



# امکان سنجی به کارگیری مهاربندهای کمانش تاب در الگوی واگرا

\*علیرضا علایی<sup>۱</sup>، سید علی رضوی<sup>۲</sup>، سید رسول میرقادری<sup>۳</sup>، عبدالله حسینی<sup>۴</sup>  
(تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۵)

## چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از مهاربند کمانش تاب به عنوان سیستم مقاوم در برابر زلزله در کشورهای پیشرو در علم سازه و زلزله توسعه یافته است. به دلیل شکل‌پذیری این سیستم و رفتار مناسب آن، مهاربند کمانش تاب جایگزین مناسبی برای سیستم‌های متداول مهاربندی به شمار می‌رود. سیستم‌های مهاربندی کمانش تاب معمولاً در الگوی همگرا مورد توجه بوده است و تاکنون در الگوی واگرا مورد استفاده قرار نگرفته است. استفاده از الگوی واگرا دارای مزیت‌هایی است که با استفاده از کاهش طول مهاربند محقق می‌شود و در این تحقیق امکان بهره‌مندی از آن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور در این تحقیق با به‌کارگیری سیستم مهاربند کمانش تاب در الگوی واگرا و مقایسه آن با الگوی همگرا، رفتار سیستم مهاربند کمانش تاب واگرا بررسی و مقایسه می‌شود. جهت رسیدن به این هدف از دو سازه مجهز به مهاربند کمانش تاب با الگوی همگرا و واگرا استفاده می‌گردد. جهت انجام مقایسه، دو سازه پس از طراحی مورد تحلیل غیرخطی بارافزون و تاریخچه زمانی قرار گرفته‌اند و مقادیر جابجایی طبقات و دیگرام ارتفاعی پلاستیسیته آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این الگو ضمن رساندن سازه واگرا به سختی مناسب می‌تواند تا ۳۰ درصد باعث کاهش دامنه کرنش محوری BRB گردد و همچنین بر یکنواخت کردن شدت کرنش‌های پلاستیکی در ارتفاع سازه و استفاده بهینه از ظرفیت شکل‌پذیری مهاربندهای کمانش تاب تأثیر مطلوبی می‌گذارد.

## کلمات کلیدی

مهاربند کمانش تاب با طول کوتاه، خستگی کم چرخه، آنالیز غیرخطی، OpenSees, BRB

## Use Reduced Length Buckling Restrained Braces in Eccentric Configuration

A. Alaei, S.A. Razavi, S.R. Mirghaderi, A. Hosseini

### ABSTRACT

Uses of buckling restrained braced frames (BRB) as seismic load resisting system have been developed in recent years. BRB is a proper alternative to the conventional bracing system due to its ductility and good performance. In order to reduce manufacturing cost and ease of handling of BRBs elements the idea of using reduced length BRB as a ductile braces has occurred. However, by increasing strains amplitude of these elements because of reduced length the occurrence probability of low cycle fatigue increase that prevent the expansion of this system. Therefore, in this study were trying to find a solution to get out of this problem by making change in the geometry of the bracing placement pattern and use the reduced length BRB in eccentric configuration like EBF system with the exception that here the BRB is the ductile element.

### KEYWORDS

Reduced length buckling restrained braces, EBF configuration, OpenSees, BRB

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، alireza.alaei@ut.ac.ir (نویسنده مسئول)

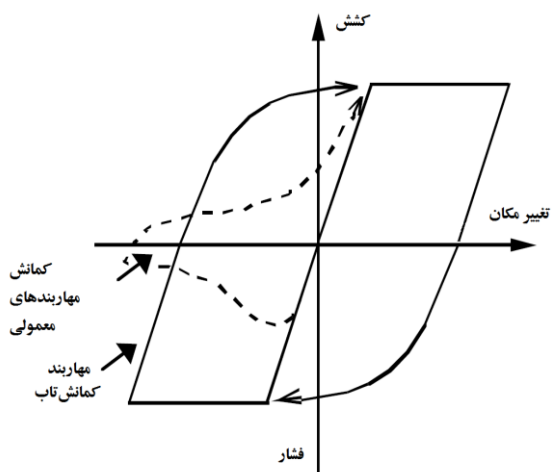
۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران



استفاده از BRBها در زمینه حرفه‌ای بوجود آورده است. بدین سبب نیاز به سازگار کردن این سیستم با شرایط سازه‌های متعارف داخل کشور و آسان‌تر نمودن اجرای این المان سازه‌ای احساس می‌گردد.



شکل (۱): رفتار کشش و فشار محوری مهاربند کمانش تاب

از سوی دیگر الگوی مهاربندی واگرا در سیستم‌های ساختمانی به دلیل مزیت‌های معماری و حذف پدیده کمانش در مهاربندها مورد توجه بوده است. اما مهاربندهای واگرا نیز دارای معایبی می‌باشند که از جمله آنها می‌توان به سختی جانبی محدود، تمرکز خرابی در تیرهای پیوند و تراز کف طبقات و دشواری تعویض تیر پیوند اشاره کرد.

بدین ترتیب برای دستیابی به سیستم مهاربندی که بتواند مزیت‌های انواع مختلف الگوهای همگرا و واگرا را تأمین نماید، ایده استفاده از مهاربند کمانش تاب در الگوی واگرا در این مقاله مطرح شده است.

افزایش زاویه مهاربند نسبت به افق باعث کاهش سختی و همچنین کاهش تقاضای تغییرمکانی وارد بر المان مهاربند می‌گردد. بدین ترتیب با قرار دادن مهاربند کمانش تاب در هندسه واگرا که باعث افزایش زاویه مهاربند نسبت به هندسه همگرا می‌شود، از میزان دامنه کرنش مهاربند کمانش تاب کاسته خواهد شد. اما مهاربند کمانش تاب به خودی خود سختی کمی دارد که این ویژگی باعث ایجاد جابجایی‌های جانبی نسبی زیاد در زلزله نسبت به دیگر سیستم‌های مهاربندی می‌شود و استفاده از الگوی واگرا

یکی از رایج‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای جانبی، سیستم مهاربندی می‌باشد. یکی از مشکلات مهاربندهای همگرا (CBF) وقوع کمانش در هنگام اعمال بار فشاری است که این مسأله باعث ناپایداری قبل از رسیدن به حد تسلیم می‌شود. به عبارت دیگر رفتار مهاربندها، در کشش و فشار غیر متقارن است و در نتیجه منحنی‌های هیستریزس این نوع قاب‌های مهاربندی نامنظم می‌شود. همچنین مهاربندی‌های همگرا (CBF) دارای شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی محدودی هستند و سختی الاستیک بالایی دارند. بدین ترتیب مهاربندهای معمولی دارای ظرفیت شکل‌پذیری محدود و چرخه‌های نامتقارن نیرو تغییرمکان هستند. یکی از روش‌های دستیابی به شکل‌پذیری و جذب انرژی بالا، استفاده از مهاربندهای کمانش تاب (BRB) می‌باشد [۱]. با اعمال جزئیات مناسب در اعضای این نوع مهاربند از کمانش آن جلوگیری می‌شود. به این ترتیب رفتار مهاربند در بارگذاری رفت و برگشتی زلزله به نحو قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد و منحنی‌های هیستریزس آن‌ها تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای کششی و فشاری حاصل از تأثیر نیروهای زلزله متقارن می‌باشند [۲].

مهاربندهای کمانش تاب از یک هسته مرکزی با مصالح فولادی و پوشش پیرامونی از جنس بتن یا فولاد تشکیل یافته‌اند. هسته فولادی به‌گونه‌ای باید طراحی شود که هم در فشار و هم در کشش به مرحله تسلیم برسد. برای جلوگیری از کمانش کلی در فشار، هسته فولادی را درون یک پوشش قرار می‌گیرند. هدف آن است که نیروی مهاربندی فقط توسط هسته فولادی تحمل شود [۲].

تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که بر خلاف مهاربندهای معمولی چرخه‌های هیستریزس در کشش و فشار پایدار می‌باشد و در نتیجه ظرفیت بالایی برای جذب انرژی زلزله در سازه ایجاد می‌گردد. این موضوع در نمودار شکل (۱) قابل مشاهده است.

استفاده از این سیستم در داخل کشور معمول نیست و علاوه بر این، بالا بودن هزینه ساخت مانعی در راستای

طراحی قرار گرفته و به منظور امکان مقایسه آن با گزینه مشابه، سیستم مهاربندی کمانش تاب با طول کوتاه در الگوی همگرا (RL-CBRB) پیش از آن مورد طراحی قرار می‌گیرد.

## ۲-۱- سازه با مهاربند کمانش تاب در الگوی هندسی همگرا (RL-CBRB)

در این بخش سازه مجهز به مهاربند کمانش تاب با الگوی هندسی همگرا (RL-CBRB) طراحی می‌گردد. شکل (۴) نمای سه بعدی سازه را نشان می‌دهند. ارتفاع طبقه اول ۴/۳ متر و سایر طبقات ۳/۵ متر می‌باشد همچنین سازه مورد نظر در محل اتصال ستون به تکیه‌گاه دارای اتصال مفصلی بوده و اتصال تیرهای دهانه مهاربندی در محل اتصال به ستون به صورت صلب می‌باشد، همچنین اتصال کلیه مهاربندها به اعضای مجاور به صورت مفصلی لحاظ می‌شود. این سازه به وسیله آنالیز استاتیکی خطی برای زلزله طرح کنترل و طراحی شده است. بار مرده و زنده طبقات به ترتیب برابر ۴۱۰۰ و ۲۴۰۰ نیوتون بر متر مربع می‌باشد. ضوابط لرزه‌ای مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه AISC341-10 برای آن منظور شده است [۵ و ۶].

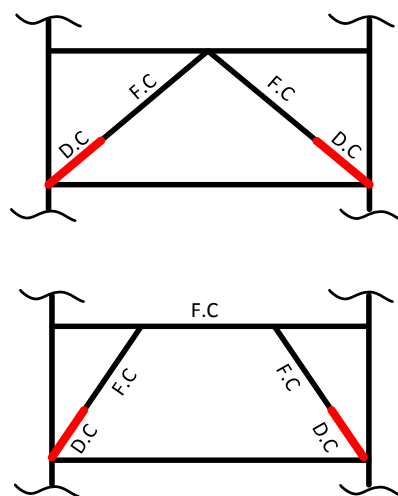
جدول (۱) نتایج طراحی مهاربندهای کمانش تاب را برای قاب جهت Y نشان می‌دهد.

باعث کاهش بیشتر سختی می‌گردد بنابراین برای جلوگیری از کاهش سختی بیش از پیش مهاربند کمانش تاب در الگوی واگرا، طول قطعه کمانش تاب کاهش داده می‌شود. کاهش طول قطعه کمانش تاب به طور قابل ملاحظه‌ای در افزایش سختی مهاربند کمانش تاب تأثیرگذار است و علاوه بر این به کاهش هزینه ساخت و تولید این مهاربندها کمک می‌نماید [۳].

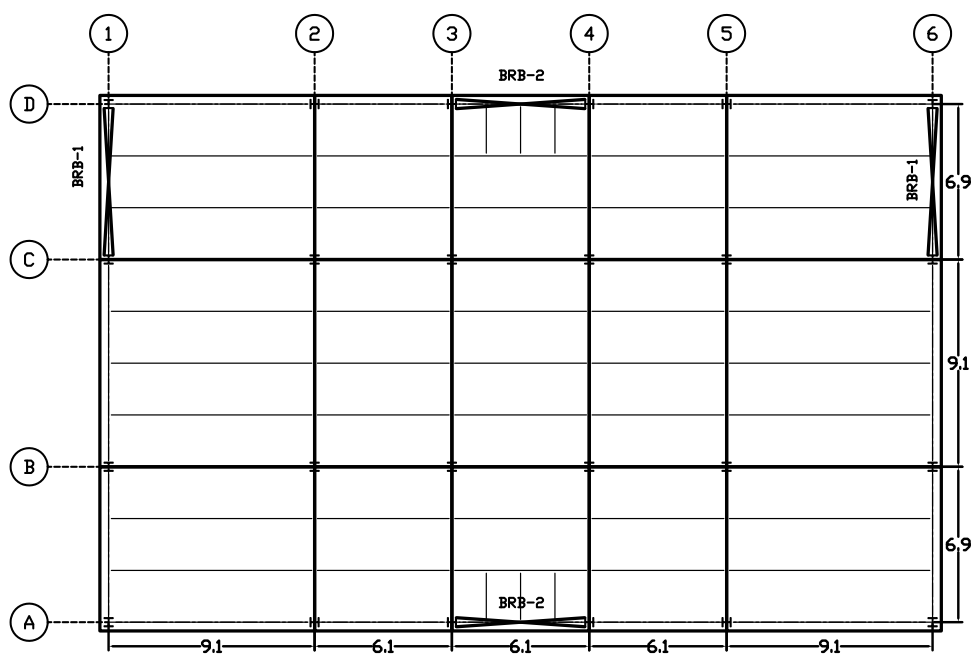
در شکل (۲) این افزایش زاویه نسبت به حالت همگرا قابل مشاهده است. تفاوت سیستم واگرای پیشنهادی با سیستم‌های متعارف واگرا در نوع المان شکل‌پذیر می‌باشد. در این طرح المان شکل‌پذیر به جای تیر پیوند، عضو BRB انتخاب شده و سایر المان‌ها کنترل شونده توسط نیرو می‌باشند. در ادامه به معرفی و مقایسه این دو سیستم پرداخته خواهد شد.

## ۲- معرفی ساختمان و طراحی سازه با مهاربندی همگرا و واگرا

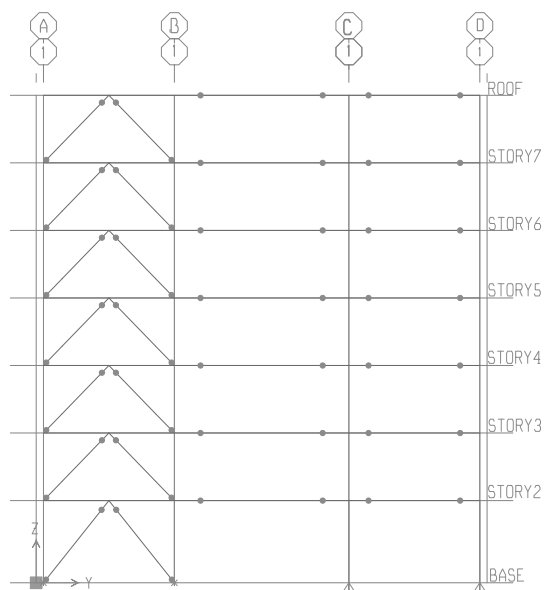
سازه مورد بررسی در این پژوهش یک سازه فولادی هفت طبقه با ارتفاع ۲۵ متر و مجهز به سیستم مهاربندی در هر دو جهت اصلی می‌باشد. این سازه بر روی خاک نوع II می‌باشد. پلان سازه مورد نظر در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد [۴]. در راستای بررسی رفتار سیستم مهاربندی کمانش تاب در الگوی واگرا (RL-EBRB) ابتدا سازه مورد



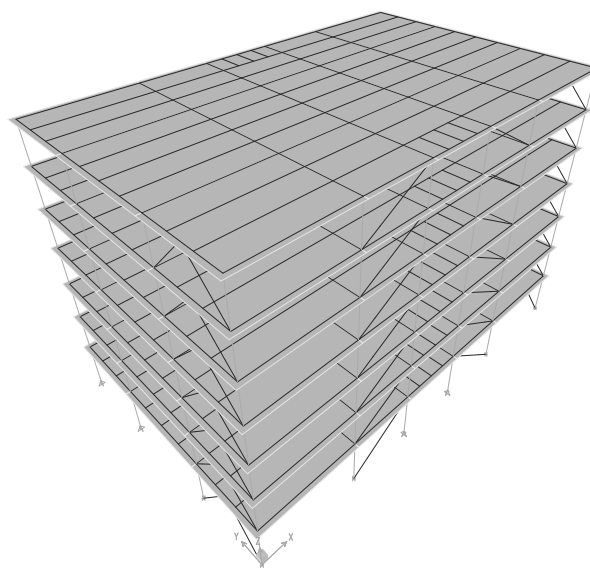
شکل (۲): مهاربند کمانش تاب در الگوی هندسی همگرا و واگرا



شکل (۳): پلان ساختمان ۷ طبقه مورد بررسی



ب) نمای سازه RL-CBRB



الف) مدل سه بعدی

شکل (۴): مدل سه بعدی و نمای سازه RL-CBRB

جدول (۱): طراحی مهاربند طبقات سازه RL-CBRB

نسبت تنش	تقاضای نیروی محوری (kN)	ظرفیت نیروی محوری (kN)	مساحت هسته مهاربند (mm <sup>2</sup> )	طبقه مورد نظر
۰/۷۳	۳۶۹/۱	۵۰۴/۶	۱۹۳۵	۱
۱/۰۱	۷۶۲/۱	۷۵۶/۹	۲۹۰۳	۲
۱/۰۰	۱۰۹۵/۳	۱۰۹۳/۳	۴۱۹۳	۳
۰/۹۹	۱۳۳۵/۰	۱۳۴۵/۶	۵۱۶۱	۴
۱/۰۰	۱۵۰۸/۱	۱۵۱۳/۸	۵۸۰۶	۵
۱/۰۱	۱۷۰۲/۶	۱۶۸۲/۰	۶۴۵۱	۶
۱/۰۳	۱۹۰۵/۰	۱۸۵۰/۲	۷۰۹۶	۷

## ۲-۲. سازه با مهاربند کمانش‌تاب در الگوی هندسی واگرا (RL-EBRB)

در ایده استفاده از BRB در ترکیب با هندسه واگرا (EBF)، المان شکل‌پذیر همان مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه بوده و برخلاف سازه‌های مهاربندی واگرای متعارف، در این سازه تیر پیوند المان کنترل شونده توسط نیرو می‌باشد. زاویه زیاد مهاربند با افق تقاضای تغییر مکانی روی مهاربند را کاهش داده و دامنه کرنش ایجاد شده بر روی مهاربند که در اینجا BRB می‌باشد را کم می‌کند، همچنین امکان افزایش سختی این سازه ترکیبی با استفاده از این نوع مهاربند کمانش‌تاب تغییر مطلوبی در راستای فراهم کردن حداقل سختی مورد نیاز سازه را ایجاد می‌کند.

هدف دیگری که در ایده سازه ترکیبی با تغییر المان شکل‌پذیر از تیر پیوند به مهاربند کمانش‌تاب دنبال می‌گردد، تغییر محل خرابی و پلاستیک شدن مصالح از محل تیر پیوند و دال که در سازه‌های EBF متعارف است به المان BRB بوده که شرایط مناسب تری از نظر دسترسی و امکان جایگزینی المان تخریب شده دارد.

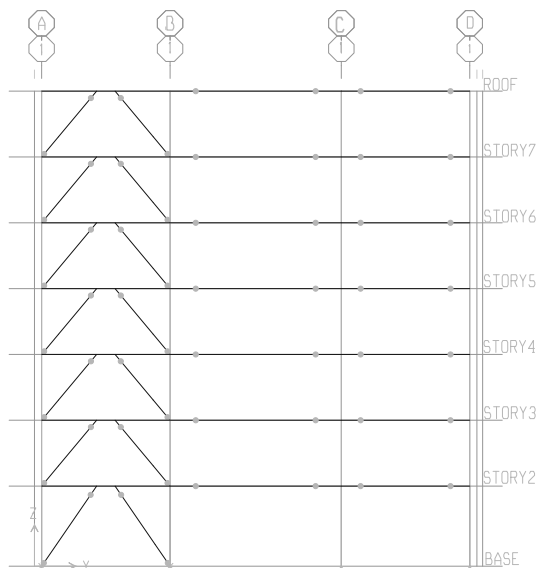
افزایش زاویه مهاربند نسبت به افق باعث افزایش تقاضای نیرویی بر روی تیر این دهانه و اتصالات مربوط به آن می‌گردد. با توجه به این موضوع، زاویه‌ای مناسب است که تا حد ممکن زیاد باشد اما موجب افزایش غیر متعارف

مقاطع تیر پیوند نشود. رسیدن به این زاویه با سعی و خطا در طراحی، ممکن می‌شود. در تیر پیوند این سازه، برش در طول المان ثابت بوده و ناشی از نیروی محوری ایجاد شده در مهاربند می‌باشد. همچنین لنگر خمشی حداکثر در محل اتصال تیر پیوند به مهاربند حاصل می‌شود.

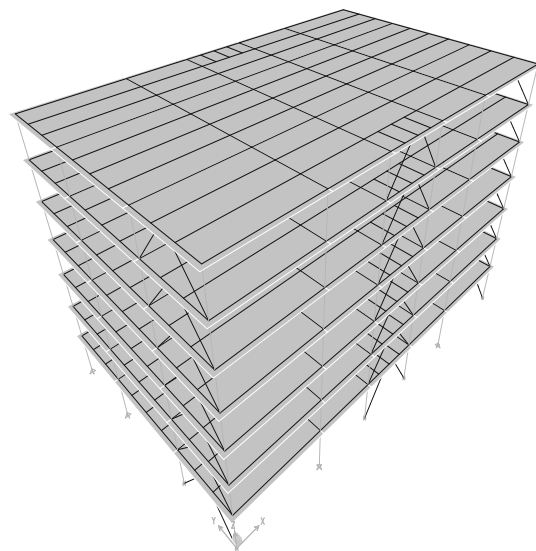
برای مشخص شدن مسیر طراحی سازه هفت طبقه ابتدا متغیرهای هندسه قاب شامل زاویه مناسب، شرایط مرزی اتصال تیر به ستون و همچنین سختی تیر پیوند در قاب یک طبقه بررسی شده و سپس با با لحاظ کردن تأثیر هر پارامتر، سازه هفت طبقه مورد نظر از نظر هندسه انتخاب و طراحی گردید. شکل (۵-الف) مدل سه بعدی و شکل (۵-ب) نمای قاب جهت Y سازه را نشان می‌دهد. تیر دهانه مهاربندی به صورت یک المان پیوسته که در انتها به صورت صلب به ستون اتصال می‌یابد طراحی و مدل گشته است. سایر اتصالات همانند سازه قسمت ۲-۲ می‌باشد.

جدول (۲) نتایج طراحی مهاربندهای کمانش‌تاب را برای قاب جهت Y این سازه نشان می‌دهد.

جدول (۳) مقایسه سطح مقطع مهاربندهای هر طبقه برای دو سازه را نشان می‌دهد. افزایش زاویه مهاربند باعث افزایش اندکی در سطح مقطع مورد نیاز مهاربندهای کمانش‌تاب می‌گردد.



ب) نمای سازه RL-EBRB



الف) مدل سه بعدی

شکل (۵): مدل سه بعدی و نمای سازه RL-CBRB

جدول (۲): طراحی مهاربند طبقات

نسبت تنش	تقاضای نیروی محوری (kN)	ظرفیت نیروی محوری (kN)	مساحت هسته مهاربند (mm <sup>2</sup> )	طبقه مورد نظر
۰/۸۵	۴۲۸/۸	۵۰۴/۶	۱۹۳۵	۱
۱/۰۱	۸۴۸/۵	۸۴۱/۰	۳۲۲۵	۲
۰/۹۳	۱۱۷۶/۹	۱۲۶۱/۵	۴۸۳۸	۳
۱/۰۱	۱۴۵۰/۶	۱۴۲۹/۷	۵۴۸۳	۴
۰/۹۹	۱۶۶۹/۶	۱۶۸۲/۰	۶۴۵۱	۵
۱/۰۲	۱۸۷۹/۴	۱۸۵۰/۲	۷۰۹۶	۶
۱/۰۵	۲۰۲۵/۴	۱۸۵۰/۲	۷۰۹۶	۷

### ۳- تحلیل استاتیکی غیرخطی

سازه‌های مورد نظر پس از طراحی، در نرم افزار Opensees با تعریف المان‌ها به صورت المان‌های غیر خطی مدل گشته و آنالیز استاتیکی غیرخطی روی آن انجام می‌گردد. در مدل‌سازی المان‌های اصلی از المان تیرستونی غیرخطی<sup>۱</sup> و برای مدل کردن غلاف BRB از المان خمشی تک محوره<sup>۲</sup> استفاده گردید. برای انطباق مدل رفتاری مصالح فولاد BRB از نتایج آزمایشگاهی رضوی و همکارانش استفاده شده است [۳].

<sup>۱</sup> Nonlinear beam column element

<sup>۲</sup> Uniaxial section

### جدول (۳): مقایسه سطح مقطع مهاربند های سازه RL-CBRB و

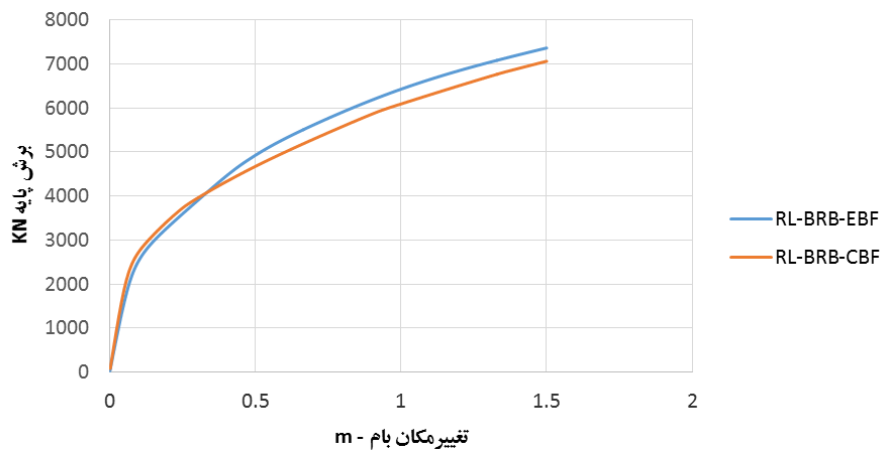
RL-EBRB

طبقه مورد نظر	مساحت هسته مهاربند سازه RL-CBRB (mm <sup>2</sup> )	مساحت هسته مهاربند سازه RL-EBRB (mm <sup>2</sup> )
۱	۱۹۳۵	۱۹۳۵
۲	۲۹۰۳	۳۲۲۶
۳	۴۱۹۴	۴۸۳۹
۴	۵۱۶۱	۵۴۸۴
۵	۵۸۰۶	۶۴۵۲
۶	۶۴۵۲	۷۰۹۷
۷	۷۰۹۷	۷۰۹۷

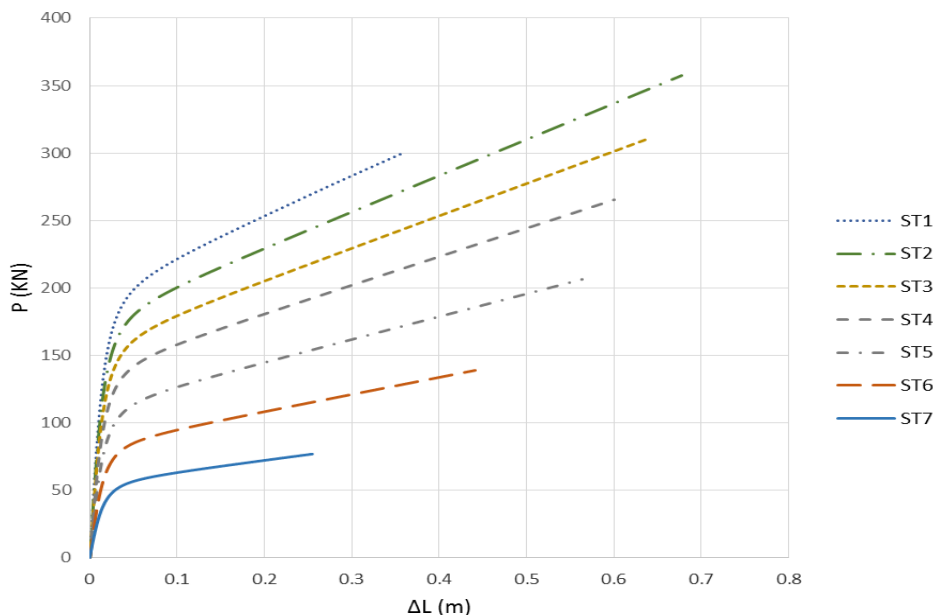


شکل (۶) منحنی برش پایه-تغییرمکان بام سازه تا تغییرمکانی متناظر ۶٪ ارتفاع سازه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۷) و (۸) منحنی نیروی محوری-تغییرمکان را برای هر یک از مهاربندهای کمانش‌تاب مربوط به هر طبقه نمایش می‌دهند. بررسی نمودار شکل (۶) نشان می‌دهد که در کل منحنی ظرفیت دو سازه نزدیک یکدیگر می‌باشد. در قسمت الاستیک منحنی سازه

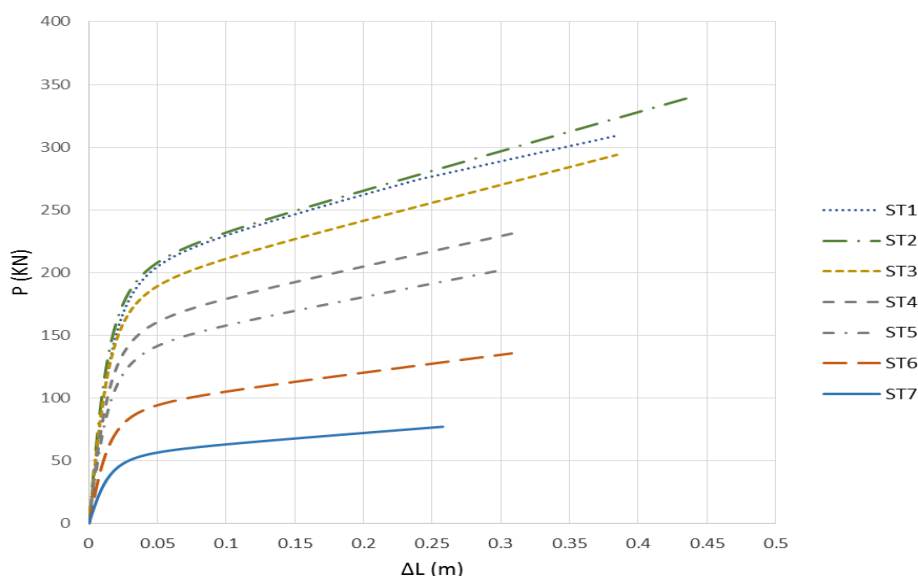
از نظر سختی اندکی نرم‌تر بوده اما پس از رسیدن به قسمت جاری شدن به دلیل بالا بودن سختی پس از تسلیم آن، از نمودار سازه RL-CBRB بالاتر قرار می‌گیرد. از نمودار منحنی نیروی محوری تغییرمکان مهاربندها می‌توان دریافت که مهاربندهای طبقات دوم و سوم بیشترین تغییرطول محوری و مهاربندهای طبقات بالا کمترین تغییرطول را تجربه می‌کنند.



شکل (۶): منحنی نیرو تغییرمکان سازه RL-CBRB و RL-EBRB



شکل (۷): منحنی نیرو تغییرمکان مهاربند کمانش‌تاب طبقات سازه RL-CBRB



شکل (۸): منحنی نیرو و تغییر مکان مهاربند کمانش تاب طبقات سازه RL-EBRB

جدول (۵): تغییر طول، درصد کرنش و شکل پذیری مهاربند

کمانش تاب سازه RL-EBRB

طبقه	$\Delta L$ BRB (mm)	درصد کرنش	درصد شکل پذیری
۷	۳۶/۸	۲/۶۳	۱۸/۴
۶	۴۵/۸	۳/۲۷	۲۲/۹
۵	۴۶/۲	۳/۳۰	۲۳/۱
۴	۴۵/۶	۳/۲۶	۲۲/۸
۳	۵۴/۹	۳/۹۲	۲۷/۵
۲	۵۴/۳	۳/۸۸	۲۷/۲
۱	۷۵/۲	۴/۳۷	۳۰/۶

در نگاه اولیه به نتایج درصد کرنش سازه RL-CBRB در جدول (۲)، مشاهده می‌شود تمرکز پلاستیسیته و شکل‌پذیری در طبقات وسط قرار دارد، به گونه‌ای که این مقدار نزدیک دو برابر طبقات ابتدا و انتها می‌باشد اما در سازه RL-EBRB مقادیر شکل‌پذیری بسیار به هم نزدیک است. بنابراین می‌توان گفت یکی از مزایای دیگر استفاده از الگوی واگرا ایجاد توزیع نسبتاً یکسان شکل‌پذیری در ارتفاع سازه می‌باشد. همچنین در راستای کاهش دامنه کرنش، با توجه به جدول (۶)، در طبقات میانی در سازه RL-EBRB نسبت به سازه RL-CBRB کرنش حتی تا

جدول (۴) و جدول (۵) مقدار تغییر طول مهاربند کمانش تاب، درصد کرنش و شکل‌پذیری آن‌ها را برای هر طبقه به ترتیب سازه RL-CBRB و RL-EBRB برای تغییر مکان برابر ۳٪ ارتفاع سازه که مساوی ۷۶۰ mm می‌باشد را نشان می‌دهد. طی روندی که برای طراحی لرزه‌ای مهاربندهای کمانش تاب طول کوتاه توسط رضوی و همکاران ارائه شده، طول قطعه هسته BRB، ۱۰۰۰ mm انتخاب شده است [۷].

جدول (۴): تغییر طول، درصد کرنش و شکل‌پذیری مهاربند

کمانش تاب سازه RL-CBRB

طبقه	$\Delta L$ BRB (mm)	درصد کرنش	درصد شکل‌پذیری
۷	۲۱/۲	۱/۵۱	۱۰/۶
۶	۴۰/۳	۲/۸۸	۲۰/۲
۵	۵۱/۶	۳/۶۹	۲۵/۸
۴	۶۲/۸	۴/۴۹	۳۱/۴
۳	۷۰/۱	۵/۰۱	۳۵/۱
۲	۸۱/۲	۵/۸۰	۴۰/۶
۱	۳۸/۲	۲/۷۳	۱۹/۱



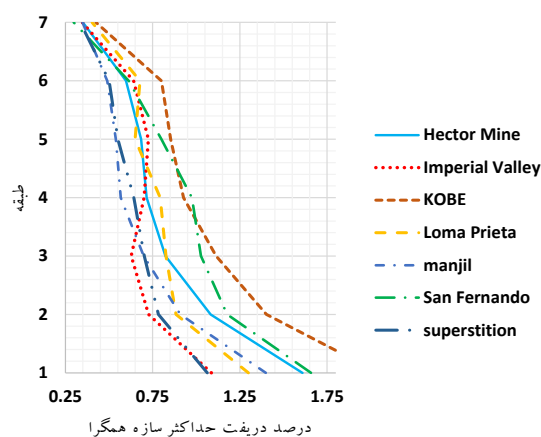
PEER انتخاب و به طیف طرح آیین نامه مقیاس شدند. نام و مشخصات هفت شتاب نگاشت مورد نظر در جدول (۷) قابل مشاهده است [۸].

پس از انجام هفت آنالیز بر روی هر سازه، نتایج مورد پردازش قرار گرفت. شکل (۹) پروفیل دریفت حداکثر و شکل (۱۰) پروفیل دریفت های باقیمانده برای سازه RL-CBRB و RL-EBRB را نشان می دهد.

مقایسه قسمت شکل (۹-الف و ب) نشان می دهد که مقادیر دریفت دو سازه RL-CBRB و RL-EBRB در محدوده یکسانی قرار دارد، همچنین شکل (۱۰) نشان می دهد مقدار دریفت باقیمانده سازه RL-EBRB نسبت به RL-CBRB کاهش قابل توجهی داشته و تقریباً نصف می باشد.

جدول (۷): مقایسه کرنش مهاربندهای کمانش تاب

فاصله (km)	شتاب بیشینه (g)	بزرگای زلزله	نام زلزله	طبقه
۱۱/۶۶	۰/۲۷	۷/۱	هکتور ماین	۱
۲۲/۳۰	۰/۲۴	۶/۵	امپریال ولی	۲
۱۹/۱۵	۰/۲۴	۶/۹	کبه	۳
۲۴/۵۰	۰/۱۷	۶/۹	لوماپیترا	۴
۵۰/۰۰	۰/۱۸	۷/۴	منجیل	۵
۲۲/۷۷	۰/۲۱	۶/۶	سانفرناندو	۶
۲۲/۲۵	۰/۱۲	۶/۵	سوپراستیشن	۷



ب) سازه RL-CBRB

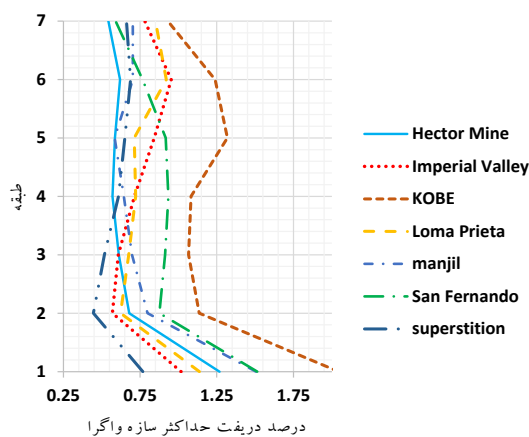
میزان ۵۰٪ کاهش داشته که مقدار قابل توجهی است. افزایش زاویه مهاربندها از ۴۵ درجه به ۵۰ درجه گرچه باعث افزایش اندکی در سطح مقطع مورد نیاز مهاربندهای کمانش تاب می گردد، اما به میزان چشم گیری سبب کاهش دامنه کرنش وارده به این مهاربندها شده و طرح مورد نظر را از نظر خطر وقوع پدیده خستگی کم چرخه (Low Cycle Fatigue) در ناحیه امنی قرار می دهد.

جدول (۶): مقایسه کرنش مهاربندهای کمانش تاب

طبقه	درصد کرنش مهاربند سازه RL-CBRB	درصد کرنش مهاربند سازه RL-EBRB	نسبت دامنه کرنش سازه RL-EBRB به RL-CBRB
۷	۱/۵۱	۲/۶۳	۱/۷
۶	۲/۸۸	۳/۲۷	۱/۱
۵	۳/۶۹	۳/۳۰	۰/۹
۴	۴/۴۹	۳/۲۶	۰/۷
۳	۵/۰۱	۳/۹۲	۰/۸
۲	۵/۸۰	۳/۸۸	۰/۷
۱	۲/۷۳	۴/۳۷	۱/۶

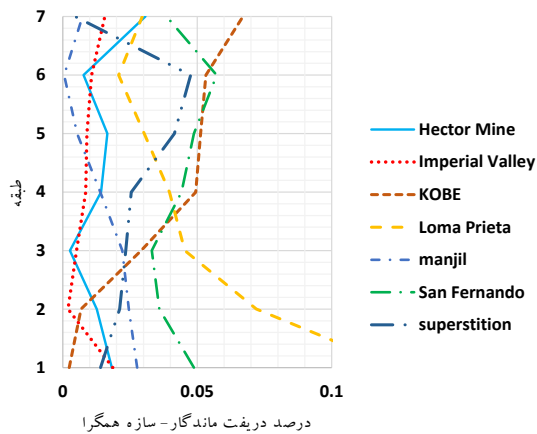
#### ۴- تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی

پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی و بررسی نتایج اولیه، دو سازه جهت انجام مقایسه دقیق تر مورد تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی با هفت شتاب نگاشت زلزله قرار گرفتند. شتاب نگاشت های استفاده شده از پایگاه لرزه نگاری

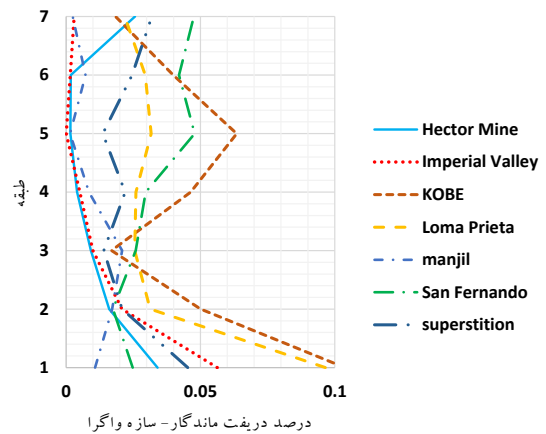


الف) سازه RL-EBRB

شکل (۹): پروفیل دریفت حداکثر

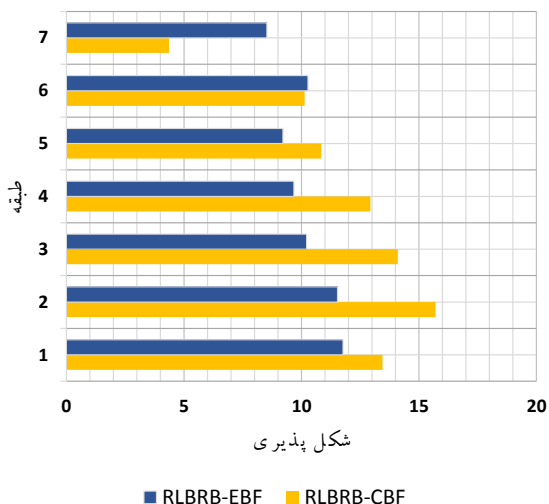
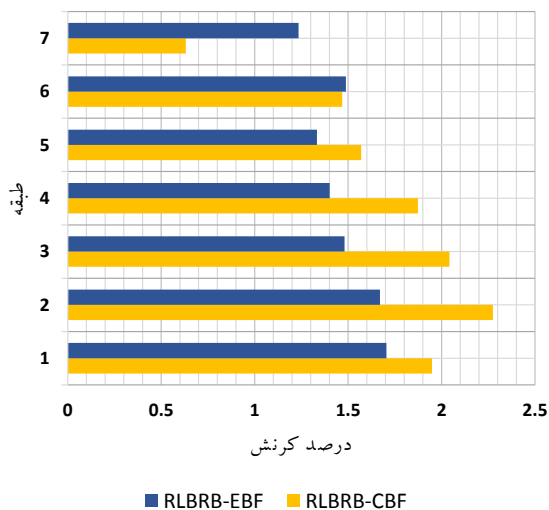


ب) سازه RL-CBRB



الف) سازه RL-EBRB

شکل (۱۰): پروفیل دریفت باقیمانده



شکل (۱۱): میانگین بیشینه کرنش و شکل پذیری

شکل (۱۱) میانگین بیشینه کرنش و شکل پذیری هفت شتاب‌نگاشت را برای مهاربندهای هر طبقه در سازه RL-CBRB و RL-EBRB را نشان می‌دهد. در جدول (۸) نسبت میانگین دامنه کرنش بیشینه مهاربندهای سازه RL-CBRB و RL-EBRB نمایش داده شده است.

با بررسی جدول (۸) مشاهده می‌گردد برحسب انتظار و مطابق نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، سازه واگرا علاوه بر یکنواخت‌تر کردن شکل‌پذیری در ارتفاع، دامنه کرنش را خصوصاً در طبقات میانی تا میزان ۳۰٪ کاهش می‌دهد. بدین سبب مهاربند کم‌انرژی‌تاب در سازه RL-EBRB نسبت به RL-CBRB حاشیه امنی جهت دوری از کرنش‌های بالا و پدیده خستگی کم‌چرخه فراهم می‌کند و علاوه بر آن می‌تواند در بهینه کردن طراحی و کاهش بیشتر طول قطعه کم‌انرژی‌تاب تأثیر مطلوب داشته باشد.

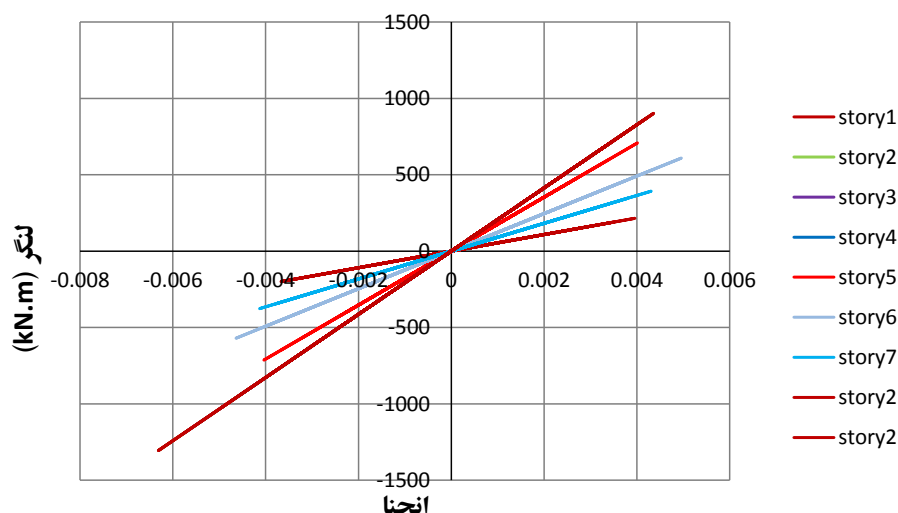
بررسی نمودار خمش-انحنای تیر پیوند در شکل (۱۲) و برش وارد شده بر تیر پیوند طبقات در جدول (۹)، نشان می‌دهد برحسب انتظار و فلسفه طراحی مورد نظر، تیر پیوند سازه RL-EBRB در تمام طبقات به صورت الاستیک باقی مانده و المان کنترل شونده توسط نیرو می‌باشد. الاستیک ماندن تیر پیوند برخلاف سازه‌های مهاربند واگرای متعارف مطلوب است زیرا باعث می‌شود تغییر شکل‌های ناشی از زلزله در مهاربند کم‌انرژی‌تاب که المان شکل‌پذیر است، رخ دهد.

جدول (۸): نسبت میانگین دامنه کرنش سازه RL-EBRB به

RL-CBRB	نسبت کرنش دو سازه	طبقه
	۰/۸۷	۱
	۰/۷۳	۲
	۰/۷۲	۳
	۰/۷۵	۴
	۰/۸۵	۵
	۱/۰۱	۶
	۱/۹۶	۷

جدول (۹): برش تقاضا و ظرفیت و نسبت تنش برشی سازه

RL-CBRB	Vp (kN)	Vu (kN)	نسبت تنش	طبقه
	۲۵۶۰	۱۹۲۴	۰/۷۵	۱
	۲۳۷۴	۱۵۴۹	۰/۶۵	۲
	۱۹۰۹	۱۳۹۴	۰/۷۳	۳
	۱۵۰۹	۱۱۹۴	۰/۷۹	۴
	۱۱۹۰	۱۰۳۶	۰/۸۷	۵
	۸۹۷	۷۱۲	۰/۷۹	۶
	۷۴۰	۴۴۰	۰/۵۹	۷



شکل (۱۲): نمودار خمش-انحنای تیر پیوند سازه RL-EBRB

##### ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق امکان استفاده از الگوی مهاربندی واگرا با استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب طول کوتاه بررسی گردید. به منظور مقایسه از دو سازه مجهز به مهاربند کمانش‌تاب با الگوی همگرا و واگرا استفاده گردید. سازه‌ها پس از طراحی طی تحلیل استاتیکی و دینامیکی غیرخطی مورد آنالیز قرار گرفتند و مقادیر سختی جانبی سازه‌ها، جابجایی حداکثر و باقیمانده طبقات، دیاگرام ارتفاعی شکل‌پذیری و دامنه کرنش دو سازه با یکدیگر مقایسه گردید. در کل نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از الگوی پیشنهادی واگرا نه تنها امکان‌پذیر می‌باشد، بلکه می‌تواند معایب سیستم‌های دیگر را مرتفع نموده و

همچنین مزایایی برای سیستم سازه به همراه داشته باشد. به طور خلاصه با بررسی نتایج این تحقیق یافته‌های زیر حاصل گردید:

- ۱- با استفاده از مهاربند کمانش‌تاب طول کوتاه می‌توان سختی جانبی سازه با الگوی واگرا را به مقادیر سازه‌های با الگوی همگرا نزدیک نمود.
- ۲- استفاده از الگوی واگرا به کاهش دررفت باقیمانده سازه می‌انجامد.
- ۳- الگوی واگرا منجر به کاهش دامنه کرنش پلاستیک محوری BRB تا ۳۰ درصد شده سازه را در محدوده ایمن‌تری از نقطه نظر خستگی کم‌چرخه قرار می‌دهد.

۴- استفاده از الگوی واگرا منجر به یکنواخت شدن توزیع ارتفاعی شکل پذیری شده که باعث بهره‌مندی بیشتر از ظرفیت غیرخطی مهاربندها در ارتفاع سازه و استفاده بهینه از ظرفیت شکل‌پذیری مهاربندهای کمانش‌تاب می‌گردد. کاهش بیشتر طول قطعه کمانش‌تاب در الگوی واگرا و بررسی پلان‌ها و تعداد طبقات دیگر از جمله پیشنهادها برای تحقیقات آتی می‌باشد.

#### ۸- مراجع

- [1] Tremblay, R., Poncet, L., Bolduc, P. and Neville, R. (2004), "Testing and Design of Buckling Restrained Braces for Canadian Application", Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver.
- [2] Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V. (2004), "Earthquake Engineering: from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering", CRC Press.
- [3] Razavi, S., Mirghaderi, S. and Hosseini, A. (2014), "Experimental and Numerical Developing of Reduced Length Buckling-Restrained Braces", Engineering Structures, Vol. 77, pp. 143-160.
- [4] López, W.A. and Sabelli, R. (2004), "Seismic Design of Buckling-Restrained Braced Frames", Steel tips, p. 78.
- [5] Committee, A. (2010), "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", ANSI/AISC 341-10, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [6] Committee, A. (2010), "Specification for Structural Steel Buildings", ANSI/AISC 360-10, American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois.
- [7] Razavi, S.A., Shemshadian, M.E., Mirghaderi, S.R. and Ahlehagh, S. (2011), "Seismic Design of Buckling Restrained Braced Frames with Reduced Core Length", The Structural Engineers World Congress.
- [8] PEER Ground Motion Database - PEER Center. (2015), Available from: <http://ngawest2.berkeley.edu>.

