

مهاربندهای کمانش تاب طول کوتاه: روش طراحی و بررسی رفتار لرزه‌ای

سید علی رضوی طباطبایی

استادیار مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

* تهران، صندوق پستی ۸۷۱-۱۳۱۴۵، arazavi@usc.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹)

چکیده

مهاربندهای کمانش تاب با توجه به شکل پذیری بالا و رفتار تقریباً یکسان در کشش و فشار، مدت‌ها است که در کشورهای پیشرفته دنیا به کار گرفته می‌شود. یکی از بهبودها بر روی این سیستم، استفاده از مهاربندهای کمانش تاب با طول کمتر نسبت به نوع متعارف این سیستم می‌باشد. مهاربند کمانش تاب طول کوتاه دارای مزیت‌هایی نظیر امکان انتخاب مستقل دو پارامتر سختی و مقاومت، کاهش هزینه ساخت، انعطاف در موقعیت نصب و افزایش سختی پس از تسلیم می‌باشد. در این مقاله ابتدا به معرفی طرح پیشنهادی و مزیت‌های کاهش طول در مهاربند کمانش تاب پرداخته و سپس مبانی طراحی لرزه‌ای این روش بیان می‌شود. در ادامه دو ساختمان ۷ طبقه با یک پلان متعارف با مهاربند کمانش تاب متعارف و طول کوتاه مورد طراحی قرار می‌گیرد و نتایج طراحی ارائه می‌شود. به منظور درک بهتر و مقایسه این نوع مهاربند، نتایج مقایسه‌ای طراحی لرزه‌ای و تحلیل تاریخچه زمانی برای مهاربند کمانش تاب و مهاربند کمانش تاب طول کوتاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. از نقطه نظر وزن مصالح مصرفی، وزن سازه با مهاربند کمانش تاب طول کوتاه در حدود ۶ درصد از سازه با مهاربند کمانش تاب طول بلند سبک‌تر است. نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نشان می‌دهد میانگین حداکثر تغییر مکان در سازه با مهاربند کمانش تاب طول کوتاه، نسبت به سازه با مهاربند کمانش تاب متداول در زلزله DBE و MCE به ترتیب ۲۳٪ و ۲۶٪ کاهش دارد. به طور کلی نتایج تحلیل حاکی از عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تر سیستم‌های مهاربندی کمانش تاب با طول کوتاه می‌باشد.

واژگان کلیدی

مهاربند کمانش تاب با طول کوتاه (RLBRB)، مبانی طراحی، مهاربند کمانش تاب (BRB)، تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover)، تحلیل تاریخچه زمانی

Design of reduced length buckling restrained brace (RLBRB)

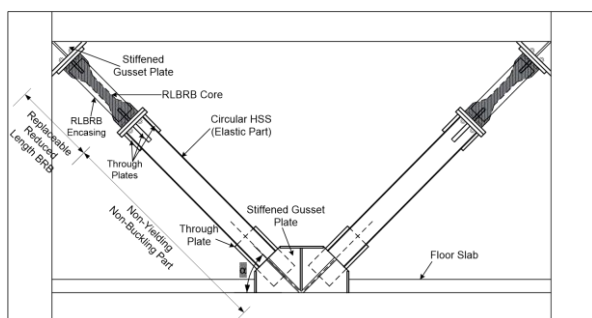
S.A. Razavi

Abstract

The bracing elements experience both tensile and compressive forces during an earthquake; however buckling is critical in bracing members. Buckling-Restrained brace (BRB) - in which the buckling is prohibited - have long been used in developed countries due to their high ductility and similar behavior in tension and compression. One of the improvements on this system is the use of BRB with reduced length rather than the whole brace as in conventional BRBs. Reduced length BRB systems have advantages such as independent selection of two parameters of stiffness and strength, reduced construction cost, flexibility in installation position, and increasing stiffness after yielding. In this study the proposed reduced length BRB system is presented. The basics of seismic design of reduced length BRB frames are expressed. Afterwards a benchmark structure once equipped with conventional and another one with reduced-length BRB is designed and the result of design is presented. The comparative results of seismic design and time history analysis for BRB structure and reduced length Buckling-Restrained brace (RLBRB) structure are discussed. The weight of elements of structure with reduced length BRB (RLBRB) is 6% lighter than the structure with BRB. The mean maximum drifts of the RLBRB structure in DBE and MCE earthquake are 23% and 26% lesser than the BRB structure. Generally the results of the nonlinear analysis show better seismic performance of RLBRB in comparison to conventional BRB.

Keywords

Reduced length buckling restrained brace (RLBRB), Design basic, Buckling restrained brace (BRB), Nonlinear static analysis (Pushover), Time history analysis



شکل ۲- کاربرد مهاربند کمانش تاب با طول کوتاه در قاب [۲]

بار لرزه‌ای اعمالی بر قاب با عبور از هسته قسمت کمانش تاب وارد قسمت الاستیک می‌شود.

قسمت الاستیک به نحوی طراحی می‌شود که با لحاظ نمودن ضریب اطمینان، در اثر بروز حداکثر نیروهای مورد انتظار در هسته، قسمت کمانش تاب در کشش دچار تسلیم نشده و در فشار نیز کل مهاربند کمانش نکرده و دچار تسلیم نشود. در مجموعه مهاربند، هسته عنصر کنترل‌شونده توسط تغییرمکان^۲ و ادامه مهاربند عضو کنترل‌شونده توسط نیرو^۳ می‌باشد.

کاهش طول مهاربند کمانش تاب مزایای متعددی در پی دارد. در طراحی و تناسب‌بندی سازه‌ها امکان انتخاب مستقل دو پارامتر سختی و مقاومت مطلوبیت زیادی دارد. در مهاربند کمانش تاب می‌توان به منظور تنظیم مقاومت، سطح مقطع را تغییر داد و به منظور تنظیم سختی طول را تغییر داد. یکی از معایب سیستم‌های مهاربند کمانش تاب متداول سختی پس‌از تسلیم کم آنهاست که می‌تواند منجر به تغییرمکان‌های حداکثر و تغییرمکان‌های ماندگار بزرگ شود [۳]. در صورت کاهش طول مهاربند کمانش تاب به دلیل افزایش سختی این قطعه در اثر کاهش طول، سختی مجموعه بعد از تسلیم قسمت کمانش تاب نیز متناسباً افزایش یافته و نسبت به مهاربند کمانش تاب معمولی به طور مشهودی بیشتر است. شکل (۳) به خوبی تفاوت سختی پس از تسلیم در مهاربند کمانش تاب معمولی (BRB) و مهاربند کمانش تاب طول کوتاه (RLBB) نشان می‌دهد.

بر اساس مطالعات موردی صورت گرفته در کشورهای صنعتی هزینه تولید مهاربند کمانش تاب در حدود ۵ تا ۷ برابر مهاربند معمولی همگرای معادل آن می‌باشد [۴]. لذا مهاربندی که قسمت عمده آن از یک مقطع متداول فولادی نظیر دویل ناودانی یا لوله تشکیل شده است و قسمت محدودی از آن به صورت کمانش تاب است، ارزان‌تر از مهاربند کمانش تاب تمام

۱- مقدمه

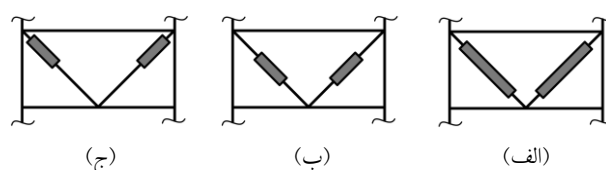
یکی از سیستم‌های لرزه‌ای با شکل‌پذیری و جذب انرژی بالا، مهاربند کمانش تاب (BRB)^۱ می‌باشد که با اعمال جزئیات مناسب در اعضای این نوع مهاربند از کمانش آن جلوگیری می‌شود.

مهاربندهای کمانش تاب از یک هسته مرکزی فولادی و پوشش پیرامونی از مصالح بتن یا فولاد تشکیل یافته‌اند. این هسته به گونه‌ای طراحی می‌شود که عضو فشاری و کششی همزمان به مرحله تسلیم برسد. برای جلوگیری از کمانش کلی در فشار، هسته فولادی درون یک پوشش قرار می‌گیرد. مهاربندهای کمانش تاب دارای نقاط ضعف متعددی می‌باشند که از جمله آنها می‌توان به اضافه مقاومت محدود، تغییرشکل‌های ماندگار زیاد و تمرکز تغییرمکان نسبی زیاد در برخی طبقات اشاره نمود [۱]. در این مقاله شیوه متمایزی در مهاربندهای کمانش تاب مورد بررسی قرار می‌گیرد که به "مهاربند کمانش تاب طول کوتاه" معروف است و پس از معرفی و ذکر مزیت‌های این روش، نتایج مقایسه روش متعارف و الگوی جدید در یک مدل سازه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مهاربند کمانش تاب طول کوتاه

۲-۱- معرفی طرح پیشنهادی

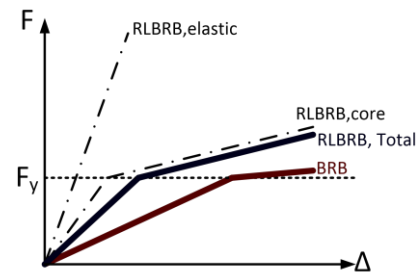
در مهاربندهای کمانش تاب متداول غلاف اکثر طول هسته را پوشش می‌دهد (شکل (۱)-الف). اما می‌توان غلاف را صرفاً بر روی طول محدودی از مهاربند و در میانه آن در نظر گرفت (شکل (۱)-ب). در مهاربند پیشنهادی در این پژوهش، قسمت تسلیم‌شونده به یک انتهای مهاربند هدایت شده و غلاف بر روی آن قرار می‌گیرد (شکل (۱)-ج).



شکل ۱- مهاربندهای کمانش تاب با جزئیات غلاف متفاوت

در طرح پیشنهادی مد نظر است که مهاربند کمانش تاب طول کوتاه، مانند یک میراگر فلزی در انتهای مهاربند در مجموعه قاب قرار گیرد. شکل (۲) الگوی به کارگیری طرح پیشنهادی در یک قاب را نشان می‌دهد.

طول می‌باشد. به بیان دیگر از آنجا که هزینه تولید مهاربند کمانش تاب تابع مستقیم مصالح مصرفی و مصالح مصرفی تابع طول آن می‌باشد، هر مقدار طول مهاربند کمتر شود، هزینه مهاربند کمانش تاب و به دنبال آن هزینه کلی اسکلت کاهش خواهد یافت. تاکنون مهاربندهای کمانش تاب صرفاً در الگوهای قطری و شورون به کاررفته‌اند. کاهش طول قسمت تسلیم‌شونده امکان استفاده الگوی X شکل و حتی Y شکل را فراهم می‌سازد.



شکل ۳- مقایسه سختی مهاربند کمانش تاب معمولی و طول کوتاه

کاهش طول مهاربند کمانش تاب باعث افزایش دامنه کرنش در هسته مهاربند می‌شود. کرنش مهاربندهای کمانش تاب متداول در حدود ۱-۲ درصد می‌باشد [۲]. با کاهش طول هسته، کرنش هسته افزایش می‌یابد. تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد، مهاربند کمانش تاب طول کوتاه در صورت رعایت جزئیات بندی مناسب می‌تواند تا کرنش‌های ۵-۶ درصد را در چرخه‌های بارگذاری تحمل نماید [۲]. از اثرات دیگر کاهش طول مهاربند کمانش تاب آن است که منحنی هیستریزس این نوع مهاربند به دلیل تحمل کرنش‌های بالا دارای سخت‌شوندگی کرنشی بیشتر و در نتیجه جذب انرژی بالاتر می‌باشد. همین موضوع باعث می‌شود پارامترهای محاسبه حداکثر ظرفیت مورد انتظار مهاربند (ω و β) در این مهاربندها بیشتر از مهاربندهای کمانش تاب متعارف باشد [۲ و ۵].

۳- روند طراحی مهاربند کمانش تاب طول کوتاه

به منظور طراحی مهاربند کمانش تاب طول کوتاه باید مراحل زیر به ترتیب طی شوند. لازم به ذکر است که روند طراحی در بیشتر موارد به صورت سعی و خطا در ابعاد می‌باشد.

۳-۱- تحلیل سازه و طراحی ثقلی عناصر

۳-۲- اضافه نمودن مهاربند، به صورت یک عضو تمام طول معادل با سطح مقطعی برابر هسته قسمت کمانش تاب با ضریب لاغری اندک، به نحوی که مقاومت فشاری آن در حد

مقاومت کششی باشد.

مهاربند معادل عضوی با سطح مقطع هسته و طولی برابر با طول کل مهاربند است. برای اصلاح سختی این مهاربند لازم است طبق رابطه (۱) و با انتخاب ضرایب فرضی برای $\alpha (L_c/L)$ و $\gamma (A_c/A)$ ضریب اصلاح محاسبه شود.

$$L_{eq,core} = \frac{1}{\alpha - \alpha\gamma + \gamma} K_{core} \quad (1)$$

در رابطه فوق L_c و A_c به ترتیب طول و مساحت هسته و L طول کل مهاربند و A مساحت قسمت خارج از هسته است. در تعیین سختی از رابطه (۱) مشخصات ورق اتصال و نواحی انتقالی مشابه قسمت الاستیک انتخاب شده است که فرضی منطقی می‌باشد. در صورت نیاز به تدقیق سختی مهاربند معادل، می‌توان ضریب افزایش سختی متناسب جزئیات ناحیه انتقالی و ورق اتصال را در سختی کل مهاربند ضرب نمود. ضریب اصلاح مربوط به ناحیه انتقالی و ورق اتصال معمولاً عددی بین ۱/۱ تا ۱/۵ می‌باشد.

به عنوان یک فرض اولیه انتخاب α مابین ۰/۲ و ۰/۳ و γ در حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ مناسب است. برحسب انتخاب مقادیر مختلف α و γ پیشنهاد شده، سختی معادلی (K_{eq}) بین ۲/۱ تا ۳/۲ ایجاد می‌شود.

۳-۳- تحلیل سازه بر اساس نیروهای کاهش یافته بر اساس ضریب رفتار (R_u) سیستم پیشنهادی

ضریب رفتار سازه پیشنهادی از ضریب رفتار سازه‌های متداول مهاربندی کمانش تاب بیشتر است [۶]، ولی می‌توان به صورت محافظه کارانه از همان ضریب رفتار سازه‌های متداول استفاده نمود.

۳-۴- تعیین مشخصات هسته بر اساس نتایج تحلیل

الف- تعیین مساحت هسته بر اساس نیروی کاهش یافته در مهاربندها بر اساس مقاومت کششی

$$A_c \geq \frac{P_E}{\phi F_y} \quad (2)$$

ب- تعیین هندسه هسته

بر اساس ملاحظات خستگی هسته ورق تخت و غیر صلیبی انتخاب می‌شود. نسبت عرض به ضخامت هسته بر اساس توصیه ضوابط لرزه‌ای بهتر است شرایط فشرده لرزه‌ای را برآورده نماید. انتخاب نسبت عرض به ضخامت بین ۶ تا ۸

براساس یافته‌های Iwata و همکارانش [۷] توصیه می‌شود.

۳-۵- کنترل معیار تغییرمکان در طبقات

پس از تعیین مقادیر تغییرمکان نسبی طبقات (Δ_w) براساس تحلیل الاستیک با ضرب ضریب تشدید تغییرمکان (C_d)، تغییرمکان واقعی طبقات محاسبه می‌شود. مقدار ضریب تشدید تغییرمکان در سیستم پیشنهادی نسبت به سیستم مهاربندی کمانش تاب متداول کمتر است، اما در غیاب آن می‌توان اعداد پیشنهادی آیین‌نامه‌ای که محافظه‌کارانه هستند (۵/۵ یا ۵/۰) را استفاده نمود.

$$\Delta_m = C_d \Delta_w \quad (۳)$$

در صورت عدم کفایت مهاربند انتخابی در کنترل تغییرمکان می‌توان طول هسته را کاهش داد. در صورتی که کاهش طول میسر نباشد، باید سطح مقطع هسته را افزایش داده شود. به‌عنوان یک توصیه کلی در روند طراحی بهتر است سعی شود تغییرمکان نسبی تمامی طبقات تقریباً برابر باشند. به‌منظور یکسان‌سازی توزیع تغییرمکان جانبی در ارتفاع ساختمان می‌توان طول و مساحت هسته را تغییر داد.

۳-۶- تعیین میزان تغییرشکل واقعی هسته مهاربند در زلزله طرح

براساس تغییرمکان واقعی طبقه، تغییرمکان واقعی مهاربند از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta_b = \Delta_m \cos \theta \quad (۴)$$

که در آن θ زاویه مهاربند با افق می‌باشد.

کرنش و تغییرشکل محوری هسته قطعه کمانش تاب با استفاده از رابطه (۵) تعیین می‌شود.

$$\varepsilon_c = \left[C_d \Delta_{bw} - \beta R_y \left(\frac{F_{ysc}}{E} \right) (1 - \alpha) L \right] \frac{1}{L_c} \quad (۵)$$

۳-۷- کنترل کفایت طول هسته بر مبنای خستگی

طول هسته پیش‌تر بر اساس پارامتر α فرض شده است. کنترل طول هسته از رابطه (۶) با لحاظ نمودن بحرانی‌ترین پروتکل بارگذاری ASCE 7-16 [۸] و پروتکل بارگذاری AISC 341-16 [۹] انجام می‌پذیرد.

$$L_c \geq \frac{\lambda' l c l}{\varepsilon_f} \Delta_{bm} \quad (۶)$$

که در آن λ' ، c و ε_f به ترتیب ضرایب تکرار چرخه‌ای، ضریب توانی شکل‌پذیری خستگی، و ضریب شکل‌پذیری خستگی می‌باشند.

در صورتی که طول قسمت تسلیم‌شونده کافی نباشد، باید طول هسته افزایش یافته و پارامتر α بروزرسانی شده و طراحی از گام ۲ تکرار شود.

۳-۸- تعیین حداکثر بار محوری مورد انتظار در کشش و فشار حداکثر بار محوری مورد انتظار که طبق AISC 341-16 [۹] به مقاومت محوری تطبیق‌یافته نامگذاری شده است، از روابط (۷) و (۸) تعیین می‌شود.

$$P_{abs,T} \geq \omega R_y P_{ysc} \quad (۷)$$

$$P_{abs,C} \geq \beta \omega R_y P_{ysc} \quad (۸)$$

نکته حایز اهمیت آن است که ضرایب ω و β در مهاربند پیشنهادی به دلیل پدیده سخت‌شوندگی کرنشی و تراز بالاتر کرنش‌ها نسبت به مهاربندهای کمانش تاب متداول بالاتر است. این ضرایب بر اساس نتایج آزمایش صورت گرفته بر مهاربند کمانش تاب با طول کوتاه و پوش منحنی هیستریزس قابل استخراج است. در غیاب وجود آزمایش، لحاظ نمودن ضریب $1/8$ برای ω و $1/3$ برای β پیشنهاد می‌شود.

۳-۹- طراحی قسمت الاستیک مهاربند

در گام‌های قبلی نسبت مساحت هسته به مساحت قسمت الاستیک (γ) انتخاب گردید. با مشخص بودن سطح مقطع قسمت الاستیک، در این قسمت اساس مقطع مورد نیاز انتخاب می‌شود. انتخاب مقاطع لوله‌ای یا مربع شکل یا دویل ناودانی گزینه‌های مناسب برای قسمت الاستیک می‌باشد. با برآورد حداکثر نیروی فشاری وارد بر مهاربند از گام قبل، طراحی قسمت الاستیک با کنترل رابطه (۹) صورت می‌پذیرد.

$$\frac{P_{abs,C}}{P_{cr}} + \frac{8}{9} \left(\frac{P_{abs,C} \delta_{max,x}}{M_{cx}} + \frac{P_{abs,C} \delta_{max,y}}{M_{cy}} \right) \leq 1 \quad (۹)$$

در صورتی که رابطه بالا برقرار نشود، باید ابتدا با حفظ مساحت قبلی، اساس مقطع قسمت الاستیک افزایش یابد و در صورتی که مجدداً رابطه برقرار نبود باید مساحت و اساس مقطع به‌طور توأم افزایش یابند و محاسبات از گام ۲ با بروزرسانی پارامتر γ تجدید شود.



۳-۱۰- تعیین طول موج کمانش در مودهای بالاتر و برآورد نیروی نرمال هسته بر روی غلاف

با معلوم بودن میزان کرنش در تغییر مکان $2\Delta_{bm}$ طول موج کمانش در مودهای بالاتر از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$l_n = \frac{2\pi\sqrt{E_t I_c}}{\sqrt{E_t A \left(\varepsilon_c + \frac{F_{ytc}}{h} \right) + \frac{\mu Q_0}{2}}} \quad (10)$$

که در آن E_t مدول تانژانت هسته مهاربند کمانش‌تاب، I_c ممان اینرسی هسته حول محور ضعیف، A مساحت هسته، ε_c حداکثر کرنش هسته، h مدول سخت‌شوندگی هسته، μ ضریب اصطکاک بین هسته و غلاف و Q_0 نیروی نرمال وارده از هسته بر روی غلاف با فرض عدم وجود اصطکاک می‌باشد.

۳-۱۱- طراحی غلاف قسمت کمانش‌تاب

طراحی غلاف شامل مواردی از قبیل طراحی غلاف مهاربند براساس کنترل پایداری خمش غلاف، کنترل خمش موضعی غلاف در راستای طولی و عرضی، طرح هندسی و ابعادی غلاف و ... می‌باشد.

۳-۱۲- کنترل پایداری کلی مهاربند براساس کمانش الاستیک

در این گام کمانش کلی مهاربند بر اساس کمانش الاستیک کل مهاربند و رابطه واتاناب اصلاح شده (۱۱) صورت می‌پذیرد.

$$\frac{P_{cr}}{P_y} \geq 3.5 \quad (11)$$

با توجه به گام طراحی قسمت الاستیک مهاربند و تعیین مشخصات آن، این گام نقش کنترل ممان اینرسی مورد نیاز غلاف را دارد. برای محاسبه بار کمانشی در رابطه (۱۱) به ممان اینرسی غلاف نیاز است، که با توجه به تعیین جزئیات‌بندی غلاف در بخش‌های قبلی قابل محاسبه است. در صورتی که رابطه (۱۱) ارضا نشود، باید ممان اینرسی غلاف افزایش یابد و مجدداً رابطه کنترل شود.

۳-۱۳- طراحی ورق اتصال

ورق اتصال انتهای مهاربند باید بر اساس حداکثر نیروی مورد انتظار مهاربند طراحی گردد و قادر به تحمل فشار و کششی حداکثر را داشته باشد. علاوه بر این، پایداری موضعی و کلی ورق اتصال باید تأمین شود. تعبیه سخت‌کننده به‌منظور جلوگیری از خمش خارج از صفحه مهاربند و همچنین محدود

کردن نسبت عرض به ضخامت ورق اتصال به $0.85\sqrt{E/F_y}$ و عدم تعبیه فاصله ($2\Delta_{bm}$) بین مهاربند و محور خمش ورق اتصال الزامی است.

۳-۱۴- طراحی و کنترل ظرفیتی یا تشدید یافته سایر اعضای واقع در مسیر نیرو نظیر تیر دهانه مهاربندی شورون و ستون‌های دهانه مهاربندی و سایر اعضا

۴- طراحی ساختمان نمونه

برای انتخاب و حصول دید مناسب نسبت به ظرفیت و مشخصات مهاربند کمانش‌تاب و متناسباً انجام مراحل طراحی آن، یک ساختمان هفت طبقه با پلان ۲۵ متر در جهت X و ۱۶ متر در جهت Y با زیربنای کلی ۲۸۰۰ متر مربع و ارتفاع طبقات ۳ متر با کاربری مسکونی در شهر تهران و خاک تیپ II در نظر گرفته می‌شود. ساختمان ابتدا با مهاربند کمانش‌تاب طول بلند و سپس با مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه طراحی می‌شود. نتایج طراحی دو ساختمان در بررسی پارامترهای سختی و تغییر مکان و همچنین مقایسه اقتصادی دو سازه استفاده می‌شود.

سیستم باربر جانبی سازه در هر دو راستا BRB با الگوی شورون در دو دهانه بدون قاب خمشی می‌باشد. سیستم باربر کف دال یکطرفه می‌باشد. ستون‌های ساختمان از نوع H از پروفیل $IPBv$ و تیرهای ثقلی ساختمان از IPE و تیرهای دهانه مهاربندی از $IPBv$ لحاظ شده‌اند. شکل (۴) پلان سازه را نشان می‌دهد. فولاد تمامی مقاطع و هسته BRB از رده ST-37 فرض می‌شود.

تفاوت سازه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب تمام‌طول و مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه در این است که در سازه RLBRB، مهاربند به دو بخش کمانش‌تاب (کنترل‌شونده توسط تغییر مکان) و بخش لوله الاستیک (کنترل‌شونده توسط نیرو) تقسیم شده است. پای ستون‌های سازه همگی گیردار در نظر گرفته شده است. تمامی تیرهای سازه غیر از تیرهای دهانه مهاربندی مفصلی هستند. به دلیل گیرداری ایجاد شده توسط ورق اتصال در داخل صفحه مهاربند، تیرهای دهانه مهاربندی گیردار لحاظ شده‌اند.

بار مرده مربوط به بتن سازه‌ای دال معادل بتنی با ارتفاع ۱۰۰ میلیمتر لحاظ شده‌است. سربار مرده تمامی طبقات ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، بار زنده طبقات ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع، بار زنده بام ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع بار دیوارهای پیرامونی در طبقات ۸۰۰ کیلوگرم بر متر طول و بار جان‌پناه بام ۳۰۰ کیلوگرم بر متر

منجر به افزایش تقاضای لنگر و برش در این تیر می شود که در نهایت تیر این دهانه بسیار قوی تر از تیر متناظر در قاب BRB خواهد بود. از آنجا که در فرضیات تحلیلی سازه، هسته مهاربند از گره تیر-ستون به وسط تیر دهانه مهاربندی متصل می شود، عملاً اثر نواحی انتقالی و قسمت های اتصال مهاربند کمانش تاب لحاظ نمی شود و سختی مهاربند به منظور لحاظ نمودن این اثرات در عدد $1/4$ ضرب شده است. نتایج طراحی به طور نمونه برای قاب های جهت X ساختمان، مطابق جدول (۱) می باشد.

جدول ۱- نتایج طراحی برای قاب های ۱ و ۵ (قاب های جهت X)

ساختمان RLBRB

ردیف	برش طبقه (kN)	مساحت هسته (mm ²)	مقطع قسمت الاستیک	مقطع تیر دهانه مهاربندی	مقطع ستون دهانه مهاربندی
۷	۶۴۴	۷۰۰	Pipe168×7.1	IPBv200	IPBv200
۶	۸۳۵	۱۰۰۰	Pipe194×8	IPBv200	IPBv200
۵	۱۱۵۰	۱۵۰۰	Pipe219×10	IPBv220	IPBv200
۴	۴۱۳۹	۱۵۰۰	Pipe219×10	IPBv220	IPBv300
۳	۸۱۵۶	۲۰۰۰	Pipe273×11	IPBv240	IPBv300
۲	۱۶۷۶	۲۰۰۰	Pipe273×11	IPBv240	IPBv450
۱	۱۷۲۴	۲۰۰۰	Pipe273×11	IPBv240	IPBv450

نتایج برای مهاربند BRB عیناً مشابه مهاربند RLBRB است، با این تفاوت که مقطع قسمت الاستیک در سازه BRB وجود ندارد. نتایج تحلیل مودال برای مهاربند BRB و RLBRB به ترتیب در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج تحلیل مودال ساختمان BRB

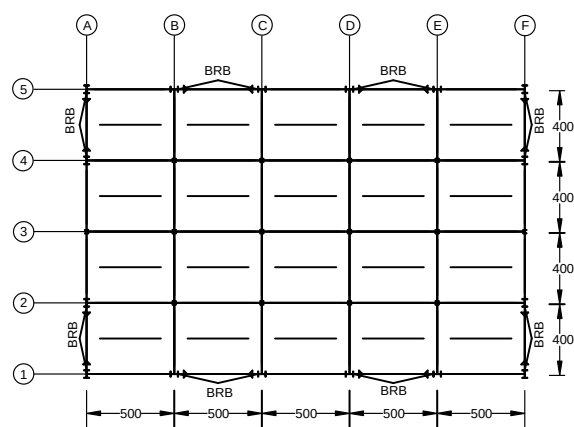
Participation	Shape	Period	Mode
۷۰/۰	U _y	۱/۰۸	۱
۷۲/۵	U _x	۱/۰۱	۲
۷۰/۹	R _z	۰/۶۸	۳

جدول ۳- نتایج تحلیل مودال ساختمان RLBRB

Participation	Shape	Period	Mode
۶۷/۳	U _y	۰/۹۵	۱
۶۹/۷	U _x	۰/۸۶	۲
۶۸/۰	R _z	۰/۵۹	۳

پریود مود اول در حدود ۱۳٪ و پریود مود دوم در

طول لحاظ شده است. با احتساب مشارکت ۲۰ درصد بار زنده و تمامی بارهای مرده در وزن مؤثر لرزه ای، وزن مؤثر لرزه ای سازه برابر است با ۲۲۶۷۹ کیلو نیوتن می باشد.



شکل ۴- پلان ساختمان هفت طبقه مجهز به مهاربند کمانش تاب

مطابق ASCE 7-16 [۸] ضریب رفتار سیستم مهاربند کمانش تاب در طراحی به روش حالت حدی برابر ۸ و ضریب تشدید تغییر مکان (C_d) ۵ در نظر گرفته می شود. برای تحلیل و طراحی ساختمان در برابر بار زلزله از روش استاتیکی معادل استفاده می شود. ضریب زلزله در هر دو جهت ساختمان برابر است با ۰/۰۷۶. این ضریب برای هر دو ساختمان مورد استفاده قرار می گیرد. ترکیبات بارگذاری برای طراحی به روش ضرایب بار و مقاومت بر اساس ASCE 7-16 انتخاب شده است. همچنین اثرات خروج از مرکزیت مثبت و منفی در بارهای زلزله دیده می شود.

ترکیبات بارگذاری تشدید یافته برای لحاظ نمودن اثر اضافه مقاومت ناشی از تشکیل مکانیسم مورد نظر در هنگام زلزله به منظور کنترل اعضای کنترل شونده توسط نیرو (نظیر ستون های دهانه مهاربندی) با لحاظ نمودن ضریب اضافه مقاومت ۲/۵ در نظر گرفته شده است. تیرهای دهانه مهاربندی برای حداکثر بار ناشی از نیروی نامتوازن مهاربندهای کمانش تاب در نیروی محوری، برش و خمش طراحی شده است. مزیت سیستم مهاربند کمانش تاب نسبت به مهاربند همگرای ویژه آن است که اولاً مقدار نیروی نامتوازن در مهاربند کمانش تاب بسیار کمتر است و ثانیاً در حالت متعارف ۸ شکل نیروی نامتوازن مهاربند کمانش تاب با نیروی ثقل در خلاف جهت هستند و منجر به کاهش تقاضای لنگر و برش در تیر دهانه شورون می شوند، اما در سیستم SCBF نیروی نامتوازن هم جهت با بار ثقل است و

با معادل کردن مهاربندهای به کار رفته در سازه فوق با سازه مهاربندی همگرای ویژه، وزن مصالح مصرفی دو ساختمان جهت مقایسه در جدول (۶) و (۷) آورده شده است.

جدول ۶- اوزان مصالح مصرفی ساختمان BRB

المان	مواد	وزن (kg)
Column	ST37	۵۴۳۹۲
Beam	ST37	۵۴۸۹۹
BRB	BRB	۴۰۶۰۷
مجموع		۱۴۹۸۹۸
وزن/سطح		۵۷

جدول ۷- اوزان مصالح مصرفی ساختمان RLBRB

المان	مواد	وزن (kg)
Column	ST37	۵۴۳۹۲
Beam	ST37	۵۴۸۹۹
Brace	ST37	۱۸۱۶۳
BRB	BRB	۱۳۴۸۲
مجموع		۱۴۰۹۳۶
وزن/سطح		۵۴

۴- تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی ساختمان هفت طبقه

به منظور بررسی و مقایسه عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مذکور، از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی استفاده می‌شود. بدین منظور قاب‌های جهت X مورد تحلیل قرار گرفته است. تحلیل‌های غیرخطی با استفاده از نرم افزار OPENSEES صورت گرفته است. تمامی اعضای سازه‌ای نظیر تیر، ستون، مهاربندها با استفاده از المان غیرخطی ForceBeamColumn مدل‌سازی شده‌اند و از مقاطع رشته‌ای استفاده شده است. اتصال المان‌ها به یکدیگر مطابق بر شرایط به کاررفته در مرحله طراحی لحاظ شده است. مدل رفتاری مقاطع بر اساس مصالح Steel02 با قابلیت سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و کینماتیک انتخاب شده است. پارامترهای این مصالح برای RLBRB براساس نتایج آزمایشگاهی کالیبره شده‌اند. برای برقرار نمودن دیافراگم صلب، تمامی گره‌های واقع در تراز هر طبقه با استفاده از RigidLink bar به یک نقطه شاخص مقید شده‌اند. به منظور لحاظ کردن اثر P-Delta در تحلیل‌های غیرخطی یک ستون با سختی محوری بالا با اتصالات مفصلی به سازه اصلی متصل شده است. این ستون در هر طبقه وزن معادل بارهای مرده و سهمی از بار زنده را تحمل می‌نماید. نمای قاب جهت X به همراه ستون

حدود ۱۵٪ نسبت به سازه مهاربند کمانش‌تاب طول بلند کمتر است که با احتساب جرم یکسان دو سازه، حاکی از آن است که سختی سازه طراحی شده با RLBRB مختصری افزایش یافته است، اما این موضوع باعث تغییری در تقاضای لرزه‌ای در حوزه طراحی خطی نمی‌شود، چرا که کماکان رابطه تجربی تعیین کننده تقاضای لرزه‌ای است. در ادامه تغییر مکان نسبی طبقات سازه در راستای X برای مهاربند BRB و RLBRB به ترتیب در جدول (۴) و (۵) آورده شده است.

جدول ۴- تغییرمکان جانبی طبقات در راستای X ساختمان BRB

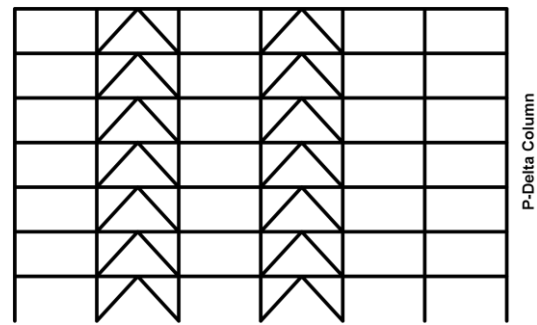
طبقه	U_x (mm)	ΔU_x (mm)	h (mm)	Δw_x (%)	Δm_x (%)
۷	۳۶/۹۶	۵/۷۳	۳۰۰۰	۰/۱۹	۰/۹۵
۶	۳۱/۲۴	۶/۶۶	۳۰۰۰	۰/۲۲	۱/۱۱
۵	۲۴/۵۸	۶/۱۲	۳۰۰۰	۰/۲۰	۱/۰۲
۴	۱۸/۴۵	۶/۱۱	۳۰۰۰	۰/۲۰	۱/۰۲
۳	۱۲/۳۴	۵/۰۳	۳۰۰۰	۰/۱۷	۰/۸۴
۲	۷/۳۱	۴/۴۲	۳۰۰۰	۰/۱۵	۰/۷۴
۱	۲/۸۹	۲/۸۹	۳۰۰۰	۰/۰۱	۰/۴۸

جدول ۵- تغییرمکان جانبی طبقات در راستای X ساختمان RLBRB

طبقه	U_x (mm)	ΔU_x (mm)	h (mm)	Δw_x (%)	Δm_x (%)
۷	۲۷/۷۴	۴/۷۹	۳۰۰۰	۰/۱۶	۰/۸۰
۶	۲۲/۹۵	۵/۱۷	۳۰۰۰	۰/۱۷	۰/۸۶
۵	۱۷/۷۸	۴/۹۶	۳۰۰۰	۰/۱۷	۰/۸۳
۴	۱۲/۸۳	۴/۵۳	۳۰۰۰	۰/۱۵	۰/۷۵
۳	۸/۳۰	۳/۵۴	۳۰۰۰	۰/۱۲	۰/۵۹
۲	۴/۷۷	۲/۹۳	۳۰۰۰	۰/۰۱	۰/۴۹
۱	۱/۸۴	۱/۸۴	۳۰۰۰	۰/۰۶	۰/۳۰

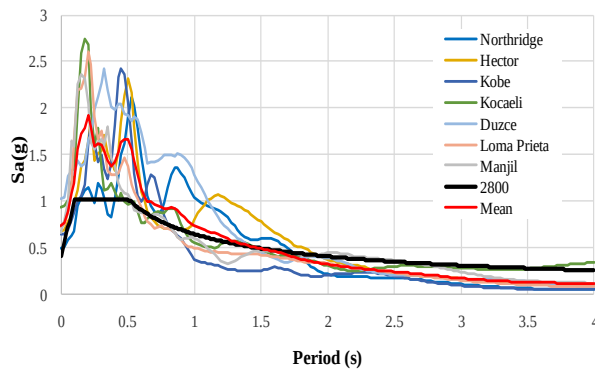
همان‌طور که انتظار می‌رود تغییرمکان نسبی طبقات در سازه با مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه کمتر از سازه با مهاربند کمانش‌تاب طول بلند است. این مقادیر، کاهش ۲۳٪ را نسبت به سازه مبنا را نشان می‌دهد. توجه به این نکته لازم است که این مقدار کاهش در حوزه تحلیل الاستیک برآورد شده است؛ این در حالی است که سختی و قابلیت کنترل تغییرمکان در مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه در حوزه پلاستیک به دلیل اثر سخت‌شوندگی آن و وجود عنصر الاستیک سری در مسیر بار بیشتر از حوزه الاستیک می‌باشد. با لحاظ نمودن هزینه تولید مهاربند کمانش‌تاب در حدود ۶ برابر مهاربند همگرای معمولی،

P-Delta در شکل (۵) نشان داده شده است.

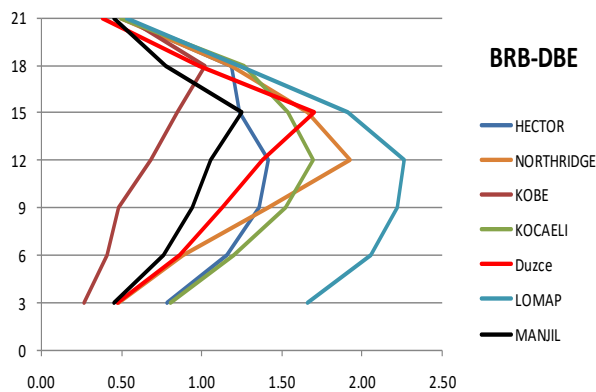


شکل ۵- نمای قاب جهت X جهت تحلیل‌های غیر خطی

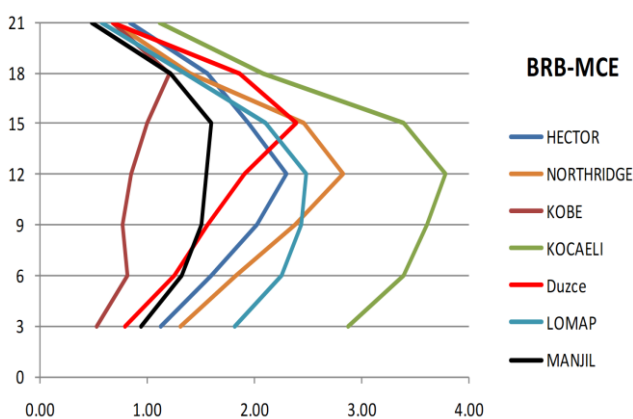
به ترتیب برای زلزله سطح DBE و MCE را به ترتیب برای سازه‌های BRB و RLBRB نشان می‌دهد.



شکل ۶- طیف پاسخ SRSS مقایس شده به همراه مقدار متوسط و طیف طرح



شکل ۷- حداکثر نسبت تغییر مکان جانبی سازه BRB تحت شتابانگشت‌های زلزله DBE



شکل ۸- حداکثر نسبت تغییر مکان جانبی سازه BRB تحت شتابانگشت‌های زلزله MCE

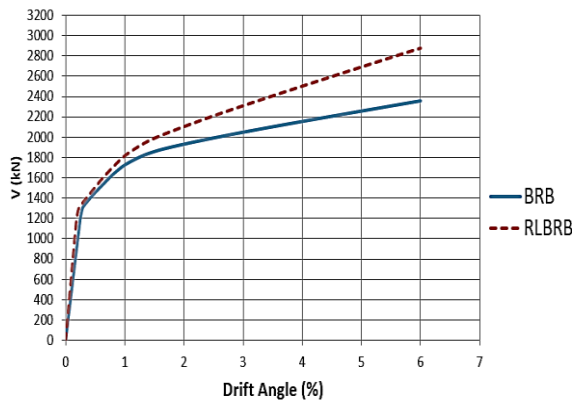
با توجه به فرارگیری ساختمان بر روی خاک تیپ II، ۷ شتابانگشت متناسب این نوع خاک از پایگاه داده NGA مجموعه PEER انتخاب شده است. شتابانگشت‌های حوزه دور با لحاظ نمودن تنوع محتوای فرکانسی، از مجموعه شتابانگشت‌های معرفی شده در FEMA P695 [۱۰] انتخاب گردید.

شتابانگشت‌های معرفی شده در FEMA P695 به دلیل پردازش‌های متعدد حالت مرجع داشته و در تحقیقات متعددی در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور مقیاس کردن شتابانگشت‌ها از روش میانگین‌گیری هندسی استفاده شده است [۱۱]. طبق این روش اختلاف مجذور مقادیر طیف هدف و میانگین هندسی دو مؤلفه طیف با میرایی ۵٪ شتابانگشت‌ها، به حداقل رسانده می‌شود. در ادامه طیف واحدی به روش SRSS برای هر شتابانگشت با استفاده از طیف‌های متعامد مقایس شده ایجاد می‌شود و سپس میانگین تمامی طیف‌ها در بازه $T/2$ تا $1.5T$ تشکیل می‌شود. طیف متوسط با $1/3$ برابر طیف طرح به منظور تأمین ضوابط آیین‌نامه در بازه مذکور مقایسه می‌گردد. بدین منظور میانگین SRSS مورد نظر در ضریب مقیاس واحدی ضرب می‌گردد تا این میانگین مقیاس شده از $1/3$ برابر طیف طرح بیشتر از ۱۰٪ کمتر نباشد ($0.9 \times 1/3$). شکل (۶)، طیف‌های مقیاس شده و طیف هدف خاک نوع II استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) را نشان می‌دهد.

ضریب مقیاس برای تحلیل‌های سطح MCE در ضریب $1/5$ ضرب شده است. با انجام تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی، مقادیر نسبت تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات تحت هر رکورد در زلزله سطح DBE و MCE محاسبه شده است. شکل‌های (۷) تا (۱۰) به ترتیب مقادیر نسبت تغییر مکان جانبی حداکثر





شکل ۱۱- مقایسه منحنی های نیرو-دریفت سازه های BRB و RLBRB

از نظر شاخص خستگی تجمعی در محدوده ایمن قرار دارند. حداکثر شاخص ماینر مهارندهای کمانش تاب طول بلند در زلزله MCE کمتر از ۵٪ و برای مهارندهای کمانش تاب طول کوتاه کمتر از ۱۵٪ می باشد.

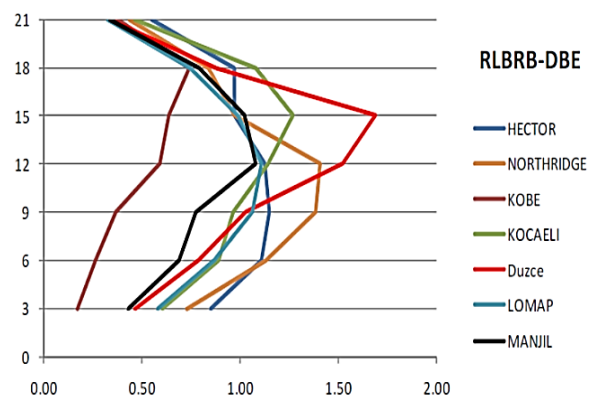
۶- نتیجه گیری

در این مقاله روش طراحی مهارندهای کمانش تاب طول کوتاه (RLBRB) به صورت مرحله به مرحله بیان گردید و تأثیر استفاده از این نوع مهاربند کمانش تاب در مقایسه با مهاربند کمانش تاب معمولی مقایسه گردید. به منظور بررسی عملکرد سازه با مهاربند کمانش تاب طول کوتاه، یک سازه ۷ طبقه مبنا یک بار با فرض مهاربند BRB و بار دیگر با فرض RLBRB طراحی گردید. در ادامه این سازه مورد تحلیل غیرخطی تاریخیچه زمانی قرار گرفت.

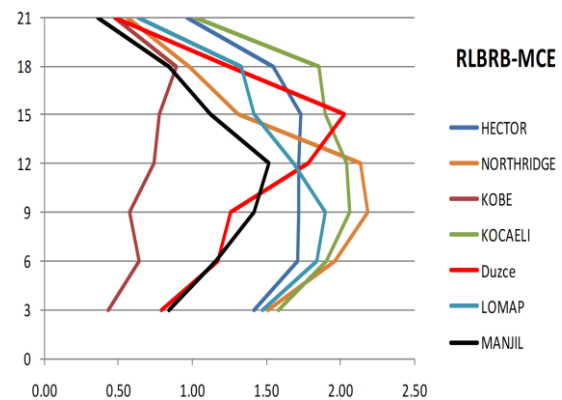
با مقایسه نتایج طراحی سازه مهاربند کمانش تاب تمام طول و سازه با مهاربند کمانش تاب طول کوتاه مشخص شد که مساحت هسته در تمامی طبقات دو سازه عینا یکسان است. این بدان معناست که ظرفیت مورد نیاز برای مهارندهای کمانش تاب طول کوتاه مشابه مهاربند تمام طول است. همچنین به دلیل افزایش مختصر سختی در سازه طراحی شده با RLBRB، پریودهای مود اول و دوم در حدود ۱۵ درصد نسبت به سازه BRB کمتر است ولی با توجه به تعیین کننده بودن رابطه تجربی، تقاضای لرزه ای را تغییر نمی دهد.

همچنین در حوزه الاستیک کاهش حدود ۲۳ درصدی در تغییر مکان نسبی حداکثر مشاهده شد و در محدوده پلاستیک، به دلیل اثر سخت شوندگی و وجود عنصر الاستیک سری با RLBRB، این کاهش بیشتر می باشد.

همچنین تحلیل تاریخیچه زمانی برای مقایسه دو نوع مهاربند



شکل ۹- حداکثر نسبت تغییرمکان جانبی سازه RLBRB تحت شتابنگاشت های زلزله DBE



شکل ۱۰- حداکثر نسبت تغییرمکان جانبی سازه RLBRB تحت شتابنگاشت های زلزله MCE

همچنین تحلیل استاتیکی غیرخطی نیز برای سازه مذکور انجام شده است و نتایج آن در شکل (۱۱) جهت مقایسه برای دو سازه RLBRB و BRB آورده شده است. همانگونه که مشاهده می شود سازه مجهز به مهاربند RLBRB در محدوده پس از تسلیم دارای سختی بالاتری می باشد؛ که همین موضوع باعث تأمین پایداری بیشتر در سازه و کاهش احتمال تمرکز تغییرمکان در طبقات خاص می شود.

براساس نتایج حاصله میانگین حداکثر نسبت تغییرمکان جانبی در زلزله DBE برای سازه RLBRB برابر ۱/۱۴٪ است که با لحاظ نمودن مقدار متوسط به علاوه انحراف معیار ۱/۴۴٪ است. با لحاظ کردن تغییرمکان جانبی زلزله MCE می توان عنوان کرد انتخاب نسبت تغییرمکان بیش از ۲/۱۲٪ دربرگیرنده اثرات زلزله MCE نیز می باشد. مقادیر میانگین حداکثر تغییرمکان در سازه RLBRB نسبت به سازه BRB در زلزله DBE و MCE به ترتیب ۲۳٪ و ۲۶٪ کاهش دارد. تمامی مهارندهای کمانش تاب

- planks or steel alone for restraining parts", In Pacific Structural Steel Conference, Beijing, China, pp. 1482-1490.
- [8] ASCE, (2016), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7-16, American Society of Civil Engineers.
- [9] ANSI/AISC 341-16, (2016), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.
- [10] ATC, (2009), Quantification of Building Seismic Performance Factors, FEMA P695, ed: Federal Emergency Management Agency.
- [11] Constantinou, M., Kalpakidis, I., Filiatrault, A. and Lay, R. A.E. (2011), "LRFD-based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators", University at Buffalo, State University of New York.

کمانش تاب انجام پذیرفت که نتایج حاصله حاکی از این بود که تغییر شکل‌های نسبی در سازه RLBRB نسبت به سازه BRB کمتر و شکل پذیری آن بیشتر می‌باشد. به منظور بررسی بهتر رفتار دو سازه، تحلیل استاتیکی غیرخطی نیز انجام گرفت و مشاهده شد که در منحنی ظرفیت RLBRB به خصوص در مرحله پس از تسلیم کماکان سختی مناسبی از خود نشان می‌دهد.

در مجموع می‌توان گفت که روش RLBRB نسبت به BRB مزیت‌های زیادی از جمله انعطاف در موقعیت نصب، کاهش هزینه تولید و افزایش ظرفیت جذب انرژی را داراست. از منحصرترین مزیت‌های این سیستم امکان انتخاب مستقل دو پارامتر سختی و مقاومت می‌باشد که در سیستم‌های لرزه‌ای غالباً به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. در مجموع با توجه به مزیت‌های این روش، استفاده از این نوع مهارت‌دها به حصول رفتار لرزه‌ای مناسب آن کمک شایانی می‌کند.

۷- مراجع

- [1] Zaruma, S. and Fahnstock, L. A. (2018), "Assessment of design parameters influencing seismic collapse performance of buckling-restrained braced frames", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 113, pp. 35-46.
- [2] Razavi S.A., Mirghaderi, S.R. and Hosseini, A. (2014), "Experimental and numerical developing of reduced length buckling-restrained braces", Engineering Structures, Vol. 77, pp. 143-160.
- [3] Ariyaratana, C. and Fahnstock, L. A. (2009), "Performance assessment of buckling-restrained braced frame dual systems", International Specialty Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Area (STESSA), Philadelphia, US.
- [4] Incorporation, D.D. (2009), "Cost advantages of Buckling Restrained Braced Frame buildings in accordance with Eurocode", San Francisco, Report No. TR-2003/04.
- [5] Pandikkadavath, M.S. and Sahoo, D.R. (2016), "Cyclic testing of short-length buckling-restrained braces with detachable casings", Earthquakes and Structures, Vol. 10, pp. 699-716.
- [6] Fanaiea, N. and Dizaj, E.A. (2014), "Response modification factor of the frames braced with reduced yielding segment BRB", Journal of Structural Engineering and Mechanics, Vol. 50, pp. 1-17.
- [7] Iwata, M., Ogawa, K. and Murai, M. (2010), "Comparison tests of buckling-restrained braces using steel mortar

پی نوشت

- ¹ Buckling restrained brace
- ² Displacement-Controlled
- ³ Force-controlled
- ⁴ Reduced length buckling restrained brace

