تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۰۴
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۰۵

ارزیابی زاویه‌ی تحریک زلزله بر روی ساختمان‌های فولادی نامنظم در پلان با تأکید بر نامنظمی هندسی پلان

محمود حسینی، دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
سعید تمدن (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب،
St_s_tamaddon@azad.ac.ir
سامان راحت دهمرده، دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

چکیده: *یکی از حساسیت‌های اصلی طراحان ساختمان مشخص نمودن راستای بحرانی اعمال بار زلزله بر سازه می‌باشد که بیشترین پاسخ‌های احتمالی المان‌های مختلف را ناشی می‌شود. این راستا می‌تواند بین ۹۰- تا ۹۰+ درجه متغیر باشد. بدین منظور آیین‌نامه‌های ساختمانی به‌جای یافتن زاویه‌ی بحرانی روش‌های ساده‌تری را مطرح نموده‌اند. به‌عنوان‌مثال روش پیشنهادی آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، روش ۳۰+۱۰۰ درصد می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است با مدل‌سازی یک ساختمان با اسکلت فلزی نامنظم در پلان و انجام تحلیل طیفی با استفاده از طیف استاندارد آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ و تحلیل تاریخچه زمانی خطی با به‌کارگیری هفت زوج شتاب‌نگاشت برای زوایای ۹۰- تا ۹۰+ زاویه‌ی بحرانی تحریک زلزله تعیین و با روش لوپز- تورس کنترل و در نهایت پاسخ برش پایه با نتایج روش ۳۰+۱۰۰ آیین‌نامه مقایسه گردد. نتایج تحلیل طیفی دقیق به کمک نرم‌افزارهای مربوطه نشان‌دهنده‌ی این موضوع می‌باشد که در صورت یکسان بودن طیف طراحی در دو جهت اصلی رابطه‌ی ۳۰+۱۰۰ درصد مقداری در حدود ۳/۵ درصد دست بالاتر از واقعیت می‌باشد و در صورت استفاده از دو سیستم لرزه بر جانبی (با دو ضریب رفتار مختلف) و غیر هم‌شکل بودن طیف‌ها رابطه‌ی آیین‌نامه حتی می‌تواند دست پایین نیز باشد. نتایج نشان‌دهنده‌ی این موضوع می‌باشند که با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی رابطه‌ی ۳۰+۱۰۰ بسیار محافظه‌کارانه می‌باشد.*

واژگان کلیدی: *آیین‌نامه ۲۸۰۰، ساختمان نامنظم، زاویه بحرانی، زلزله، تحلیل*

۱- مقدمه

یک سازه‌ی ایده‌آل باید قابلیت تحمل حرکات زمین‌لرزه را به‌طور یکسان برای تمامی راستاهای ممکن خود داشته باشد. یکی از پیشنهادهای آیین‌نامه‌های فعلی ساختمانی و پل‌ها، طرح اعضای سازه‌ای برای ۱۰۰٪ نیروهای لرزه‌ای به همراه ۳۰٪ نیروهای مقرر شده در راستای عمود است. برخی دیگر از آیین‌نامه‌ها ۴۰+۱۰۰ درصد را پیشنهاد کرده‌اند. این در حالی است که در حال حاضر آیین‌نامه‌ها هیچ اشاره‌ای به اینکه راستاهای اصلی برای سازه‌های پیچیده چگونه تعیین می‌شود نمی‌کنند. راستاهای زمین‌لرزه برای سازه‌های سه‌بعدی پیچیده مانند ساختمان‌های غیر مستطیلی، پل‌ها و سدهای قوسی و یا سیستم‌های خطوط انتقال در یک عضو خاص یا در یک نقطه‌ی خاص که

حداکثر تنش‌ها ایجاد می‌شود مشخص و آشکار نیست؛ اما برای یک ورودی طیف یا تاریخچه زمانی انجام تعداد زیادی تحلیل دینامیکی تحت زوایای مختلف ورودی لرزه‌ای به‌منظور کنترل تمامی نقاط برای راستاهای بحرانی امکان‌پذیر می‌باشد.

احتمال اعمال امواج زلزله در هر راستایی به سازه امکان‌پذیر بوده و بستگی به نحوه‌ی قرارگیری ساختمان نسبت به امتداد مرکز زلزله دارد؛ بنابراین همیشه تعیین زاویه‌ای که باعث بیشترین تحریک در سازه شود از حساسیت ویژه‌ای نزد طراحان برخوردار بوده است. ازآنجایی‌که به دلایل ماهیت و موقعیت نامشخص محل وقوع زلزله امکان تعیین و یا پهنه‌بندی این راستا برای مناطق مختلف وجود ندارد؛ بنابراین باید تأثیر اعمال نیروی زلزله در تمام جهات ممکن بر روی سازه در نظر گرفته شود و در نهایت بیشترین پاسخ‌ها که مربوط به بحرانی‌ترین زاویه است از تحلیل جهت طراحی استخراج گردد. البته این روش مستلزم صرف زمان زیادی بوده و به علت ماهیت و پیچیدگی‌های تحلیل‌های دینامیکی تفسیر این روش نیاز به‌دقت و زمان زیادی دارد. با توجه به توضیحات فوق آیین‌نامه‌های ساختمانی جهت ساده‌سازی روش‌هایی را مانند در نظر گرفتن ۱۰۰ درصد نیروهای زلزله در جهت مورد نظر با ترکیب ۳۰ درصد نیروی زلزله در راستای عمود بر جهت مورد نظر یا ترکیب ۴۰+۱۰۰ درصد را پیشنهاد داده‌اند [۱]. این نوع ترکیب و روش‌های پیشنهادی آیین‌نامه ممکن است باعث جواب‌های محافظه‌کارانه‌ای گردد. در این تحقیق سعی شده است با انجام تحلیل‌های مختلف با زوایای مختلف بر روی یک سازه‌ی فولادی کاملاً نامنظم در پلان صحت یا عدم صحت این فرضیه کنترل گردد.

۲- پیشینه‌ی تحقیق

در سال ۱۹۷۷، روزنبلوت و کنتراس [۲] نشان دادند که برای در نظر گرفتن بیشترین اثر نیروی زلزله بر سازه‌ها می‌توان نیروی زلزله در یک‌جهت را با درصدی از نیروی زلزله در جهات عمود بر آن ترکیب نمود. آنها با توجه به تعداد مؤلفه‌های نیروی زلزله ضرایبی را پیشنهاد دادند. در سال ۱۹۸۲ ویلسون و همکاران [۳] یک روش ساده برای تعیین زاویه‌ی بحرانی ارائه نمودند؛ اما در روش آنها همبستگی بین مؤلفه‌های نیروی زلزله در نظر گرفته نشده است. پس از آن در سال ۱۹۸۵ اسمبی و کیوریگن [۴] از تئوری ارتعاشات تصادفی استفاده کردند و رابطه‌ای برای محاسبه‌ی زاویه‌ی بحرانی پیشنهاد نمودند. روش پیشنهادی آنها برای حالتی بود که طیف هر دو مؤلفه‌ی افقی شبیه به هم بودند و بنابراین همبستگی مناسبی بین مؤلفه‌های نیروی زلزله وجود داشت.

در سال ۱۹۹۶ لوپز و تورس [۵] روشی برای تعیین زاویه‌ی بحرانی پیشنهاد دادند که بر اساس آن سازه تنها در دو جهت اصلی تحلیل می‌گردد. بر اساس نتایج این تحلیل می‌توان زوایای بحرانی جهت تعیین بیشترین نیروی زلزله در هر عضو را محاسبه نمود. در این تحقیق از این روش نیز جهت تعیین پاسخ بحرانی استفاده شده است.

لوپز و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۱ نیز روش‌های ترکیب SRSS و CQC، ۳۰٪ و ۴۰٪ را با هم مقایسه کردند و میزان خطای هر روش را تعیین نمودند. در سال ۲۰۰۴ خشنودیان و پورشا [۷] زاویه‌ی بحرانی را برای یک سازه‌ی ۵ طبقه در دو حالت الاستیک و غیر الاستیک محاسبه نمودند و نشان دادند که زاویه‌ی بحرانی در حالت غیر الاستیک الزاماً با زاویه‌ی بحرانی در حالت الاستیک برابر نیست.

۳- مشخصات مدل مورد مطالعه

در این پژوهش از یک پلان نامنظم هندسی در پلان مطابق آنچه در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ [۱] تعریف شده است با مشخصات زیر در ۳ طبقه استفاده شده است.

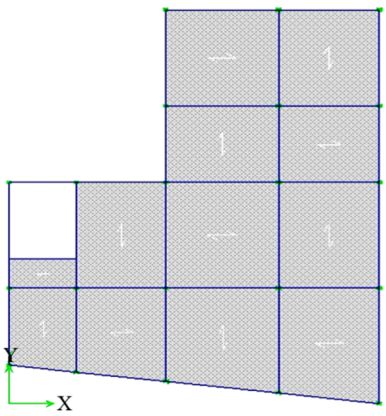
سازه‌ی مورد مطالعه در جهت X با سیستم لرزه بر قاب خمشی ویژه و در جهت Y با سیستم لرزه بر مهاربند همگرا با استفاده از نرم‌افزار ETABS ویرایش ۹/۷ مدل شده است.

به‌منظور مدل‌سازی سازه‌ی مورد نظر از مقاطع IPE220

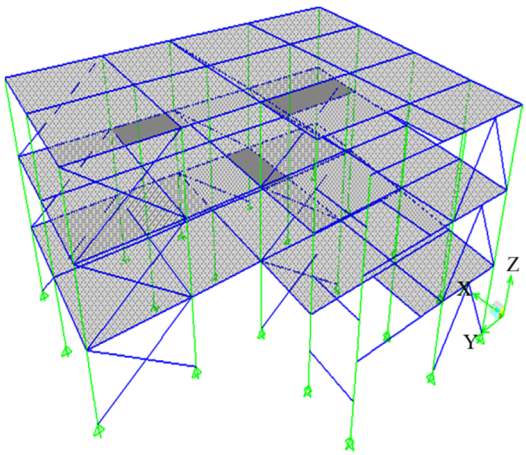
و IPE240 برای مدل نمودن تیرها و از 2IPE180 با و بدون ورق تقویتی و برای مهاربندها از 2UNP200 و2UNP180 استفاده شده است. سقف طبقات از نوع تیرچه بلوک می‌باشد و بارهای اختصاص یافته به طبقات در جدول (۱) آورده شده است. در شکل (۱) و (۲) سازه‌ی مدل شده‌ی مورد بررسی قابل مشاهده می‌باشد.

جدول (۱): *خلاصه بارها جهت بارگذاری.*

نوع بارگذاری	مقادیر بار کیلوگرم/ مترمربع
بار مرده سقف طبقات	۶۰۰
بار مرده اتاق پله	۱۱۰۰
بار مرده سقف بام	۶۰۰
بار مرده دیوارهای جانبی طبقات	۶۰۰
بار زنده سقف طبقات	۲۰۰
بار زنده اتاق پله	۳۵۰
بار زنده سقف بام	۱۵۰



شکل (۱): *پلان تیپ طبقات.*

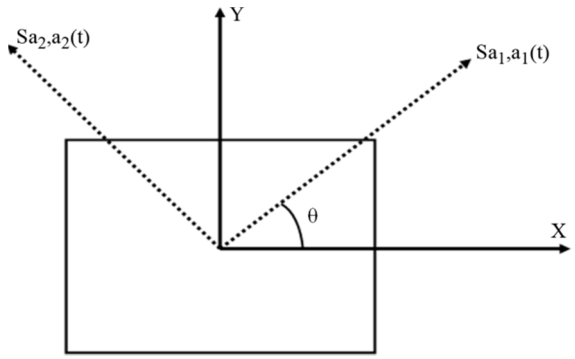


شکل (۲): *نمای سه‌بعدی.*

۴- روش تحقیق و فرضیات مورد استفاده

این موضوع که حرکات زمین در خلال یک زمین‌لرزه یک راستای اصلی داشته باشند و یا در خلال یک تناوب زمانی محدود هنگامی‌که حداکثر شتاب زمین رخ می‌دهد راستای اصلی وجود دارد فرضی معقول و منطقی است [۸]. برای اغلب سازه‌ها این راستا معلوم نیست و برای بیشتر موقعیت‌های مکانی قابل برآورد می‌باشد؛ بنابراین تنها معیار منطقی طرح مقاوم سازه‌ها در برابر زمین‌لرزه‌ها، مقاومت سازه برای هر راستای محتمل تحت زمین‌لرزه‌ای با بزرگای مفروض است. علاوه بر این، احتمال اینکه حرکت هم‌زمان در راستای عمود بر راستای اصلی نیز به همراه راستای اصلی رخ دهد محتمل است. البته به علت پیچیدگی ذاتی انتشار امواج سه‌بعدی فرض مستقل بودن آماری حرکات عمود بر راستای اصلی نیز معتبر است.

بر مبنای این فرضیات جمله منطقی برای معیار طراحی چنین به نظر می‌رسد که سازه باید در برابر یک حرکت زمین‌لرزه قوی با بزرگی Sa_1 تحت زوایای محتمل θ مقاوم باشد و همچنین هم‌زمان با آن تاب تحمل حرکات زمین‌لرزه با بزرگای Sa_2 با زاویه‌ی $\theta+۹۰$ را نیز داشته باشد. این حالت در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): *نحوه‌ی اعمال بار لرزه‌ای در زوایای مختلف.*

روش پیشنهادی آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ [۱]، با انجام مدل‌سازی ساختمان با اسکلت فولادی در حالت کاملاً نامنظم در پلان و با دو نوع سیستم مقاوم جانبی شامل قاب

خمشی ویژه در جهت X و قاب با مهاربند همگرا در جهت Y به کمک نرم‌افزار ETABS و با انجام تحلیل استاتیکی، تحلیل طیفی و تحلیل تاریخچه زمانی خطی جهت بررسی زاویه بحرانی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در تحلیل طیفی با استفاده از طیف استاندارد آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ [۱] و تحلیل تاریخچه زمانی زوایای تحریک بین ۹۰- درجه تا ۹۰+ درجه با گام‌های ۱۰ درجه به سازه اثر داده شد. در تحلیل استاتیکی ضریب زلزله در جهت X برابر ۰/۰۸۷ و در جهت Y برابر ۰/۱۴۶ لحاظ گردید. در هر دو جهت اصلی X و Y بار طیفی معرفی گردید و حداکثر پاسخ‌های دینامیکی در هر مد با استفاده از روش ترکیب CQC تعیین گردید. توصیه شده است در ساختمان‌های نامنظم در پلان و یا در ساختمان‌هایی که پیچش در آنها حائز اهمیت است، روش ترکیب مدها باید دربرگیرنده‌ی اندرکنش مدهای ارتعاشی نیز باشد. لذا به دلیل نامنظمی سازه در پلان در این تحقیق از روش CQC جهت جمع آثار مدها استفاده شده است.

ضریب شتاب مبنای طرح در این پروژه برابر ۰/۳۵ (منطقه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد)، سازه از نوع مسکونی، خاک منطقه مورد نظر از نوع ۲ و همچنین ضریب رفتار در جهت X برابر ۱۰ و در جهت Y برابر ۶ لحاظ شده است. ضریب مقیاس طیف‌ها در جهت X و Y به ترتیب ۰/۳۴۳ و ۰/۵۶۸ در نظر گرفته شده است؛ بنابراین طیف در جهت X، ۰/۶۰۳ طیف در جهت Y می‌باشد. همچنین در ترکیب بارها یک حالت خاص که شامل ۳۰+۱۰۰ درصد باشد نیز تعریف شده است.

پس از انجام تحلیل طیفی، مد حاکم در جهت X مد اول و در جهت Y مد پنجم به دست آمده است. در روش تاریخچه زمانی با رعایت کردن ملاحظات کلی در تعیین شتاب‌نگاشت‌ها و پس از مقیاس کردن آنها مطابق دستورالعمل آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ [۱] و لحاظ کردن هر زوج شتاب‌نگاشت به‌صورت عمود بر هم نتایج خروجی تحلیل حاصل و با روش‌های استاتیکی و طیفی مقایسه گردید. سپس زوج شتاب‌نگاشت‌ها در گام‌های ۱۰ درجه برای زوایای ۹۰- درجه تا ۹۰+ درجه به سازه اعمال شدند. در جدول (۲) پارامترهای مربوط به شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در این تحقیق آورده شده است.

جدول (۲): *پارامترهای شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده.*

شتاب‌نگاشت	PGA		ضریب مقیاس	مدت زمان زلزله (ثانیه)	گام زمانی	تعداد گام زمانی
	مؤلفه X	مؤلفه Y				
دوزجه	۰/۳۴۸	۰/۵۳۵	۱/۴۲۲	۲۵/۸۸	۰/۰۰۵	۵۱۷۶
لوماپریتا	۰/۲۷۶	۰/۲۵۸	۱/۶۰۸	۴۹/۹۹	۰/۰۰۵	۹۹۹۹
امپریال والی	۰/۵۸۸	۰/۷۷۵	۱/۴۹	۳۷/۶	۰/۰۰۵	۷۵۲۰
چی چی	۰/۳۵۵	۰/۳۵۸	۱/۶۰۸	۷۹/۴۱۶	۰/۰۰۴	۱۹۸۵۴
اریزکن	۰/۴۹۶	۰/۵۱۵	۲/۰۲۹	۲۰/۷۷۵	۰/۰۰۵	۴۱۵۵
ایوات	۰/۳۶۵	۰/۳۶۷	۱/۸۱۴	۳۰	۰/۰۱	۲۹۹۹۹
کاپ‌مندوسینو	۰/۵۹۰	۰/۶۶۲	۱/۹۴۱	۳۵/۹۸	۰/۰۲	۱۷۹۹

برای ترکیب اثر ۳۰+۱۰۰ درصد حالت بار نیز در تحلیل تاریخچه زمانی خطی در نرم‌افزار تعریف گردید. در این پژوهش از روش هندسی لوپز و تورس [۵] نیز برای تعیین زاویه‌ی بحرانی و ماکزیمم پاسخ استفاده گردید. در تمامی تحلیل‌ها پارامتر اصلی مورد بررسی برش پایه‌ی سازه در جهات مختلف برای یافتن مقدار ماکزیمم آن می‌باشد.

در شکل (۳) محورهای اصلی و محورهای فرضی که زاویه‌ی θ با محورهای اصلی می‌سازند و همچنین ماکزیمم پاسخ قابل مشاهده است.

در واقع در این روش با پیدا کردن ضریب همبستگی در روش CQC و با استفاده از روش مودال زاویه بحرانی (رابطه ۱) و پاسخ بحرانی (رابطه ۲) به دست می‌آید. در این روش منظور از R_i پاسخ سازه در مود iام و منظور از R_j پاسخ سازه در مود jام می‌باشد و C_{ij} ضریب همبستگی در مود iام و jام می‌باشد.

$$\theta c = 1/2.\tan^{-1}\left\{\frac{2\sum\sum.C_{ij}\left[R_i^{2y}R_j^{2x}-R_i^{1x}R_j^{1y}\right]}{(R^{1y})^2+(R^{2x})^2-(R^{1x})^2-(R^{2y})^2}\right\} \quad (۱)$$

$$R=\begin{Bmatrix}[(R^{1x})^2+(R^{2y})^2]\cos\theta^2+\\ [(R^{1y})^2+(R^{2x})^2]\sin\theta^2+\\ 2\sin\theta.\cos\theta[\sum_i\sum_j C_{ij}R_i^{1x}R_j^{1y}-\\ \sum_i\sum_j C_{ij}R_i^{2y}R_j^{2x}\end{Bmatrix} \quad (۲)$$

در این روش ابتدا طیف ۱ به سازه در امتداد محور X اثر داده شده و پاسخ‌های سازه در امتداد محور X و Y (R^{1X},R^{1Y}) محاسبه می‌گردد و سپس طیف ۲ در امتداد محور Y به سازه اثر داده شد و پاسخ‌های سازه در امتداد محور Y و X (R^{2X},R^{2Y}) حاصل می‌شود. پاسخ‌های مودال برای هر چهار حالت به کمک روابط (۳) تا (۸) قابل محاسبه است.

$$R^{1X}=\sqrt{\sum_i\sum_j C_{ij}R_i^{1x}R_j^{1x}} \quad (۳)$$

$$R^{1y}=\sqrt{\sum_i\sum_j C_{ij}R_i^{1y}R_j^{1y}} \quad (۴)$$

$$R^{2X}=\sqrt{\sum_i\sum_j C_{ij}R_i^{2x}R_j^{2x}} \quad (۵)$$

$$R^{2y}=\sqrt{\sum_i\sum_j C_{ij}R_i^{2y}R_j^{2y}} \quad (۶)$$

$$R^{1}=\sqrt{\sum_i\sum_j C_{ij}R_i^{1}R_j^{1}} \quad (۷)$$

$$R^{2}=\sqrt{\sum_i\sum_j C_{ij}R_i^{2}R_j^{2}} \quad (۸)$$

در انتها با استفاده از رابطه‌ی (۱) دو زاویه‌ی بحرانی حاصل خواهد شد که با اعمال این دو زاویه در رابطه (۲) پاسخ بحرانی سازه به دست خواهد آمد.

در این تحقیق نیز با استفاده از روش لوپز و تورس [۵] که محاسبات آن به‌صورت دستی بوده و نیاز به کد نویسی دارد جهت مقایسه با روش‌های دقیق نرم‌افزاری استفاده شده است.

۵- نتایج تحلیل سازه‌ها

همان‌طورکه در قسمت قبلی اشاره گردید در این پژوهش تحلیل طیفی و تحلیل تاریخچه زمانی خطی به روش جاروب کردن زاویه‌ای (۹۰- درجه تا ۹۰+ درجه) انجام گردید و در نهایت تحلیل هندسی به روش لوپز و تورس [۵] جهت مقایسه با تحلیل‌های دقیق نرم‌افزاری انجام شده است. پارامترهای مورد بررسی در تحلیل‌های فوق برش پایه در دو جهت در شرایط کاملاً نامنظم هندسی می‌باشد.

در جدول (۳) برش پایه منتج شده از تحلیل‌های نرم‌افزاری در جهات اصلی سازه (X, Y) با و بدون اعمال ۳۰+۱۰۰ درصد آورده شده است.

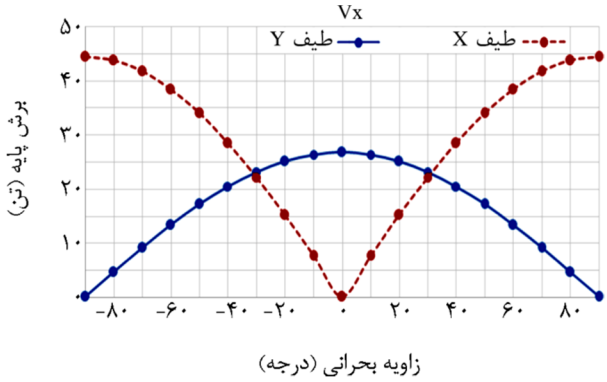
جدول (۳): *برش پایه حاصل شده بر اساس تحلیل‌های مختلف.*

نوع تحلیل	بدون اعمال ۳۰+۱۰۰ درصد		با اعمال ۳۰+۱۰۰ درصد	
	Vx (تن)	*Vy* (تن)	*Vx* (تن)	*Vy* (تن)
استاتیکی	۶۸/۷۵	۱۱۵/۳۷	۱۰۳/۳۶	۱۳۶
طیفی	۲۶/۷۶	۹۳/۵۱	۵۵	۱۰۳/۶۷
تاریخچه زمانی	۸۲	۲۶۷	۱۰۳	۳۳۸
لوپز و تورس	۲۶/۷۵	۹۳/۵		

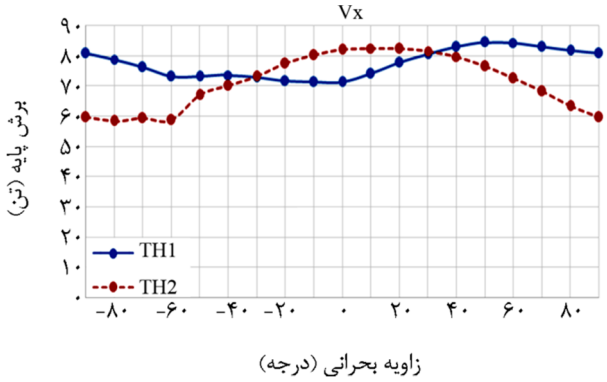
در تحلیل طیفی حالت SpecX و SpecY جهت تعریف اعمال طیف در جهات اصلی سازه در نرم‌افزار تعریف گردید. در شکل‌های (۴) و (۵) نمودار برش پایه در جهات X و Y در اثر اعمال هم‌زمان طیف در جهت X (SpecX) و طیف در جهت Y (SpecY) آمده است.

در تحلیل تاریخچه زمانی یک زوج شتاب‌نگاشت به‌طور هم‌زمان در دو راستای TH1 و TH2 تعریف شده است. در شکل‌های (۶) و (۷) نمودار برش پایه در جهات X و Y در اثر اعمال هم‌زمان زوج شتاب‌نگاشت قابل مشاهده است.

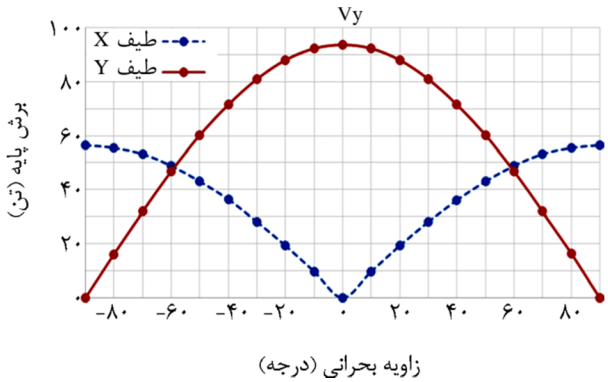
با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) خلاصه‌ی نتایج تحلیل طیفی جهت مقایسه با نیروی ۳۰+۱۰۰ درصد در جدول (۴) آورده شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش اثرات حرکت زمین در دو راستای متعامد به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به نمودارهای (۶) و (۷) خلاصه نتایج تحلیل تاریخچه زمانی به‌منظور مقایسه با نیروی ۳۰+۱۰۰ درصد در جدول (۵) آورده شده است.



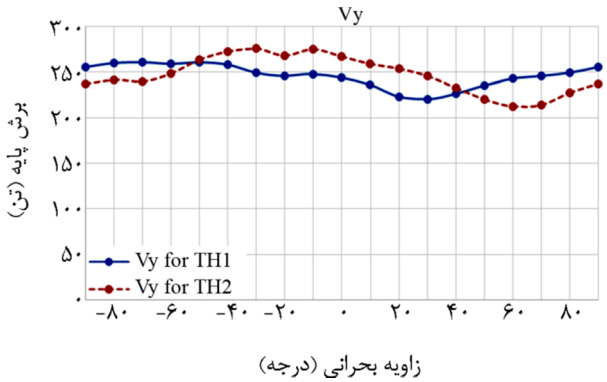
شکل (۴): *برش پایه حاصل شده از تحلیل طیفی در جهت X.*



شکل (۶): *برش پایه حاصل شده از تحلیل تاریخچه زمانی در جهت X.*



شکل (۵): *برش پایه حاصل شده از تحلیل طیفی در جهت Y.*



شکل (۷): *برش پایه حاصل شده از تحلیل تاریخچه زمانی در جهت Y.*

جدول (۴): *مقایسه‌ی برش پایه‌ی حاصل شده به روش طیفی با روش پیشنهادی آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ (۳۰+۱۰۰درصد).*

نوع تحلیل	جهت	زوایای بحرانی (درجه)	برش پایه (تن) برای زوایای بحرانی	برش پایه (تن) برای حالت ۳۰+۱۰۰ درصد	درصد جایگزین برای ۳۰٪
طیفی	X	-۶۰ ، +۶۰	۱۳/۳۹+۳۸/۴ = ۵۱/۷۹	۱۰۰٪(۲۶/۷۶) + ۳۰٪(۹۳/۵۱)=۵۴/۸۱	تن ۲۵/۰۳ = ۲۶/۷۶ -۵۱/۷۹ (۲۵/۰۳ ÷ ۲۶/۷۶) × ۱۰۰ = ۲۶/۶۷٪
طیفی	Y	-۳۰ ، +۳۰	۸۱+۲۸/۱۹ = ۱۰۹/۹۲	۱۰۰٪(۹۳/۵۱) + ۳۰٪(۲۶/۷۶)= ۱۰۱/۵۳	تن ۱۶/۴۱ = ۹۳/۵۱ -۱۰۹/۹۲ (۱۶/۴۱ ÷ ۲۶/۷۶) × ۱۰۰ = ۶۱/۳٪

جدول (۵): *مقایسه‌ی برش پایه‌ی حاصل شده به روش تاریخچه زمانی با روش پیشنهادی آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ (۳۰+۱۰۰ درصد)*

نوع تحلیل	جهت	زاویه بحرانی (درجه)	برش پایه (تن) برای زاویه بحرانی	برش پایه (تن) برای حالت ۳۰+۱۰۰ درصد	درصد جایگزین برای ۳۰٪
تاریخچه زمانی	X	+۵۰	۸۴/۲۸	۱۰۰٪(۸۲) + ۳۰٪(۷۱/۱۵) =۱۰۳/۳۴	تن ۲/۲۸ = ۸۲ -۸۴/۲۸ (۲/۲۸ ÷ ۷۱/۱۵) × ۱۰۰ = ۳/۲٪
تاریخچه زمانی	Y	-۳۰	۲۷۵/۴	۱۰۰٪(۲۶۷) + ۳۰٪(۲۴۴) =۳۴۰/۲	تن ۸/۴ = ۲۶۷ -۲۷۵/۴ (۸/۴ ÷ ۲۴۴) × ۱۰۰ = ۳/۴٪

۶- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج تحلیل‌های سازه انتخابی و روش هندسی لوپز- تورس نتایج زیر مشاهده می‌گردد.

۱. مؤلفه‌ی برش پایه ماکزیمم طیفی جهت X با اعمال طیف‌های جهت X و Y به‌طور همزمان در زوایای ۶۰- درجه و ۶۰+ درجه حاصل شده است که در مقایسه‌ی

عددی با رابطه‌ی آیین‌نامه می‌توان گفت ۳۰+۱۰۰ درصد تقریباً با اختلاف جزئی با واقعیت برابر است (جدول ۴).

۲. مؤلفه‌ی برش پایه‌ی ماکزیمم طیفی جهت Y با اعمال طیف‌های جهت X, Y به‌طور هم‌زمان در زوایای ۳۰+ و ۳۰- درجه حاصل شده است. نتایج جدول (۴) حاکی از این موضوع است که عبارت ۶۱+۱۰۰ درصد به‌جای عبارت ۳۰+۱۰۰ درصد می‌تواند صحیح باشد؛ بنابراین در مدل‌سازی انتخابی (نامنظمی هندسی در پلان) عبارت آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ (۳۰+۱۰۰ درصد) برای محاسبه‌ی برش پایه در جهت Y منجر به مقداری کمتر از واقعیت می‌گردد.

۳. با توجه به متفاوت بودن سیستم باربر جانبی در جهات اصلی سازه و در نتیجه تفاوت در اعمال ضریب رفتار (R)، مشاهده می‌گردد که طیف در جهت Y، ۱/۶۵۷ برابر بزرگ‌تر از طیف در جهت X می‌باشد (Sa_2=1.657 Sa_1) و همین عدم یک‌شکل بودن طیف‌ها باعث شده است که برای طیف بزرگ‌تر (Sa_2) رابطه‌ی ۳۰+۱۰۰ منجر به مقادیر کمتر از واقعیت پاسخ‌ها گردد.

۴. مؤلفه برش پایه‌ی ماکزیمم با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی در جهت X با اعمال زوج شتاب‌نگاشت‌ها به‌طور هم‌زمان در دو جهت اصلی در زاویه‌ی ۵۰+ درجه حاصل شده است که در مقایسه‌ی عددی با رابطه‌ی آیین‌نامه می‌توان ۴+۱۰۰ درصد را جایگزین نمود؛ بنابراین جهت محاسبه‌ی برش پایه‌ی ماکزیمم در جهت X رابطه ۳۰+۱۰۰ درصد آیین‌نامه نسبت به تحلیل تاریخچه زمانی تفاوت معنادار و بسیار دست بالایی دارد.

۵. مؤلفه‌ی برش پایه‌ی ماکزیمم با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی در جهت Y، با اعمال زوج شتاب‌نگاشت‌ها به‌طور هم‌زمان در دو جهت اصلی در زاویه‌ی ۳۰- درجه حاصل شده است که در مقایسه‌ی عددی با رابطه‌ی آیین‌نامه ۴+۱۰۰ درصد را جایگزین نمود؛ بنابراین جهت محاسبه‌ی برش پایه‌ی ماکزیمم در جهت Y رابطه ۳۰+۱۰۰ درصد آیین‌نامه ۲۸۰۰ نسبت به پاسخ تحلیل تاریخچه زمانی تفاوت معنادار و بسیار دست بالایی دارد.

۶. زاویه‌ی بحرانی حاصل شده از روابط هندسی لوپز-تورس حاکی از آن است که در صورت استفاده از رابطه‌ی آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ و تحلیل با روش لوپز-تورس، ۴۷+۱۰۰ درصد باید جایگزین ۳۰+۱۰۰ درصد گردد.

۷. پیشنهاد می‌گردد برای سازه‌هایی با تعداد طبقات بیشتر و استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی نتایج با رابطه‌ی پیشنهادی آیین‌نامه کنترل گردد.

مراجع

۱. کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، (۱۳۸۴) *آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد* ۲۸۰۰. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

2. Rosenblueh, E. and Contreras, H. (1977) Approximate design for multicomponent earthquakes. *Journal of the Engineering, Mechanics Division,* **103**(EM5), 881-893.

3. Wilson, E., Suharwardy, I., and Habibullah, A. (1995) A clarification of the orthogonal effects in a three-dimensional seismic analysis. *Earthquake Spectra*, **11**(4), 659-666.

4. Smeby, W. and Kiureghian, D. (1985) Modal combinations rules for multicomponent earthquake excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **13**, 1-12.

5. Lopez, O.A. and Torres, R. (1996) Determination of maximum structural response to two horizontal ground motion component applied along any arbitrary directions for application to buildings codes. *11th World Conf. on Earthquake Engineering.*

6. Lopez, O.A., Chopra, A.K., and Hernandez, J. (2001) Evaluation of combination rules for maximum response calculation in

multicomponent seismic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* **30**, 1379-1398.

7. Khoshnoudian, F. and Poursha, M. (2004) Responses of three dimensional buildings under bi-directional and unidirectional seismic excitations. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
8. Penzien, J. and Watabe, M. (1975) Characteristics of 3-D Earthquake Ground Motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **3**, 365-373.