کوچکتر به‌شمار می‌رود، با اعمال محدودیت‌های لاغری اعضا سازه فضاکار سقف به ۹۰، اعضا قائم دیواره‌ها به ۶۰ و اعضا قطری دیواره‌ها به ۴۰، با مراجعه به شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که در تحلیل غیرخطی براساس مفروضات اخیرالذکر سازه فضاکار نمونه مورد مطالعه، در حالات اعمال سه مؤلفه‌ای تاریخچه زمانی زلزله آلتادنا با



شکل ۱۰: رفتار دینامیکی غیرخطی سازه 7×7 S7 تحت تأثیر شتاب نگاشت ALTADENA، سه مؤلفه‌ای با بیشینه شتاب مقیاس شده به $1.0g$ ، محدودیت نسبت لاغری اعضای سقف: ۹۰، اعضای قائم دیوار: ۶۰، اعضای قطری دیوار: ۴۰

بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعات گزارش شده، رفتار سازه‌های فضاکار ساده نمونه متشکل از شبکه‌های دو لایه به‌عنوان دیوارها و سقفها مورد بررسی قرار داده‌شد. با تدقیق مدل رفتاری اعضا و ملحوظ داشتن شیب پس‌کمانشی به‌نحو مشاهده شده طی آزمایش‌های مرجع [۴] و همچنین اعمال محدودیت در نسبت لاغری تعداد منتخبی از اعضا، از طریق تحلیل‌های عددی نشان داده‌شد که رفتار مطلوبی در مورد این سازه‌ها از دیدگاه عملکرد تحت تأثیر کنش‌های ناشی از بارهای ثقلی و جانبی و به‌ویژه آثار ناشی از زمین‌لرزه قابل حصول است. نتایج مطالعات اولیه مبتنی بر رفتار غیر شکل‌پذیر اعضا با افت ناگهانی مقاومت پس از بروز کمانش (مطابق توصیه‌های محافظه‌کارانه مرجع [۶]) حاکی از سختی به مراتب افزون‌تر تمامی مدل‌های سازه فضاکار مطالعه شده در مقایسه با سازه متشکل از قاب‌های خمشی در دو امتداد متعامد بوده‌است. برای نیل به مقاومت حداکثر یکسان با سازه متشکل از قاب خمشی، وزن این نوع از سازه فضاکار با تاشه مناسب، به میزان قابل ملاحظه‌ای کوچکتر از وزن سازه قاب خمشی خواهد بود. در اینجا لازم است بر این نکته تأکید به‌عمل آید که سازه متشکل از قاب خمشی در مطالعه حاضر، دارای ستون‌های میانی نیز بوده‌است، حال آنکه سازه‌های فضاکار مورد مطالعه فاقد ستون‌های میانی و دارای دهانه آزاد کامل بوده‌اند که این امر از دیدگاه آزادی عملکرد معماری مزیتی انکارناپذیر به‌شمار می‌رود. متعاقباً با همان مدل رفتاری محافظه‌کارانه برای اعضا، ولی صرفاً با اعمال محدودیت در نسبت لاغری اعضا مؤثر تا میزان ۸۰، نتایج تحلیل حاکی از مقاومت به مراتب افزون‌تر سازه فضاکار در مقایسه با سازه متشکل از قاب‌های خمشی در دو امتداد متعامد بوده‌اند و این افزایش چشمگیر مقاومت بدون افزایش نسبی وزن حاصل گردیده‌است. معذک رفتار مجموعه سازه فضاکار شبکه‌ای به‌شدت وابسته به رفتار اعضا شبکه‌ها بوده و رفتار عضو براساس رفتار غیر شکل‌پذیر کنترل شونده توسط نیرو مطابق مرجع [۶] با توجه به نتایج آزمایش‌های گزارش شده در مرجع [۴] واقعگرایانه نبوده و لذا سازه‌های تشکیل شده از چنین اعضایی نیز به تبع آن رفتاری غیر شکل‌پذیر از خود بروز داده‌اند. لذا مطالعاتی به منظور ارتقاء شکل‌پذیری سازه با اعمال محدودیت بر نسبت

لاغری اعضا کلیدی بحرانی به‌عمل آمد و اثر اعمال محدودیت نسبت لاغری به شرح فوق همراه با منظور داشتن شیب پس‌کمانشی منجر به ارتقاء قابل ملاحظه شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی نمونه‌های تحلیل گردید.

سلسله مطالعاتی نیز که در این مقاله در زمینه آثار تغییر در پارامترهای هندسی مانند ابعاد کلی، چگالی مدول‌ها و ابعاد بازشوها در مقاومت، سختی و تغییر مکان گزارش شده، از جنبه مقایسه‌ای به عمل آمده و در آن‌ها آثار شیب پس‌کمانشی یا محدودیت نسبت لاغری ملحوظ نشده‌است.

مقایسه نتایج تحلیل غیرخطی با اعمال تاریخچه زمانی شتاب حرکت زمین به صورت تک مؤلفه‌ای و همچنین سه مؤلفه‌ای حاکی از آن است که با توجه به عملکرد مسلط سه‌بعدی سیستم سازه‌های فضاکار مورد مطالعه، عدم ملحوظ داشتن هر یک از مؤلفه‌های انتقالی زمین‌لرزه، حتی در این کاربری نیز به نتایج اشتباه آمیزی منجر خواهد شد و لذا مطالعه آثار مؤلفه قائم زمین لرزه در تحلیل و طراحی این سازه‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد.

از سوی دیگر، نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیر خطی نیز حاکی از تأثیر قابل ملاحظه منظور داشتن شیب پس‌کمانشی واقعگرایانه اعضا، مبتنی بر نتایج آزمایش‌های ذریبط، در هماهنگی با رهنمودهای مندرج در فصل هفتم آیین‌نامه سازه‌های فضاکار [۱۳]، در پاسخ لرزه‌ای سازه بوده‌است.

تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه فضاکار نمونه مورد مطالعه، در حالات اعمال سه مؤلفه‌ای تاریخچه زمانی زلزله آلتادانا با بیشینه شتاب بسیار کم احتمال معادل شتاب ثقل ($g=1$) بر مقاومت مطلوب سازه، در صورت قائل گردیدن برخی محدودیت‌ها برای نسبت لاغری تعدادی از اعضای سازه حتی بدون ملحوظ داشتن شیب پس‌کمانشی، دلالت داشته‌است.

مطالعه حاضر حاکی از آن بوده‌است که با توجه به سبکی وزن، ذخیره قابل ملاحظه مقاومت، درجه نامعینی زیاد، قابلیت تولید انبوه صنعتی و همچنین نظر به قابلیت نیل به میزان شکل‌پذیری مطلوب و قابل کنترل از طریق اعمال محدودیت در نسبت لاغری تعداد محدودی از اعضا کلیدی و تعریف مدل واقعگرایانه رفتار اعضا با منظور داشتن ویژگی‌های رفتار پس‌کمانشی، قادر خواهیم بود به

سپاسگزاری

همکاری‌های آقای مهندس رضا مالک در تنظیم مقاله حاضر شایسته سپاسگزاری است.

سازه‌های با هزینه اندک و در عین حال با اعتمادپذیری قابل ملاحظه‌ای در مقابل نیروهای ناشی از زلزله دست یابیم. لذا سیستم سازه پیشنهادی برای کاربری‌های مورد بحث در این مقاله سزاوار مطالعات نظری و آزمایشگاهی بیشتری به‌منظور نیل به اهداف کاربردی مطروحه در مقیاس گسترده می‌باشد.

مراجع

1. Supple, W.J. and Collins, I. (1981). "Limit state analysis of double – layer girds." In: *The Analysis, Design and Construction of Double Layer Girds*. Z. S. Makowski, ed., Applied Science Publishers, London, PP. 93-117.
2. Maalek, S. and Abolhassan-Faam, M. (2000). " Nonlinear Buckling Analysis of Space Structures." *Proceedings of the First National Conf. on Space Structures*, S. Maalek, ed., Faculty of Engineering, University of Tehran.
3. Maalek, S. (1999). " Structural Assessment and Quality Control Procedures for the Homa Air-craft Hangar No. 3. " *International Journal of Space Structures*, Vol. 14, No. 3, PP. 167-184.
4. Gholampoor, S., Maalek, S. (2009). " An Experimental Study of the Influence of the Degree of Bolt Tightness on the Effective Lengths of Compression Members of Double Layer Grids Composed of Ball Joints." Due to appear in: *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.L)* , Vol.12, No.2, Summer 2012.
5. Ishikawa, K., Okubo, S., Hiyama, Y and Kato, S. (2000). "Evaluation Method for Predicting Dynamic Collapse of Double Layer Latticed Space Truss Structures due to Earthquake Motion." *Int. J. Space Struct.*, Vol.15, No. 3.
6. FEMA and NEHRP. (2000). *Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. FEMA356, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, Washington D. C.
7. Uniform Building Code, UBC (1997).
8. The Iranian National Building Provisions, Part 6. (2006). *Loading on Buildings and Structures*. In Persian.
9. The Iranian National Building Provisions, Part 10. (2005). *The Design and Construction of Steel Buildings*. In Persian.
10. American Institute of Steel Construction. (1989). *Specification for the Design of Steel Structures*. ASD method.
11. Maalek, S. and Mohyeddin-Kermani, A.R. (2002). " Three Component versus Single Component Excitation in the Study of the Seismic Behaviour of a Triple Layer Grid." *Proceedings of the 5th. International Conference on Space Structures*, University of Surrey, Thomas Telford Publishing, London.
12. DIN 1025. (2000). German Standard Institution.
13. Code of Practice for Space Structures, Publication No. 400, Technical Bureau of the Management and Planning Organization of Iran (MPORG), Prepared in the Faculty of Engineering of the University of Tehran; Honorary Chairman: H. Nooshin, Executive and Scientific Director: S. Maalek, Prepared with the cooperation of the Scientific Committee, Tehran, (2009). In Persian.