

ارائه روشی برای محاسبه فرکانس و ظرفیت باربری جانبی نهایی سازه‌های فضاکار ساختمانی

سید محمد حسین نوری رحیم آبادی^۱؛ شاهرخ مالک^۲

چکیده:

به منظور کاربرد سازه‌های فضاکار برای ساختمان‌های مسکونی، اداری و تجاری، مطالعات ویژه ای به منظور طراحی این سازه‌ها مورد نیاز می‌باشد. شناسایی متغیرهای دینامیکی این نوع از سازه‌ها و ظرفیت باربری نهایی جانبی آنان، گامی در جهت تعیین ملزومات تحلیل و طراحی سازه‌های فضاکار به شمار می‌رود که هنوز در آیین‌نامه‌ها به ضوابط خاص آنها پرداخته نشده است. در این مقاله روشی برای محاسبه فرکانس و یا زمان تناوب سازه فضاکار مورد مطالعه ارائه گردیده و همچنین روابطی برای محاسبه ظرفیت نهایی باربری جانبی این سازه‌ها پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از روش‌های ارائه شده در این مطالعات با نتایج حاصل از تحلیل‌های مقادیر مشخصه و تحلیل‌های غیر خطی در دو حالت استاتیکی (بارافزون) و دینامیکی برای سازه‌های مورد بحث مقایسه گردیده‌اند و نشان داده شده است که نتایج روش‌های نظری ارائه شده تطابق مطلوبی با نتایج حاصل از تحلیل داشته‌اند.

کلمات کلیدی: سازه فضاکار، فرکانس، ظرفیت جانبی، استاتیکی، دینامیکی، غیرخطی.

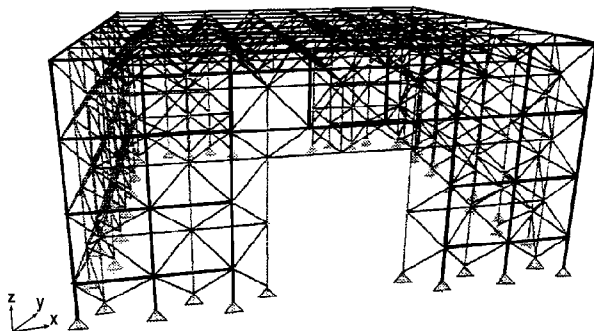
تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۹/۲۰

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۶/۱۰

^۱ نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، mh_nuori@yahoo.com

^۲ عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، maalek@ut.ac.ir

برابر بارهای غیرممتقارن و یا خارج از صفحه و مقاومت در مقابل گسیختگی پیشرونده را افزایش می‌دهد.



شکل (۱): سازه فضاکار ساختمانی یک طبقه مورد مطالعه

۱- مقدمه

عملکرد سه بعدی سازه‌های فضاکار شبکه‌ای که سیستم سازه‌ای هم بندی شده‌ای از اجزاء خطی به شمار می‌روند، مهمترین ویژگی این نوع سازه‌هاست. اگرچه تاکنون اغلب مطالعات، شامل بارگذاری در امتداد متعام بر سطوح تخت یا دارای انحنا این سازه‌ها بوده است، ولی در این مقاله عمدتاً اثرات نیروهای ناشی از زلزله مورد بررسی قرار داده می‌شود، که در سه امتداد می‌توانند بر سازه فضاکار اعمال گردند. در این مطالعه، شبکه‌های فضاکار سازه‌های سقف‌ها و دیوارها را تشکیل می‌دهند، شکل (۱). ویژگی رفتار سه بعدی سازه و مشارکت مجموعه اعضا و اجزاء سازه، مقاومت ذاتی و سختی قابل ملاحظه‌ای برای این نوع سازه‌ها بوجود می‌آورد که قابلیت باربری در

داده شده در شکل (۱) ولی با میزان چگالی متفاوت و ابعاد بازشو به ترتیب ۲، ۴ و ۶ متر مورد بررسی قرار داده می-شوند. ابتدا هر سازه تحت بار مرده ۵۵۰ و بار زنده ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع تحلیل شده و سپس بار زلزله با در نظر گرفتن جرم ناشی از بار قائم به سازه اعمال می‌شود و متعاقباً با آئین‌نامه UBC97 طراحی به قصد بهینه‌یابی صورت می‌گیرد. آنگاه به منظور بهینه‌یابی موقعیت اعضا، تحلیل غیرخطی استاتیکی (بارافزون) تحت بارهای جانبی صورت گرفته است و محدودیت نسبت لاغری در قسمت‌های مختلف سازه فضاکار اعمال گردیده و نتایج در جدول (۱) و شکل (۲) ارائه شده است. به طوریکه در جدول (۱) مشاهده می‌شود، تحلیل برای هر سازه در پنج حالت از دیدگاه ایجاد محدودیت در نسبت لاغری اعضا در حالت‌های بدون محدودیت، با محدودیت صرفاً در اعضای حوالی گوشه‌ها، با اعمال محدودیت در اعضای جان دیوار، تمامی اعضای دیوار و همچنین کل اعضای سازه صورت گرفته است. ملاحظه می‌شود که درصد افزایش وزن اعضای افقی سقف ناشی از محدودیت‌های لاغری تاثیر قابل‌اعتنایی در ظرفیت باربری جانبی مجموعه نداشته‌اند. بررسی توالی تشکیل مفاصل خمیری در اعضای خرپای فضاکار نشان می‌دهد که ابتدا اعضای جان دیوار به وضعیت کمانشی می‌رسند. نسبت افزایش وزن به افزایش ظرفیت نشان می‌دهد که بهترین نتیجه معمولاً در حالتی حاصل می‌شود که اعضای جان دیوار از نظر لاغری محدود شده باشند.

۲- فرضیات

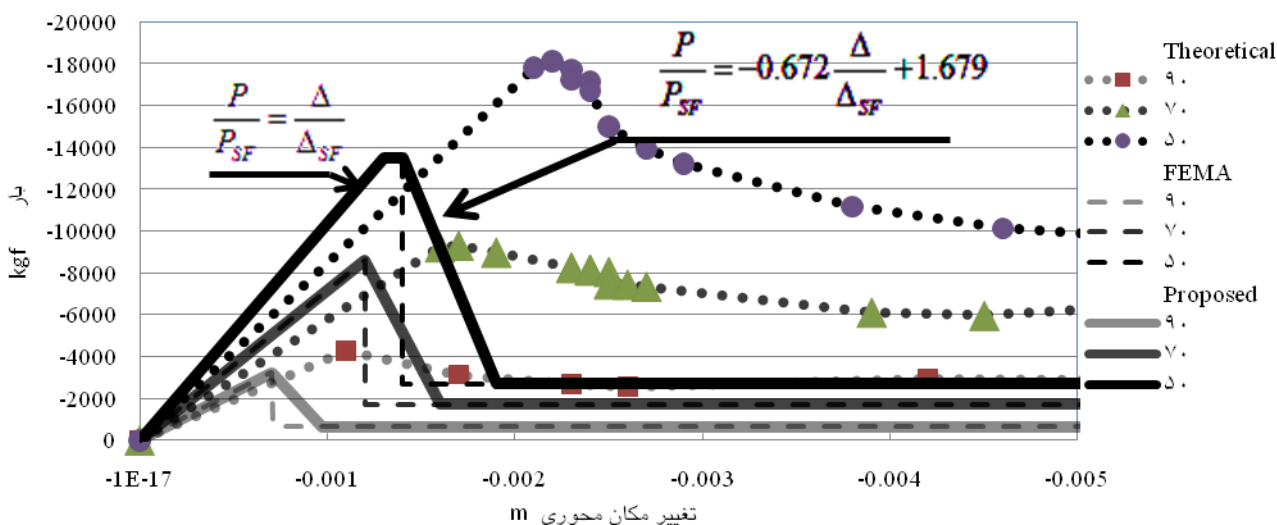
رفتار غیر خطی مصالح از رفتار غیر خطی هندسی عضو سازه‌ای با توجه به اندرکنش این دو تفکیک‌پذیر نمی‌باشد. در مطالعه حاضر به منظور ارائه مدل رفتاری سازه‌های فضا تک عضو در کار و ارائه نمودار بار-تغییر مکان محوری اعضا، به ترتیب زیر عمل شده است:

تحت تاثیر کشش، رفتار عضو بصورت الاستو پلاستیک کامل در نظر گرفته شده است و از افزایش ظرفیت، پس از حد تسلیم یعنی سخت‌شدگی کرنشی صرف‌نظر گردیده است. اثر خروج از مرکزیت‌های احتمالی در منحنی رفتاری عضو منظور شده، ولی اثر انعطاف‌پذیری اتصالات، نرم‌شدگی پیونده و ادوات اتصال و سفت کردن پیچ‌های اتصال صرف‌نظر گردیده است.

نیمرخ لوله‌ای در سازه‌های فضا کار بسیار متداول بوده و در این مطالعه نیز از این نیمرخ استفاده شده است. برای تعیین مشخصه‌های پس‌کمانشی اعضای فشاری لوله‌ای از منحنی رفتار بار-تغییر مکان ارائه شده از سوی [۶] FEMA و همچنین منحنی رفتاری تجربی حاصل از آزمایشات گزارش شده توسط غلامپور [۱]، بهره‌گیری شده است که منجر به پیشنهاد منحنی رفتاری سه خطی ارائه شده در این مقاله گردیده است (شکل ۲).

۳- بهینه‌یابی موقعیت اعضا

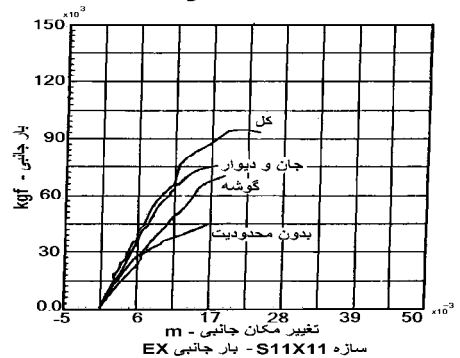
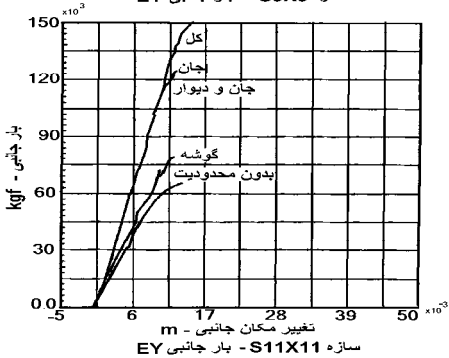
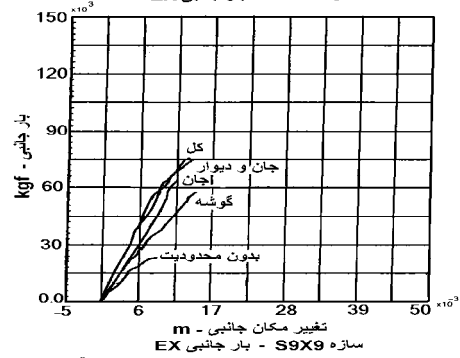
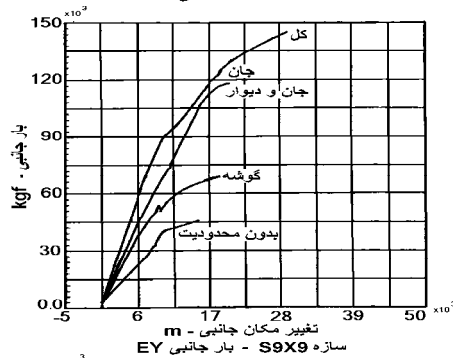
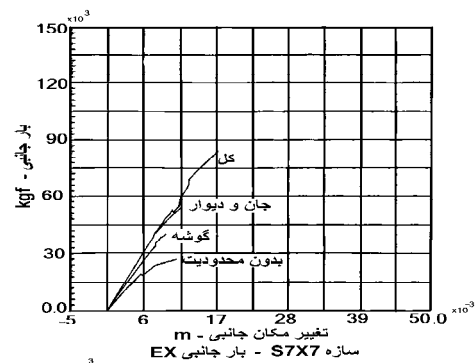
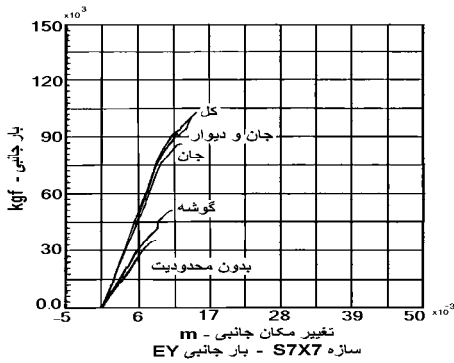
به این منظور، سه سازه فضاکار به ابعاد ۷×۷ متر (سازه ۷*۷ S) و ۹×۹ متر (سازه ۹*۹ S9) و ۱۱×۱۱ متر (سازه ۱۱*۱۱ S11) به ارتفاع ۲/۵ متر با تاشه کلی نشان



شکل (۲): منحنی بار-تغییر مکان عضو در نسبت‌های لاغری ۵۰، ۷۰ و ۹۰- منحنی پیشنهادی بر اساس آزمایش، FEMA و منحنی نظری

جدول(۱): بررسی نسبت افزایش باربری جانبی با در نظر گرفتن محدودیت‌های نسبت لاغری اعضا در حالات متفاوت

	EX					EY				
	بدون محدودیت	اعضای گوشه	اعضای جان دیوار	اعضای دیوار	کل اعضا	بدون محدودیت	اعضای گوشه	اعضای جان دیوار	اعضای دیوار	کل اعضا
S7*7										
درصد نسبت افزایش وزن	۰	۲۳	۶۲	۳۹	۷۶	۰				
درصد افزایش ظرفیت نیروی جانبی	۰	۶۱	۲۰۴	۱۲۲	۲۰۴	۰	۵۷	۱۹۷	۱۳۸	۱۹۷
درصد نسبت افزایش وزن به ظرفیت	۰	۳۸	۳۰	۳۰	۳۸		۴۰	۳۱	۲۸	۳۹
S9*9										
درصد نسبت افزایش وزن	۰	۱۶	۴۹	۳۱	۶۷					
درصد افزایش ظرفیت	۰	۱۱۴	۱۹۲	۱۵۰	۱۸۵	۰	۳۵	۲۱۲	۱۴۰	۲۱۲
درصد نسبت افزایش وزن/ظرفیت		۱۴	۲۶	۲۱	۳۶	۰	۴۶	۲۳	۲۲	۳۲
S11*11										
درصد افزایش وزن	۰	۱۰	۳۷	۲۴	۵۳					
درصد افزایش ظرفیت	۰	۵۸	۱۲۲	۶۹	۱۲۲	۰	۳۲	۱۳۵	۸۵	۱۳۵
درصد نسبت افزایش وزن به ظرفیت	۰	۱۷	۳۰	۳۵	۴۳	۰	۳۱	۲۷	۲۸	۳۹



شکل(۲): بهینه‌یابی موقعیت اعضا برای محدودیت نسبت لاغری در سازه‌های فضاکار مورد مطالعه

ب - سختی برشی : سختی برشی خرپا از مولفه های افقی اعضای قطری سازه شکل (۳-الف) بدست می آید:

$$\frac{GA}{L} = \frac{2EA_D \sin^2 \theta}{L} = \frac{Gbt}{h} = \frac{Ebt}{2(1+\nu)h} \quad (2)$$

که در آن: $h = b$ و $L = \sqrt{2}b$ و $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ طول عضو قطری خرپا و G ضریب برشی مصالح دیوار و ν نسبت پواسن می باشد.

ج - سختی محوری : سختی محوری خرپا از سختی های محوری اعضای قائم و مولفه اعضای قطری بدست می آید.

$$\frac{EA}{L} = \frac{2EA_C}{h} + \frac{2EA_D \sin^2 \theta}{L} = \frac{Ebt}{h} \quad (3)$$

A_C و A_D به ترتیب سطح مقطع عضو قطری و قائم (ستون) می باشند.

با توجه به نتایج بهینه یابی برای عملکرد اعضای قطری در ظرفیت باربری جانبی، و با تعمیم نتایج بدست آمده از خرپای مسطح به شبکه هرمی مربعی و با مساوی قرار دادن سختی برشی خرپا با سختی برشی دیوار خواهیم داشت:

$$\frac{h}{Gtb} = \frac{l * 1}{nEA_c^2} = \frac{2(1+\nu)h}{Etb} \quad (1)$$

$$t = \frac{2(1+\nu)h * nAc_x^2}{l * b}$$

C_x کسینوس هادی محور طولی عضو جان است.

دیوار در سازه فضا کار مورد مطالعه از شبکه های به هم پیوسته هرمی ساخته شده است. لازم به یادآوری است که تعداد هرم ها هم در چگالی افقی و هم در چگالی قائم (تعداد هرم ها در امتداد قائم و افقی) باید منظور شود. تغییر مکان جانبی ناشی از برش، Δ_1 ، از رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta_1 = \frac{2ml}{2nEA_c^2} \quad (2)$$

سختی خمشی با فرض توزیع خطی تنش در مقطع دیوار به صورت (۶) ارائه می گردد:

$$K = 2EA \left(\frac{2}{6}b\right)^2 * \frac{m}{2} = 0.12mb^2 EA \quad (3)$$

$$\Delta_2 = \frac{l^3 * 1}{3K} \quad (7)$$

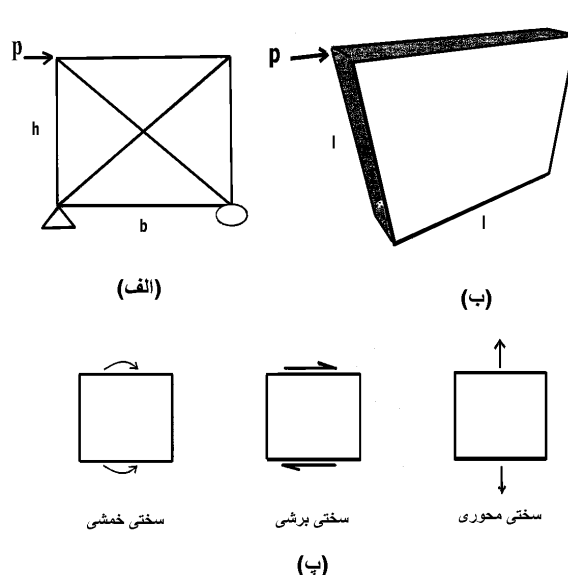
$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (4)$$

۴- محاسبه فرکانس طبیعی، تغییر مکان و ظرفیت بار جانبی نهایی

دانستن فرکانس طبیعی ارتعاش سازه از مهمترین عوامل تحلیل دینامیکی است. در اینجا روشی برای محاسبه زمان تناوب طبیعی سازه فضاکار مورد مطالعه پیشنهاد می شود، که بر مبنای سختی محوری اعضای سازه فضا کار استوار است. همچنین رابطه ای برای تخمین ظرفیت نهایی باربری جانبی و متناسب با آن، تغییر مکان نهایی جانبی پیشنهاد می گردد و نتایج با تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی مقایسه می شود.

۴-۱- محاسبه زمان تناوب طبیعی سازه فضا کار

با استفاده از مدل ساده شده دو بعدی خرپای مسطح (شکل (۳-الف)) و معادل سازی آن با دیوار برشی (شکل (۳-ب)) سختی های خمشی، برشی و محوری دو سازه مزبور به شرح زیر معادل سازی می شود (شکل (۳-پ)).



شکل (۳): معادل سازی خرپای مسطح با دیوار برشی

با فرض رفتار تنش صفحه ای خواهیم داشت:

الف - سختی خمشی : سختی خمشی خرپا از سختی محوری ستونهای سازه شکل (۳-الف) حول محور مرکزی سازه بدست می آید. با فرض یکسان بودن ضریب ارتجاعی مصالح خرپا و دیوار:

$$EI = 2EA \left(\frac{b}{2}\right)^2 = \frac{Etb^3}{12} \quad (1)$$

E ضریب الاستیک، I لنگر لختی دیوار، A سطح مقطع اعضای خرپا و b و h ابعاد دیوار و t ضخامت معادل دیوار است.

بر آن است. m تعداد اعضا جان در یک ردیف افقی است و m تعداد ستونها در عرض دیوار می باشد که با اعضای قائم هرم نمونه ساخته می شود. توسط رابطه زیر می توان فرکانس و یا دوره تناوب طبیعی سازه را بدست آورد.

$$w^2 = \frac{k}{m}, \quad T = \frac{2\pi}{w} \quad (5)$$

همچنین مطالعات به منظور بررسی سازه فضاکار دو طبقه و سه طبقه که در واقع، مدل گسترش یافته سازه یک طبقه مذکور در فوق، در ارتفاع تلقی می شوند، صورت گرفته است. فرکانس چند سازه مورد بررسی با روش پیشنهادی و تحلیل عددی در جدول (۲) ارائه شده است.

ع-۲- محاسبه ظرفیت نهایی باربری جانبی برای سازه های یک، دو و سه طبقه مطالعه شده

با دانستن نتایج مرحله بهینه یابی و این موضوع که در روش بار افزون نیمی از اعضای جان به مرحله کمانش خواهند رسید، برای محاسبه ظرفیت کل اعضای کمانش یافته خواهیم داشت:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow P = P_{buk} * \frac{n}{2} * C_x + P_{buk} * \frac{1}{2} * \frac{m}{2} * C_y \quad (6)$$

ضریب ۰/۵ برای در نظر گرفتن اعضای فشاری، منظور شده است و ظرفیت کل از جمع ظرفیت اعضای کمانش یافته و کمانش نیافته بدست می آید. در این حالت n تعداد همه اعضای واقع در یک ردیف در جهت افزایش

جدول (۲) ظرفیت باربری اعضا و ظرفیت باربری جانبی سازه

تعداد طبقه	نوع پروفیل لوله ای اعضای جان	ظرفیت کمانشی عضو (کیلوگرم)	ظرفیت باربری جانبی به روش پیشنهادی (تن)	ظرفیت باربری جانبی به روش بارافزون (تن)	نسبت خطا به نتایج بارافزون	زمان تناوب پیشنهادی ثانیه	زمان تناوب به روش عددی ثانیه	نسبت خطا
یک	P.5	۲۰۱۱	۴۴	۴۳	-۰/۰۲	۰/۰۱۷۵	۰/۱۷۴	۰/۰۰
دو	P.5	۲۰۱۱	۴۴	۴۳	-۰/۰۲	۰/۲۷۲	۰/۲۷۸	۰/۰۲
دو	P1	۶۱۳۷	۱۴۵	۱۲۸	۰/۱۱	۰/۱۸۷	۰/۱۸۵	۰/۰۱
دو	P1.5	۱۱۵۱۴	۲۷۳	۱۹۰	۰/۳۰	۰/۱۵۷	۰/۱۵۴	۰/۰۲
سه	P.5	۲۰۱۱	۴۳	۴۳	۰/۰۰	۰/۱۷۲	۰/۱۹۷	۰/۰۷
سه	P1	۶۱۳۷	۱۴۵	۱۲۸	۰/۱۱	۰/۲۵۷	۰/۲۷۳	۰/۰۶
سه	P1.5	۱۱۵۱۴	۲۷۳	۱۹۰	۰/۳۰	۰/۲۱۳	۰/۲۷۳	۰/۱۹

بسته به شدت تاثیر بار که خود تحت تاثیر متغیرهای دینامیکی قرار دارد، متغیر است؛ در حالی که در بارگذاری استاتیکی غیر خطی جهت بارگذاری و جهت اعضای فشاری همواره ثابت است. لذا با توجه به این امر در حالت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی لازم است رابطه پیشنهادی درمورد ظرفیت نهایی باربری جانبی (برش پایه)، به صورت زیر ارائه شود:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow P = P_{buk} * \frac{n}{2} * C_x + P_{buk} * \frac{m}{2} * C_Y \quad (7)$$

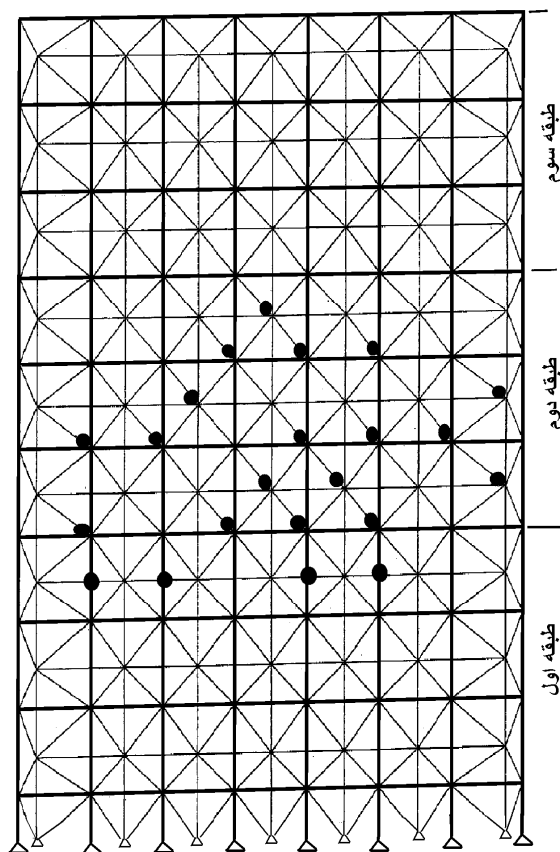
(:)

	Amax cm/s ²	t-max sec	Td (DUR) sec	Tp Sec
ALTATENA-x		/		/
ALTADENA-Y		/		/
ALTADENA-z		/		/
NEWHALL-x		/		/
NEWHALL-y		/		/
NEWHALL-z		/		/
SYLMARF-x		/		/
SYLMARF-y		/		/
SYLMARF-z		/		/

شکل‌های (۶) و (۷) نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی را در جهت دارای باز شو بر سازه یک طبقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. در هر دو حالت اعمال شتاب نگاشت ها به صورت تک مولفه‌ای و سه مولفه‌ای، مقدار برش پایه در جهت باز شو با مقدار محاسبه شده از رابطه پیشنهادی در حدود ۱۰ درصد تفاوت نشان می‌دهد. اختلاف مقدار برش پایه نهایی حاصل از تحلیل بر اساس سه شتاب نگاشت مورد استفاده در هر دو حالت تک مولفه‌ای و سه مولفه‌ای نیز کوچکتر از ۳ درصد می‌باشد. شکل (۸) مقدار برش پایه را با در نظر گرفتن شیب پس کمانشی در رفتار عضو بر اساس نتایج آزمایش [۱] نشان می‌دهد که در سازه مورد مطالعه با مقدار حاصل از رابطه پیشنهادی مطابقت مطلوبی دارد.

۵- نتیجه گیری

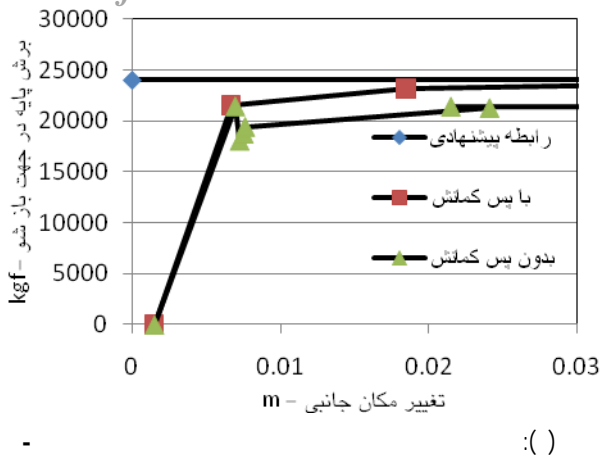
مطالعات انجام شده نشان داده است که نتایج به دست آمده از روابط ارائه شده برای محاسبه فرکانس و ظرفیت باربری جانبی نهایی سازه فضاکار در مقایسه با نتایج حاصل از روش‌های عددی تحلیلی چه بر اساس روش بار افزون و چه به روش دینامیکی غیر خطی برای تخمین



(:)

برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی از شتاب نگاشت های تصحیح شده آلتادنا (ایستگاه ۲۴۴۰۲ سال ۱۹۸۷) با بیشینه شتاب افقی ۴۳۹ cm/s/s و نیوهال (ایستگاه ۲۴۲۷۹ سال ۱۹۸۷) با بیشینه شتاب افقی ۵۷۸ cm/s/s و سیلمارف (ایستگاه ۲۴۵۱۴ سال) با بیشینه شتاب افقی ۸۲۷ cm/s/s استفاده شده است. فاصله زمانی ثبت داده‌ها ۰/۰۲ ثانیه است. در انتگرال گیری غیر خطی از روش نیومارک با پارامترهای α و β به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۲۵ استفاده شده است، جدول (۱).

در جدول (۱) t-max زمان وقوع شتاب بیشینه از ابتدای ثبت شتاب نگاشت و Td طول زمان موثر شتاب نگاشت و Tp زمان تناوب غالب شتاب نگاشت می باشد. مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی نشان میدهد که ظرفیت‌های نهایی حاصل از این دو روش با یکدیگر متفاوتند. دلیل این امر آن است که ماهیت رفتار دینامیکی به دلیل اعمال شتاب نگاشت به صورت رفت و برگشتی است و اعضای کمانش یافته به هنگام تغییر جهت نیرو از تحمل بار خارج شده‌اند و موقعیت اعضای باربر،



ALTADENA

۶- مراجع

[۱] سیروس غلامپور، شاهرخ مالک، محسن غفوری آشتیانی و واتقی امیری، "مطالعه اثرات میزان پیش‌تنیدگی بر انعطاف‌پذیری اتصالات، طول موثر اعضا و اعتمادپذیری سازه‌های مشبک فضاکار"، نشریه دانشکده فنی، پاییز ۱۳۸۹ عدد.

[۲] مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث ششم - بارهای وارد بر ساختمان، ۱۳۸۵.

[۳] مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث دهم - طراحی و اجرای سازه‌های فولادی، ۱۳۸۷.

[۴] مقررات ملی ساختمانی ایران، مبحث یازدهم- اجرای صنعتی ساختمانها، ۱۳۸۳.

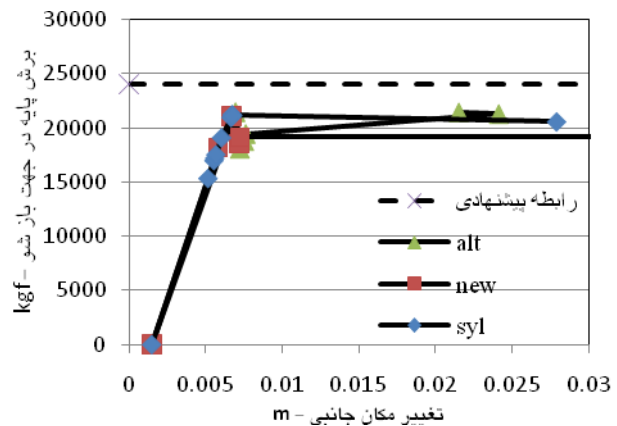
[۵] احمد حاجی سلطانی، بررسی رفتار لرزه‌ای گنبدیهای فضاکار و عوامل موثر بر ضریب رفتار، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده فنی دانشگاه تهران، استاد راهنما: شاهرخ مالک، ۱۳۸۲.

[۶] FEMA and NEHRP. Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA356, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, Washington D. C, 2000.

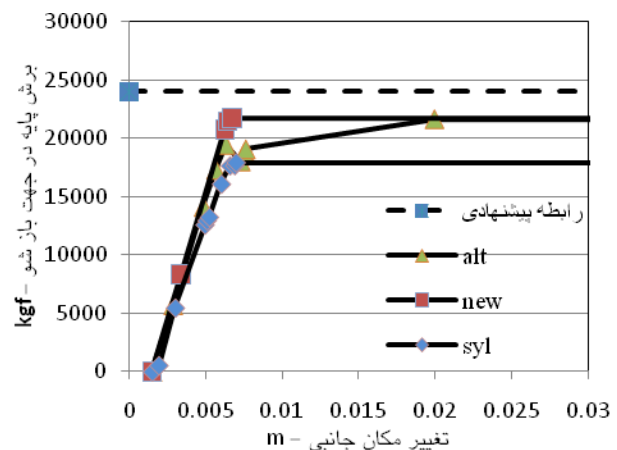
[۷] Supple W.J. and Collins I . ,: Limit state analysis of double – layer girds . Analysis , design and construction of double layer girds , Z. S. Makowski , ed . Applied Science Maalek Sh. , Mohyeddin Kermani A.R: Three Components versus single component excitation in the study of seismic behaviour of a triple layer grid. Intrnational J. of space structure , vol 14 , No . 5 :1043–1051,2001.

[۸] Maalek , Sh. , 1993 . A Formex Approach to substructuring in the procedures for Homa Aircraft Hangar , International J. of space structure , vol 14 , No.3 : 167 – 184 . 1999.

پریود ارتعاش و مقاومت نهایی تحت تاثیر بارهای جانبی برای سازه‌های فضاکار مورد مطالعه از دقت مطلوبی برخوردار می‌باشند.



شکل (۵): مقایسه برش پایه در سازه یک طبقه بدون اثر شیب پس-کمانش در رفتار اعضا، در شتاب نگاشت‌های تک‌مولفه‌ای در جهت بازشو SYLMARF , NEWHALL , ALTADENA



شکل (۶): مقایسه برش پایه در سازه یک طبقه بدون اثر شیب پس‌کمانش در رفتار اعضا، در شتاب نگاشت‌های سه مولفه‌ای در جهت بازشو SYLMARF , NEWHALL , ALTADENA