

مقایسه تغییرات پاسخ ناشی از راستای اعمال مؤلفه‌های متعامد افقی شتاب‌نگاشت زلزله

بهرخ حسینی هاشمی (استادیار)

مسعود حسن‌زاده (کارشناس ارشد)

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مجله علمی و پژوهشی شریف
اسفند ۱۳۸۷، شماره چهار و ششم، ص. ۱۰۳-۱۰۷، (پیدا شد نمی)

در تحلیل ساختمان‌ها به روش تاریخچه‌ی زمانی معمولاً مؤلفه‌های افقی و قائم شتاب‌نگاشت زلزله در دو جهت عمود بر امتدادهای اصلی ساختمان اثر داده می‌شوند و پاسخ‌های ایجاد شده در اعضاء ملاک طراحی قرار می‌گیرند. این پاسخ‌ها با تغییر زاویه‌ی شتاب‌نگاشت‌های متعامد افقی نسبت به محورهای اصلی ساختمان، تغییر خواهند کرد. در این نوشتار یک ساختمان فولادی منظم در پلان و ارتفاع به روش دینامیکی غیرخطی و با در نظر گرفتن هفت شتاب‌نگاشت تحلیل شده و زاویه‌ی بحرانی و نسبت افزایش پاسخ‌ها تعیین شده است. نتایج حاکی از متغیر بودن زاویه‌ی بحرانی با تغییر شتاب‌نگاشت است. میانگین زاویه‌ی بحرانی در ستون‌ها ۲۲/۵ درجه و در تیرها ۹۰ درجه به دست آمده است و پاسخ‌ها تا حدود ۷۳٪ افزایش نشان داده‌اند. همچنین افزایش شدت زلزله و افزایش رفتار غیرخطی در اعضای سازه‌ی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان‌دهنده‌ی تغییر زاویه‌ی بحرانی و افزایش نسبت پاسخ‌ها بر اثر افزایش شدت زلزله است.

واژگان کلیدی: مؤلفه‌های افقی شتاب‌نگاشت، زاویه‌ی بحرانی، بیشینه‌ی پاسخ، رفتار غیرخطی.

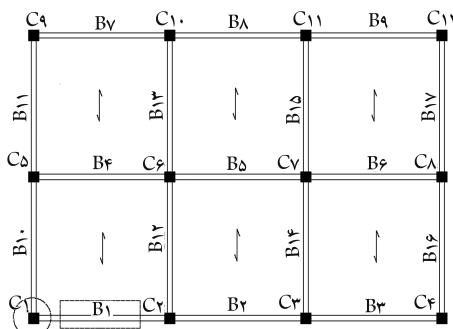
مقدمه

در آیین‌نامه‌های لرزه‌ی برای تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، دو مؤلفه‌ی افقی و قائم شتاب‌نگاشت زمین لرزه را در نظر می‌گیرند. در استاندارد ۲۸۰۰ که مبنای طراحی لرزه‌ی ساختمان‌ها در کشور است، هر زوج شتاب‌نگاشت به‌طور هم‌زمان در دو جهت عمود بر هم و در امتدادهای اصلی ساختمان اثر داده می‌شوند. هنگامی که مؤلفه‌های شتاب‌نگاشت در راستای محورهای اصلی ساختمان در نظر گرفته نشوند، پاسخ اعضای سازه‌ی نسبت به حالتی که مؤلفه‌های شتاب‌نگاشت زمین لرزه با محورهای اصلی ساختمان هم‌راستا در نظر گرفته شده‌اند، متفاوت خواهد بود.^[۱] در عمل، زاویه‌ی مؤلفه‌های متعامد شتاب‌نگاشت‌های زلزله نسبت به محورهای اصلی ساختمان، برای زلزله‌ی طرح مشخص نیست. بنابراین طراحی براساس مؤلفه‌هایی که در راستای محورهای اصلی ساختمان قرار دارند، ممکن است چندان قابل اطمینان نباشد. تحقیقات مختلفی بر روی زاویه‌ی که در آن پاسخ بیشینه رخ می‌دهد، صورت گرفته است. در بیشتر این تحقیقات از روش طیف پاسخ استفاده شده است.^[۲-۴] عده‌ی از محققین نشان دادند که زاویه‌ی بحرانی یک مؤلفه‌ی پاسخ می‌تواند تا ۲۰٪ بزرگ‌تر از زمانی باشد که مؤلفه‌های زمین لرزه در راستای محور اصلی ساختمان اثر داده شده‌اند.^[۵] همچنین در تحقیقی دیگر، مقدار لنگر خمشی و نیروی محوری ستون‌ها پارامترهای مورد بررسی بوده‌اند و تحلیل نیز به‌صورت خطی صورت گرفته است.^[۲] میزان پاسخ‌ها نسبت به زمانی که مؤلفه‌های شتاب‌نگاشت در راستای محورهای اصلی ساختمان در نظر گرفته شده بودند، تا حدود ۱۷۶٪ افزایش نشان می‌دهد.

مشخصات ساختمان مورد بررسی

در این نوشتار سعی شده تعیین زاویه‌ی بحرانی براساس تغییر شکل خمیری اعضاء باشد. بدین منظور پاسخ‌های ایجاد شده در یک ساختمان ۵ طبقه با سیستم قاب خمشی و با تغییر زاویه‌ی شتاب‌نگاشت‌های متعامد افقی زمین لرزه از صفر تا ۱۸۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. روش تحلیل غیرخطی بوده و برای مدل‌سازی غیرخطی اعضای سازه‌ی از دستورالعمل FEMA-۳۵۶^[۶] استفاده شده است. پارامترهای مورد بررسی نیز عبارت بوده است از «نسبت نیاز به ظرفیت تیرها و ستون‌ها در حالت ایمنی جانبی» براساس معیارهای پذیرش دستورالعمل FEMA-۳۵۶.

ساختمان مورد بررسی یک ساختمان ۵ طبقه فولادی است. ستون‌های این ساختمان در کلیه طبقات به‌شکل قوطی و به ابعاد ۳۰ × ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر انتخاب شده است. تیرها نیز در کلیه طبقات از نوع IPE۳۰۰ است. سقف این ساختمان به‌صورت دیافراگم صلب در نظر گرفته شده است و جرم به کلیه گره‌های سازه وارد شده است. ارتفاع کلیه طبقات ۳ متر است و فاصله‌ی کلیه دهانه‌ها نیز ۴ متر انتخاب شده است. نسبت میرایی برای کلیه حالت‌های ارتعاشی ساختمان برابر ۵٪ در نظر گرفته شده است. جرم هر یک از طبقات برابر ۷۲ تن است. در شکل ۱ پلان این ساختمان نشان داده شده است.



شکل ۱. پلان ساختمان.

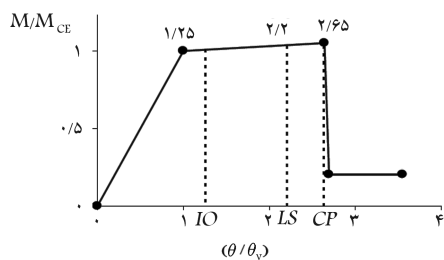
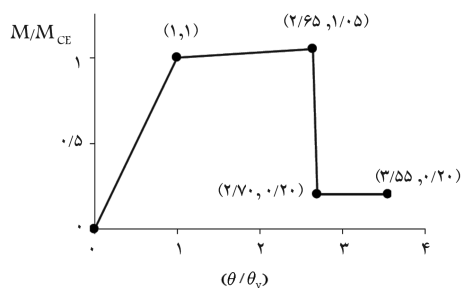
M مقدار لنگر خمشی، P_{YO} مقدار نیروی محوری تسلیم بدون در نظر گرفتن لنگر P_{CL} برای نیروی محوری فشاری و T_{CE} برای نیروی کششی) و M_{YO} مقدار لنگر خمشی تسلیم بدون در نظر گرفتن نیروی محوری (با همان M_{CE}) است. مقادیر در نظر گرفته شده برای توان‌های α و β به ترتیب برابر ۲ و ۱/۱ است. به ازای هر یک از مقادیر P و با در نظر گرفتن $f_{PM} = 1$ و حل معادله‌ی فوق برحسب M در هر دو جهت مقادیر M_{YPT} و M_{YPT} به دست می‌آید. با استفاده از این مقادیر و معادله‌ی ۷ می‌توان معادله‌ی سطح تسلیم فولاد را در صفحه‌ی $(M_T - M_T)$ به دست آورد.

$$f_{MM} = \left(\frac{M_T}{M_{YPT}} \right)^\gamma + \left(\frac{M_T}{M_{YPT}} \right)^\gamma \quad (7)$$

در معادله‌ی ۷ مقدار γ برابر ۱/۴ در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ ظرفیت ستون‌ها بدون در نظر گرفتن اندرکنش ارائه شده است. اثرات سخت‌شدگی کرنشی با در نظر گرفتن شیبی برابر ۳٪ شیب قسمت ارتجاعی در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن پارامترهای منحنی نیرو-تغییر مکان و معیارهای پذیرش، می‌توان از جدول ۵-۶ دستورالعمل FEMA-۳۵۶ استفاده کرد که در این مورد، در شکل ۲ این پارامترها و منحنی‌ها آمده است. چنان که مشاهده می‌شود در دورانی برابر $2/65\theta_y$ عضو با کاهش مقاومت همراه خواهد بود که میزان این کاهش ۲۰٪ مقاومت حد تسلیم است. منحنی ارائه شده به عنوان پوش منحنی هیستریزس است و عضو تحت بارهای لرزه‌یی از آن تبعیت می‌کند. در برنامه‌ی RAM-Perform، مدل‌های مختلف رفتار هیستریزس همچون مدل Takeda و... وجود ندارد و به جای آن از منحنی پوش استفاده می‌شود. برای کاهش سختی اعضا با افزایش چرخه‌ها از ضریب اتلاف انرژی

جدول ۱. ظرفیت ستون‌ها.

مشخصات	L(m)	۳
$3^\circ \times 3^\circ \text{ cm}(t = 1,5 \text{ cm})$	$M_T(t.m)$	۴۸,۲۸
	$M_T(t.m)$	۴۸,۲۸
	$P(\text{ton})$	۱۹۵,۷
	$T(\text{ton})$	۴۵,۱



شکل ۲. منحنی لنگر-دوران ستون‌ها و معیارهای پذیرش.

مدل‌سازی

روش تحلیل سازه غیرخطی بوده و برای مدل‌سازی از برنامه‌ی Perform3D^[۷] استفاده شده است. در تحلیل غیرخطی، تعیین منحنی نیرو-تغییر مکان برای هر عضو که بیان‌گر رفتار چرخه‌یی آن است ضرورت دارد. برای مدل‌سازی اعضا از ضوابط دستورالعمل FEMA-۳۵۶ استفاده شده است. ستون‌ها اعضایی هستند که تحت تأثیر اندرکنش نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی قرار دارند. و نیز با توجه به این که ستون‌ها از نظر نیروی محوری رفتاری ترد دارند، از کرانه‌ی پایین مقاومت برای ظرفیت فشاری، P_{CL} استفاده می‌شود:

$$P_{CL} = A F_{cr} \quad (1)$$

که در آن A سطح مقطع ستون و F_{cr} تنش بحرانی حد کمانش است. F_{cr} با استفاده از رابطه‌ی ۲ و ۳ به دست می‌آید:

$$\text{اگر } \lambda_c > 1/5 \Rightarrow F_{cr} = \frac{0,877}{\lambda_c^2} F_y \quad (2)$$

$$\text{اگر } \lambda_c \leq 1/5 \Rightarrow F_{cr} = (0,658 \lambda_c^2) F_y \quad (3)$$

در این رابطه‌ها:

$$\lambda_c = \left(\frac{KL}{r} \right)_{\max} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}}$$

رفتار ستون‌ها در کشش رفتاری نرم است؛ لذا مقاومت مورد انتظار ستون‌ها (T_{CE}) با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$T_{CE} = A F_{ye} \quad (4)$$

مقاومت خمشی مورد انتظار (M_{CE}) بدون در نظر گرفتن نیروی محوری، با استفاده از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$M_{CE} = Z F_{ye} \quad (5)$$

برای محاسبه‌ی سطح تنش تسلیم از روش تاویل-دیرلین^۱ استفاده شده است.^[۸] معادله‌ی سطح تسلیم فولاد در صفحه‌ی $(P - M)$ به شکل زیر است:

$$f_{PM} = \left(\frac{P}{P_{Y_0}} \right)^\alpha + \left(\frac{M}{M_{Y_0}} \right)^\beta \quad (6)$$

که در آن f_{PM} مقدار تابع تسلیم (برای حد تسلیم برابر ۱) P مقدار نیروی محوری،

نیاز به ظرفیت تیرها و ستون‌ها در حالت ایمنی جانبی براساس معیارهای پذیرش دستورالعمل FEMA-۳۵۶، و برای هر بارگذاری بیشترین مقادیر محاسبه شده است. در بخش دوم اثر افزایش رفتار غیرخطی در پاسخ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. روند انجام تحلیل مشابه بخش اول است. در این بخش، سازه تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های افقی زلزله‌ی السنترو قرار گرفته که بیشینه‌ی شتاب در آن، با مقادیر $0.75g$ ، $0.5g$ ، $0.25g$ و $0.1g$ مقیاس شده‌اند. پاسخ‌های به دست آمده در ستون C1 و تیر B1 مقایسه شده‌اند.

بررسی نتایج

برای بررسی نتایج حاصل از تغییر زاویه‌ی شتاب‌نگاشت‌های اعمالی بر پاسخ سازه، ضریبی به نام «ضریب اثر زاویه» را مطابق معادله‌ی ۸ تعریف می‌کنیم:

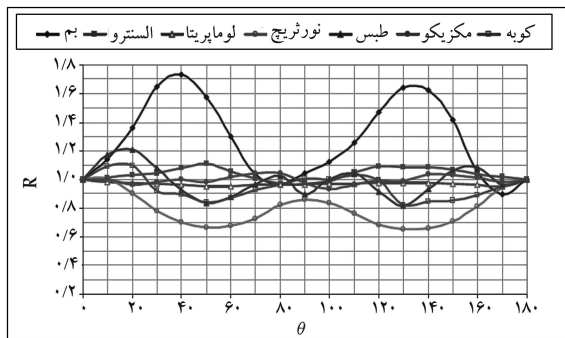
$$R(\theta_i) = \frac{DCR(\theta_i)}{DCR(\theta = 0)} \quad (8)$$

که در آن $DCR(\theta_i)$ بیانگر نیاز به ظرفیت برای زاویه‌ی θ_i و $DCR(\theta = 0)$ بیانگر نیاز به ظرفیت برای زاویه‌ی $\theta = 0$ است.

در شکل ۴ ضریب اثر زاویه برای ستون C1 ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود ضریب اثر زاویه، $R(\theta_i)$ ، در بیشتر زلزله‌ها از $1/2$ تجاوز نکرده و فقط در زلزله‌ی بم به $1/73$ رسیده است.

زاویه‌ی بحرانی در این زلزله 40° درجه است. نتایج به دست آمده حاکی از متفاوت بودن زاویه‌ی بحرانی و ضریب اثر آن از یک زلزله به زلزله‌ی دیگر است. در جدول ۳ زاویه‌ی بحرانی هر یک از زلزله‌ها و ضریب اثر زاویه‌ی آن، $R(\theta_i)$ ، برای ستون C1 ارائه شده است.

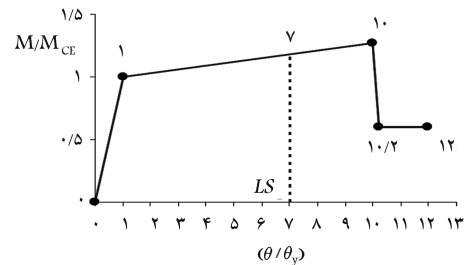
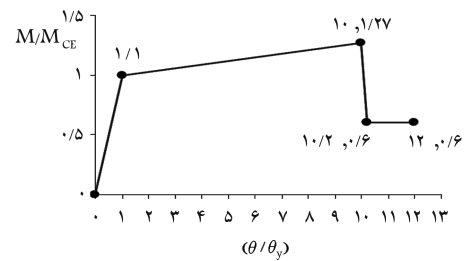
در شکل ۵ ضریب اثر زاویه برای تیر B1 ارائه شده است. چنان‌که مشاهده



شکل ۴. ضریب اثر زاویه برای ستون C1.

جدول ۳. زاویه‌ی بحرانی و ضریب اثر زاویه‌ی ستون C1.

زلزله	زاویه بحرانی (θ_{cr})	ضریب اثر زاویه $R(\theta_i)$
بم	40°	$1/73$
السنترو	50°	$1/11$
لوما پریتا	0°	$1/00$
نورثریچ	10°	$1/01$
طبس	20°	$1/20$
مکزیکو	80°	$1/04$
کوبه	20°	$1/10$



شکل ۳. منحنی لنگر-دوران تیرها و معیارهای پذیرش.

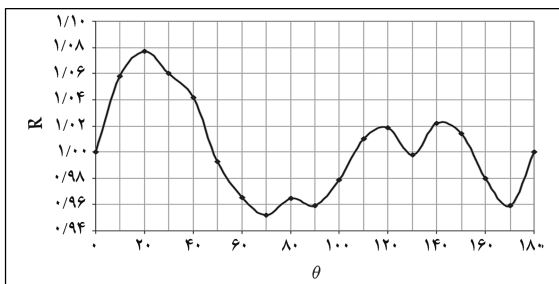
استفاده می‌شود. برای این منظور در نقاط مختلف از منحنی پوش این ضریب تعریف می‌شود. این ضریب بیانگر نسبت مساحت زیر منحنی بین دو حلقه‌ی متوالی است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد مقطع کلیه‌ی تیرها $IPE300$ است. مقاومت خمشی مورد انتظار تیرها (M_{CE}) که با استفاده از رابطه‌ی ۵ به دست آمده است، برابر $16/57$ تن است. منحنی نیرو-تغییر مکان و معیارهای پذیرش در نظر گرفته شده برای تیرها در شکل ۳ آمده است.

نحوه‌ی انجام تحلیل

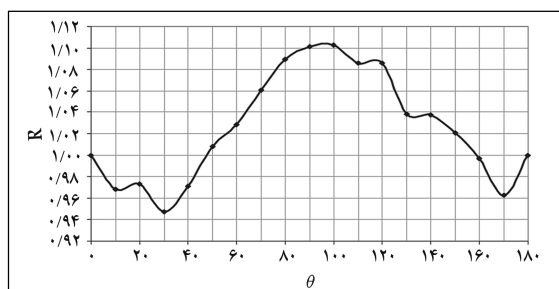
تحلیل‌های صورت‌گرفته شامل دو بخش است. در بخش اول، تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی با اعمال مؤلفه‌های متعامد افقی شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های ذکر شده در جدول ۲ تحلیل شده است. زلزله‌های در نظر گرفته شده محتوای فرکانسی متفاوتی دارند. سازه تحت اثر هر یک از این زلزله‌ها با تغییر زاویه‌ی مؤلفه‌های متعامد افقی شتاب‌نگاشت‌ها با راستاهای اصلی ساختمان، تحلیل شده است. همچنین پاسخ‌های به دست آمده در ستون C1 و تیر B1 که در طبقه‌ی همکف قرار دارند مقایسه شده است. موقعیت این اعضا در شکل ۱ نشان داده شده است. زوایای مورد بررسی، $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 180^\circ$ بوده و در حقیقت سازه برای هر یک از زلزله‌ها ۱۹ مرتبه تحلیل شده است. پارامترهای مورد بررسی عبارت‌اند از: نسبت

جدول ۲. زلزله‌های اعمال شده به سازه.

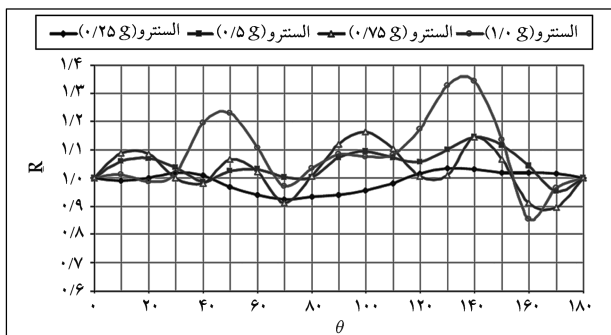
زلزله	بیشینه شتاب مؤلفه طولی (g)	بیشینه شتاب مؤلفه عرضی (g)
بم	$0/57$	$0/77$
السنترو	$0/31$	$0/21$
لوما پریتا	$0/41$	$0/47$
نورثریچ	$0/51$	$0/57$
طبس	$0/83$	$0/85$
مکزیکو	$0/62$	$0/59$
کوبه	$0/82$	$0/60$



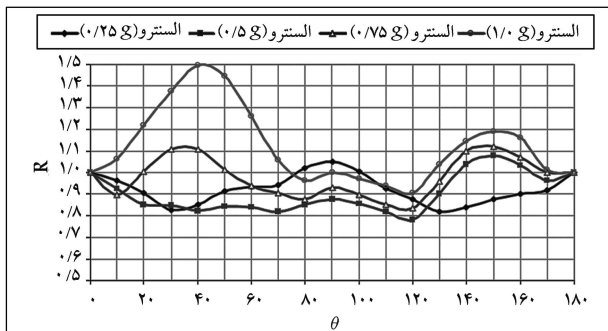
شکل ۶. میانگین ضریب اثر زاویه برای ستون C۱.



شکل ۷. میانگین ضریب اثر زاویه برای تیر B۱.

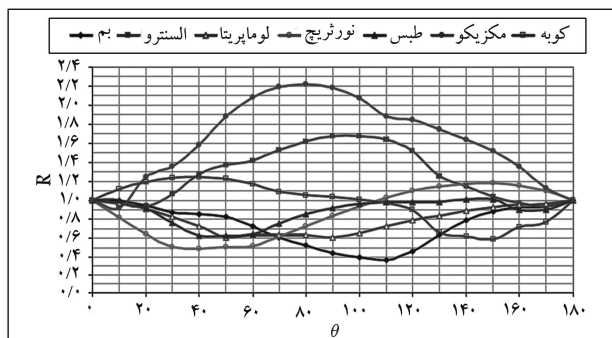


شکل ۸. اثر شدت زلزله بر ضریب اثر زاویه‌ی ستون C۱.



شکل ۹. اثر شدت زلزله بر ضریب اثر زاویه‌ی تیر B۱.

همچنین زاویه‌ی بحرانی پاسخ با افزایش رفتار غیرخطی تغییر کرده است و از زاویه‌ی ۱۳° در شتاب‌نگاشت با بیشینه شتاب ۰٫۲۵g، به ۱۴° درجه در شتاب‌نگاشت با بیشینه شتاب ۰٫۵g رسیده است و در بیشینه شتاب ۰٫۷۵g، زاویه‌ی بحرانی ۹° درجه است. مقدار ضریب اثر زاویه نیز با افزایش رفتار غیرخطی



شکل ۵. ضریب اثر زاویه برای تیر B۱.

جدول ۴. زاویه‌ی بحرانی و ضریب اثر زاویه تیر B۱.

زلزله	زاویه بحرانی (θ_{cr})	ضریب اثر زاویه $R(\theta_i)$
بم	۰	۱٫۰۰
السنترو	۹°	۱٫۶۷
لوما پریتا	۰	۱٫۰۰
نورث ریچ	۱۵°	۱٫۱۸
طیس	۱۵°	۱٫۰۱
مکزیکو	۸°	۲٫۲۱
کوبه	۴°	۱٫۲۵

می‌شود، ضریب اثر زاویه به مراتب بیش از ستون C۱ است و برای زلزله‌ی مکزیکو به بیش از ۲٫۲ می‌رسد. زاویه‌ی بحرانی در این زلزله ۸° درجه است. نتایج به دست آمده حاکی از متفاوت بودن زاویه‌ی بحرانی از زلزله‌ی دیگر است. در جدول ۴ زاویه‌ی بحرانی هر یک از زلزله‌ها و ضریب اثر زاویه‌ی آن $R(\theta_i)$ برای تیر B۱ ارائه شده است. در آیین‌نامه‌های طراحی، پاسخ نهایی از میانگین پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها به دست می‌آید تا محتمل‌ترین پاسخ برای طراحی انتخاب شود. بنابراین میانگین مقادیر پاسخ‌ها محاسبه، و برای ستون C۱ و تیر B۱ به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. چنان‌که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، پاسخ بیشینه برای ستون در زاویه‌ی ۲۲٫۵ درجه، و در تیر در زاویه‌ی ۹° درجه رخ داده است. در حقیقت، برای تیرها زمانی به پاسخ بیشینه خواهیم رسید که شتاب‌نگاشت‌ها در راستای محورهای اصلی ساختمان اعمال شوند. نکته‌ی دیگری که از این شکل‌ها برداشت می‌شود این است که اگرچه پاسخ‌ها در یک زلزله ممکن است بر اثر تغییر زاویه دچار تغییرات زیادی شوند، میانگین پاسخ‌های ناشی از اثر چند شتاب‌نگاشت که می‌تواند معیار طراحی قرار گیرد حدود ۱۰ درصد افزایش خواهد داشت. بنابراین بهتر است علاوه بر شتاب‌نگاشت‌های هم‌زمان در دو جهت عمود بر هم و در امتدادهای اصلی سازه، در امتداد زاویه‌ی ۲۲٫۵ درجه نیز اثر داده شود تا پاسخ بیشینه در سازه حاصل شود.

به منظور بررسی اثر شدت رفتار غیرخطی در پاسخ‌ها، سازه تحت شتاب‌نگاشت‌های افقی زلزله‌ی السنترو که بیشینه‌ی شتاب در آن با مقادیر ۰٫۲۵g، ۰٫۵g، ۰٫۷۵g و ۱g مقیاس شده‌اند، قرار گرفته و پاسخ‌های به دست آمده در ستون C۱ و تیر B۱ مقایسه شده است. نتایج حاصله که در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده‌اند حاکی از این است که با افزایش شدت زلزله و افزایش رفتار غیرخطی در ستون، حساسیت تغییرات در پاسخ‌ها زیاد شده و تعداد فرازها و فرودها افزایش یافته است.

جدول ۵. زاویه بحرانی و ضریب اثر زاویه برای زلزله السنترو.

زلزله السنترو	زاویه بحرانی (θ_{cr})		ضریب اثر زاویه ($R(\theta_i)$)	
	تیر	ستون	تیر	ستون
۰/۲۵g	۹°	۱۳°	۱/۰۵	۱/۰۴
۰/۵۰g	۱۵°	۱۴°	۱/۰۸	۱/۱۴
۰/۷۵g	۱۵°	۹°	۱/۱۲	۱/۱۶
۱g	۴°	۱۴°	۱/۰۵	۱/۳۴

نتیجه‌گیری

۱. زاویه بحرانی و ضریب اثر زاویه از هر زلزله به زلزله‌ی دیگر متفاوت است.
۲. در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ به‌منظور تحلیل دینامیکی از شتاب‌نگاشت‌های متعامد در جهت‌های اصلی ساختمان استفاده می‌شود. اما میانگین نتایج حاصل از زلزله‌های مختلف بیان‌گر این است که پاسخ بیشینه برای ستون‌ها در زاویه‌ی ۲۲/۵ درجه و برای تیرها در زاویه‌ی ۹° درجه رخ خواهد داد. بنابراین بهتر است علاوه بر شتاب‌نگاشت‌های هم‌زمان در دو جهت عمود بر هم و در امتداد‌های اصلی سازه، در امتداد زاویه‌ی ۲۲/۵ نیز اثر داده شود تا پاسخ بیشینه در سازه حاصل شود.
۳. افزایش شدت زلزله و به‌طبیع آن، افزایش رفتار غیرخطی در سازه، سبب تغییر زاویه بحرانی و افزایش ضریب اثر زاویه خواهد شد.

افزایش یافته، و در بیشینه شتاب ۱g این افزایش نسبت به دیگر حالات بیشتر بوده است. در مورد تیرها نیز وضعیت مشابهی مشاهده می‌شود. در جدول ۵ زاویه‌ی بحرانی هریک و ضریب اثر زاویه‌ی آن، $R(\theta_i)$ ، با افزایش شدت زلزله برای زلزله‌ی السنترو ارائه شده است.

پانویس

1. S.El-Tawil and G. Deierlein

منابع

1. Penzien, J.; and Watabe, M. "Characteristics of 3-D earthquake ground motion" *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* **13**, PP. 365-373 (1975).
2. Athanatopoulou, A.M; Tsourekas, A. and Papamanolis, G. "Variation of response with incident angle under two horizontal correlated seismic components", *Earthquake Resistant Engineering Structures V*. WIT press, Southampton, (sep.2005).
3. Anastassiadis. K.; Avramidis, I. and Panetsos, P. "Concurrent design forces in structures under three-

component orthotropic seismic excitation", *Earthquake Spectra*, **18**, PP. 1-17 (2002).

4. Lopez, O.A. and Torres R. "The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response.", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **26**, pp.881-894,(1997).
5. Lopez, O.A.; Chopra, A.K. and Hernandez, J.J. "Evaluation of combination rules for maximum response calculation in multicomponent seismic analysis", *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **30**, pp. 1379-1398 (2001).
6. FEMA 356, "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buldings.", Building Seismic Safety Council, Washington, DC., (2000).
7. RAM Perform 3D. "User manual", RAM International, Carlsbad, CA, (October 2000).
8. El-Tawil, Deierlein G. "Nonlinear analysis of mixed steel-concrete frame, part I and II.", *Journal of Structural Engineering*, **126**(6), (June 2001).