http://journalisss.ir

ارتقای تاب‌آوری دیوار برشی بتن‌آرمه با استفاده از المان تعویض‌پذیر کمانش‌تاب

سید علی رضوی طباطبایی[1*]، علی مردانی[2]

۱-استادیار، دانشگاه علم و فرهنگ تهران

۲-دانشجو، دانشگاه علم و فرهنگ تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۳۱۴۵۸۷۱، arazavi@usc.ac.ir

چکیده

دیوار برشی دیواری است که برای مقاومت در برابر اثر توام تلاش محوری، تلاش خمشی و تلاش برشی ناشی از بارهای قائم و بار زلزله طراحی می‌شود. سیستم‌های باربر لرزه‌ای دیوار برشی بتن‌آرمه، با توجه به شکل‌پذیری زیاد و سختی بالا به‌طور گسترده‌ای در سازه‌های بلند اعم از فولادی و بتنی استفاده می‌شوند. این نوع سیستم‌های باربر لرزه‌ای، در زلزله‌ها عملکرد مناسبی از خودشان نشان داده‌اند. اما عمده مشکل این نوع دیوارها خرابی و خردشدگی بتن در پای دیوار و کمانش آرماتورهای این ناحیه است، که تعمیر و بهبودپذیری سازه‌ها را بعد از زلزله دچار مشکل می‌کند و حتی در مواردی سازه را به‌طور کلی از سرویس‌پذیری خارج می‌کند. اگر یک قطعهٔ تعویض‌پذیر در پای دیوار که تمرکز خرابی در آن ناحیه است قرار داده شود، عملکرد سازه به مقدار قابل‌توجهی بهبود می‌پذیرد و باعث می‌شود با جایگزین‌کردن سریع قطعهٔ تعویض‌پذیر جدید، هزینه‌ها و مدت زمان تعمیر سازه بعد از زلزله به مقدار قابل‌توجهی کاهش یابد و سازه به یک سازهٔ تاب‌آور تبدیل شود. در این تحقیق عملکرد یک قطعهٔ تعویض‌پذیر فولادی در پای دیوار برشی بتن‌آرمه در سازه‌های فولادی بررسی و با نمونهٔ دیوار برشی بتن‌آرمهٔ متداول مقایسه شده است. به همین منظور قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه با سیستم باربر جانبی دیوار برشی بتن‌آرمه با و بدون المان مرزی فولادی در نرم‌افزار Seismostruct2020 مدل شده‌اند و تحلیل‌های غیرخطی همچون تاریخچه زمانی دینامیکی و دینامیکی افزایشی روی قاب‌ها انجام شده است. در این پژوهش پارامترهای طراحی همچون ضریب اضافه‌مقاومت، ضریب شکل‌پذیری و ضریب رفتار سازه با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی محاسبه شده‌اند. همچنین منحنی‌های هیسترزیس قاب‌های ۶ و ۱۲ طبقه در هر دو حالت ترسیم و سطح زیر منحنی‌ها محاسبه شده است. نتایج نشان داد با اضافه‌شدن المان مرزی فولادی به دیوار برشی بتن‌آرمه رفتار سازه بهبود یافته و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد به‌نحوی که ضریب رفتار قاب مجهز به مهاربند کمانش‌تاب در ساختمان ۶ طبقه، ۳۰ درصد و در ساختمان ۱۲ طبقه ۲۰ درصد افزایش یافت.

واژگان کلیدی

دیوار برشی بتن‌آرمه، تاب‌آوری، المان مرزی فولادی، شکل‌پذیری، قطعهٔ تعویض‌پذیر، کمانش‌تاب

Enhancing the resilience of reinforced concrete shear walls using replaceable buckling-restrained elements

S.Ali Razavi, Ali Mardani

Abstract

Reinforced-Concrete Shear Wall (RCSW) is a common lateral resisting system especially in mid and high-rise structures. This popularity among engineers is due to high ductility and in-plane stiffness of the RCSWs. RCSWs have shown good performance as seismic load-bearing systems in past earthquakes. However, the main disadvantage of RCSWs is the crushing of concrete at the foot of the wall and as a result the buckling of the reinforcement in this area, which makes it difficult and, in some cases, impossible to repair after the earthquake. As a solution, using Buckling-Restrained Brace (BRB) as boundary elements at the base of the RCSWs is proposed and investigated in this research. For this purpose, two sets of 6 and 12-storey structures with conventional RCSW and BRB-RCSW as lateral resisting system were designed, and their seismic response were assessed through static (monotonic and cyclic), dynamic Nonlinear Time History (NLTH) and Incremental Nonlinear Dynamic Analyses (NIDA). The results indicate improved structural performance and an increase of response modification factor from 4.4 in conventional RCSW to 5.47 in RCSW-BRB. Furthermore, the proposed system prevents the induced damage at the foot of the RCSW while the replaceable BRBs act as the fuses, increasing the resiliency of the structure. So that the behavior factor of the frame equipped with buckling-restrained braces increased by 30 percent in the 6-story building and 20 percent in the 12-story building.

Keywords

Reinforced concrete shear wall, Resilient, Steel boundary element, Ductility, Replaceable element , Buckling-restrained

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

۱- مقدمه

با نیروهای جانبی وارد بر یک سازه (باد یا زلزله) به طرق مختلف مقابله می‌شود. اثر زلزله بر ساختمان‌ها از سایر اثرات وارد بر آن‌ها به‌دلیل پیچیده‌تر و شدیدتربودن نیروهای ناشی از زلزله متفاوت‌تر است. عناصر مقاوم در مقابل نیروهای فوق شامل قاب خمشی، دیوار برشی، مهاربند و یا ترکیبی از آن سه می‌باشد. استفاده از قاب خمشی به‌عنوان عنصر مقاوم در مقابل نیروهای جانبی احتیاج به جزئیات و الزامات خاصی دارد که برای تأمین شکل‌پذیری بالاتر، این الزامات به مراتب سخت‌تر است. این الزامات از لحاظ اجرایی غالباً پیچیده بوده و در صورتی می‌توان از اجرای دقیق آن‌ها مطمئن بود که کیفیت اجرا و نظارت در کارگاه بالا باشد. دیوارهای برشی نیز از تعریف بالا مستثنی نبوده و در زلزله‌های رخ‌داده در مناطق مختلف دنیا علاوه بر عملکرد مناسب خود، مشکلاتی بعد از زلزله به همراه داشته‌اند که تعمیر و سرویس‌پذیری سازهٔ کلی را بعد از زلزله دچار وقفه کرده است. بنابراین لازم است نوع جدیدی از دیوار برشی که مشکلات قبلی را برطرف کرده، معرفی شود. این نوع دیوارهای برشی که نواقص قبلی را برطرف کرده‌اند به سیستم‌های تاب‌آور[1] معروف هستند. یکی از راه‌حل‌های تاب‌آوری تعویض المان مرزی آسیب‌دیده است. در این تحقیق نوع جدیدی از این دیوار برشی تاب‌آور مورد بررسی و تحلیل قرا گرفته است. تفاوت این دیوار برشی با سایر دیوارهای برشی تاب‌آور در نوع قطعهٔ تعویض‌پذیر و استفاده از این دیوار در سازه‌های فولادی است. استفاده از دیوار برشی بتن‌آرمه به‌جای دیوار برشی فولادی در سازه‌های فولادی این مزیت را دارد که دیوار برشی فولادی حتی با ضخامت‌های کم، مقاومت بالا از خود نشان داده‌اند ولی به‌دلیل ضخامت کم، کمانش در آن‌ها رخ داده است. بنابراین برای جلوگیری از کمانش باید ضخامت دیوار را بالا برد که بدین ترتیب نیروی جذب‌شده توسط آن افزایش می‌یابد و باید از المان‌های مرزی قوی‌تر استفاده کرد که صرفهٔ اقتصادی ندارد.

تاکنون انواع مختلفی از دیوار برشی تاب‌آور معرفی شده است. این دیوارها شامل دیوار برشی گهواره‌ای[2] [۲]، دیوار برشی مرکزگرا[3] با المان‌های اصطکاکی [۳]، دیوار برشی با قطعهٔ تعویض‌پذیر در تیر پیوند و پای دیوار[4] [۴] هستند. دیوار برشی گهواره‌ای اجازه می‌دهد با واردشدن نیروی جانبی زلزله، سازه حول پایه نوسان کند و نیروی برشی واردشده حول این نقطه مستهلک شود و اجزای سازه وارد ناحیهٔ غیرخطی نشوند. آنچه در این سیستم باربر جانبی حائز اهمیت است، کنترل جابه‌جایی‌های این سیستم به‌گونه‌ای است که احتمال برخورد سازه با سازه‌های مجاور وجود نداشته باشد. دیوار برشی مرکزگرا با المان‌های اصطکاکی نوع دیگری از سیستم تاب‌آور است. کنترل استهلاک انرژی و جابه‌جایی در المان اصطکاکی با شل و سفت‌کردن پیچ‌ها انجام می‌شود. در سیستم دیوار برشی با قطعهٔ تعویض‌پذیر در تیر پیوند و پای دیوار نواقص دیوار برشی با تیر پیوند مرسوم رفع شده، به‌گونه‌ای که در تیر پیوند و پای دیوار قطعهٔ قابل‌تعویض قرار داده شده است تا دیوار به‌صورت تاب‌آور عمل کند. مهاربندهای کمانش‌تاب[5] برای اولین بار در ژاپن به‌عنوان یک نسخهٔ بهبودیافته از مهاربندهای محوری معمولی معرفی شدند [۵]. واتاناب و همکاران[6] از لوله‌های فولادی مستطیلی با ملات پرشده و مواد جداکنندهٔ بهینه برای مهار تسلیم هستهٔ فولادیِ پوشیده‌شده با ملات استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از بررسی‌های آن‌ها نشان داد که مهاربندها قادر به نشان‌دادن رفتار هیسترزیس پایدار و متقارن در هر دو قسمت کششی و فشاری هستند. مهاربندها همچنین می‌توانند به اشکال مختلف مانند پوشش‌های مختلف، ازجمله پوشش‌های فولادی، فولادی-بتنی، و پوشش‌های بتنی پیچیده‌شده با الیاف کربن[7] باشند [۶-۸]. نوع دیگری از مهاربندهای کمانش‌تاب به‌نام مهاربند کمانش‌تاب با طول کاهش‌یافته، گونه‌ای از مهاربند است که می‌تواند سختی بالاتری را ایجاد کند و منجر به کاهش جابه‌جایی سازه شود [۹].

همان‌طور که در قسمت قبلی ذکر شد، مشکل اصلی در دیوارهای برشی بتن‌آرمه، تمرکز آسیب در پای دیوارها است. المان‌های مرزی دیوارها بیش‌ترین آسیب را در سیستم دارند، از این‌رو، جایگزینیِ عناصر مرزی با مستهلک‌کننده‌های انرژی می‌تواند از این موضوع جلوگیری کند. استفاده از مهاربندهای کمانش‌تاب به‌عنوان عنصر مرزی دیوارهای برشی بتن‌آرمه در

[1] Resilient
[2] Rocking Wall
[3] Self-Centering Wall

[4] Shear Wall with Replacable Coupling Beam and Corner Component
[5] Buckling Restrained Brace (BRB)
[6] Watanabe et al
[7] Carbon Fiber Reinforced Polymer

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

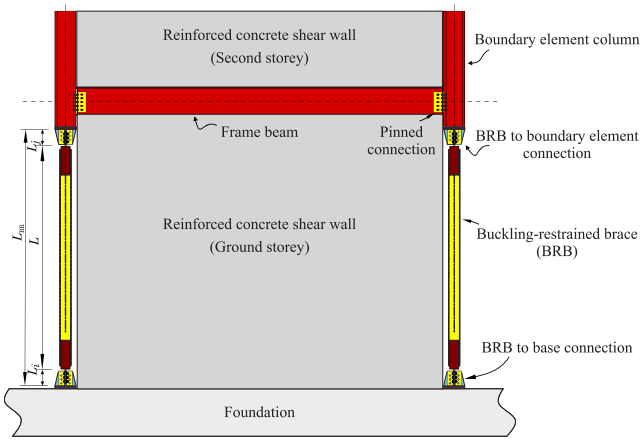
این مقاله مورد مطالعه قرار گرفت. مهاربندها می‌توانند انتخاب مناسبی باشند زیرا رفتار هیسترزیس عالی از خود نشان می‌دهند. بنابراین، دیوار برشی بتنی مسلح با مهاربند کمانشی، یک سیستم مقاوم جانبی خواهد بود. پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با دیوار برشی بتنی به همراه مهاربند از طریق تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی سری بر روی قاب‌های دوبعدی به‌عنوان نماینده‌ای از سیستم مقاوم جانبی ارزیابی شد. برای اطمینان از صحت تحلیل‌ها، یک سری مدل‌های مهاربند کمانش تاب، دیوار برشی بتن‌آرمه و دیوار برشی بتن‌آرمه همراه با مهاربند کمانش‌تاب در مقیاس کوچک توسعه و اعتبارسنجی شدند. استاتیک و تحلیل در دو فرمت مختلف انجام شد. به‌عبارت دیگر، آنالیزهای استاتیکی در قالب یکنواخت و چرخه‌ای افزاینده انجام شد، درحالی‌که تحلیل‌های تاریخچه زمانی در شدت‌های مختلف صورت گرفت. مقایسهٔ کمی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها از طریق پارامترهای پاسخ محاسباتی مانند ضریب اضافه‌مقاومت، شکل‌پذیری و ضریب اصلاح پاسخ لرزه‌ای به‌دست آمد. پارامترهای دیگری مانند جابه‌جایی و برش پایه نیز در بخش‌های زیر گزارش شده است.

۲- معرفی طرح پیشنهادی

سیستم دیوار برشی با المان مرزی فولادی تعویض‌پذیر که به‌صورت تاب‌آور عمل کرده و موضوع این تحقیق می‌باشد، به این صورت است که از یک دیوار برشی بتن‌آرمه که در سازهٔ فولادی قرار گرفته تشکیل شده است. در قسمت پایین دیوار که تمرکز خرابی‌ها به‌صورت خردشدگی بتن و کمانش آرماتورهای این ناحیه وجود دارد [۱۰-۱۲] (شکل (۱))، از یک قطعهٔ فولادی دارای هستهٔ مرکزی تسلیمی و دو قسمت غیرتسلیمی که به هستهٔ فولادی متصل است تشکیل شده است. برای جلوگیری از کمانش هستهٔ فولادی از غلافی که هستهٔ فولادی را در برگرفته کمک گرفته شده است. این قطعهٔ فولادی، مهاربند کمانش‌تاب می‌باشد که در پایین‌ترین تراز دیوار از یک طرف به صفحهٔ فونداسیون و از طرف دیگر به المان مرزی فولادی بالای خود با استفاده از اتصال پیچ و مهره‌ای متصل شده است. اتصال پیچ و مهره‌ای به‌دلیل سهولت تعویض قطعهٔ تعویض‌پذیر بعد از زلزله است. جزئیات بیش‌تر این مهاربند کمانش‌تاب و نحوهٔ اتصال آن به دیوار برشی بتن‌آرمه در شکل (۲) و (۳) آورده شده است.

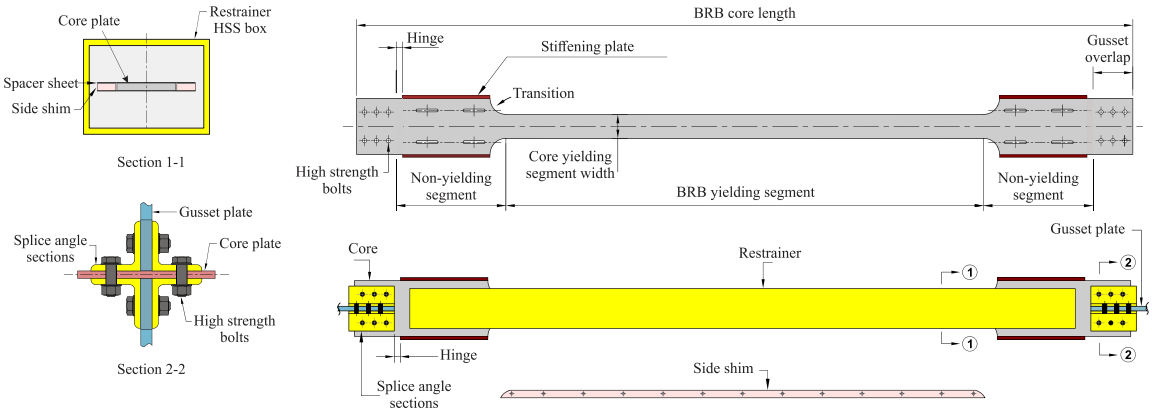
شکل ۱- خردشدگی بتن و کمانش آرماتورهای این ناحیه [۱]

به‌منظور حفظ ظرفیت باربری محوری مهاربند کمانش‌تاب صرفاً برای بار زلزله و عدم اشغال‌شدن آن توسط بارهای ثقلی، توصیه می‌شود این مهاربندها بعد از اعمال اکثر بار مردهٔ ساختمان نصب گردد. همچنین با توجه به نقش کلیدی دیوار در تحمل بار جانبی، اتصال تیر به ستونِ دهانهٔ دیوار برشی برای تحمل اندرکنش نیروی محوری و برش باید طراحی گردد.



شکل ۲- به‌کارگیری مهاربند کمانش‌تاب در سیستم دیوار برشی

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]



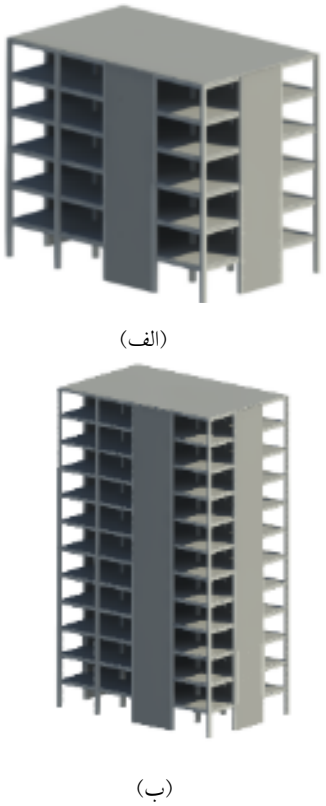
شکل ۳- جزئیات مهاربند کمانش‌تاب و اتصال آن به دیوار

۳- مدل‌سازی اجزای محدود

۳-۱- معرفی ساختمان مورد بررسی

دو ساختمان با ارتفاع متفاوت یعنی سازه‌های فولادی ۶ و ۱۲ طبقه با سیستم باربر لرزه‌ای دیوار برشی بتنی معمولی و دیوار برشی بتنی همراه با مهاربند کمانش‌تاب بر اساس مبحث نهم ویرایش ۱۳۹۹ [۱۳] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران ویرایش ۱۴۰۱ [۱۴] و استاندارد ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم، آیین‌نامهٔ طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله [۱۵] طراحی شده است. سازه‌ها در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا با شتاب پایهٔ طراحی (A) برابر ۰/۳۵ و نوع خاک (II) در نظر گرفته شد. ارتفاع طبقات برابر با ۳/۴ متر لحاظ شد. از فولاد با مقاومت تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال برای پروفیل‌های فولادی و از میلگردهای فولادی AIII و AII با مقاومت تسلیم ۴۰۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال برای آرماتورهای طولی و عرضی استفاده شد. مقاومت بتن ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. نمای کلی سازه در شکل (۴) نشان داده شده و بارهای ثقلی اعمال‌شده در جدول (۱) فهرست شده است.

پروفیل‌های فولادی با مقاطع I شکل برای تیر و المان مرزی دیوار برشی بتن‌آرمه انتخاب شدند. همچنین مقاطع قوطی‌شکل برای ستون‌های ثقلی و سطح مقطع هستهٔ مورد نیاز برای مهاربندهای کمانش‌تاب استخراج شد. دیوار برشی بتن‌آرمه بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۹ [۱۳] و استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۵] به‌عنوان دیوار برشی ویژه طراحی شده است. مقاطع سازه‌ای طراحی‌شده به‌ترتیب در جدول‌های (۲) الی (۴) برای ساختمان‌های ۶ و ۱۲ طبقه آمده است.



(الف)

(ب)

شکل ۴- (الف): ساختمان ۶ طبقه (ب): ساختمان ۱۲ طبقه

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

جدول ۱- بارهای ثقلی اعمال‌شده به سازه

طبقه	بار مرده (kg/m^2)	بار مرده سقف (kg/m^2)	بار زنده (kg/m^2)	بار دیوار (kg/m)
طبقات	240	250	200	950
بام	240	300	200	400

جدول ۲- مقاطع سازهٔ ۶ طبقه

طبقه	تیر	ستون	المان مرزی	دیوار برشی- $t\ (\rho_h(\%) - \rho_l(\%))^*$
1	2×1.5+2PL300×PL350	25×450×450	1.5×1+2PL420×PL420	500 (0.76 - 1.67)
2	2×1.5+2PL300×PL350	25×450×450	1.5×1+2PL420×PL420	500 (0.67 - 1.67)
3	2×1.5+2PL300×PL350	25×450×450	1.5×1+2PL420×PL420	500 (0.55 - 1.67)
4	2×1.5+2PL300×PL350	25×400×400	1.5×1+2PL420×PL420	500 (0.29 - 1.67)
5	2×1.5+2PL300×PL350	25×400×400	1.5×1+2PL420×PL420	500 (0.25- 1.67)
6	2×1.5+2PL300×PL350	25×400×400	1.5×1+2PL420×PL420	500 (0.25 - 1.67)

جدول ۳- مقاطع سازهٔ ۱۲ طبقه

طبقه	تیر	ستون	المان مرزی	دیوار برشی- $t\ (\rho_h(\%) - \rho_l(\%))$
1	PL350×15+2PL300×20	500×500×25	PL570×30+2PL600×40	600 (1.06 - 7.91)
2	PL350×15+2PL300×20	500×500×25	PL570×30+2PL600×40	600 (1.06 - 7.91)
3	PL350×15+2PL300×20	500×500×25	PL570×30+2PL600×40	600 (0.96 - 7.91)
4	PL350×15+2PL300×20	450×450×25	PL500×15+2PL500×20	600 (0.96 - 7.91)
5	PL350×15+2PL300×20	450×450×25	PL500×15+2PL500×20	600 (0.85 - 7.91)
6	PL350×15+2PL300×20	450×450×25	PL500×15+2PL500×20	600 (0.71 - 7.91)
7	PL300×10+2PL200×15	400×400×25	PL420×10+2PL420×15	600 (0.61 - 7.91)
8	PL300×10+2PL200×15	400×400×25	PL420×10+2PL420×15	600 (0.40 - 7.91)
9	PL300×10+2PL200×15	400×400×25	PL420×10+2PL420×15	600 (0.27 - 7.91)
10	PL300×10+2PL200×15	350×400×20	PL420×10+2PL420×15	600 (025 - 7.91)
11	PL300×10+2PL200×15	350×400×20	PL420×10+2PL420×15	600 (025 - 7.91)
12	PL300×10+2PL200×15	350×400×20	PL420×10+2PL420×15	600 (025 - 7.91)

* مشخصات دیوار برشی: t: ضخامت دیوار برشی، $\%\rho(t)$: درصد آرماتور برشی و $\%\rho(l)$: درصد آرماتور طولی

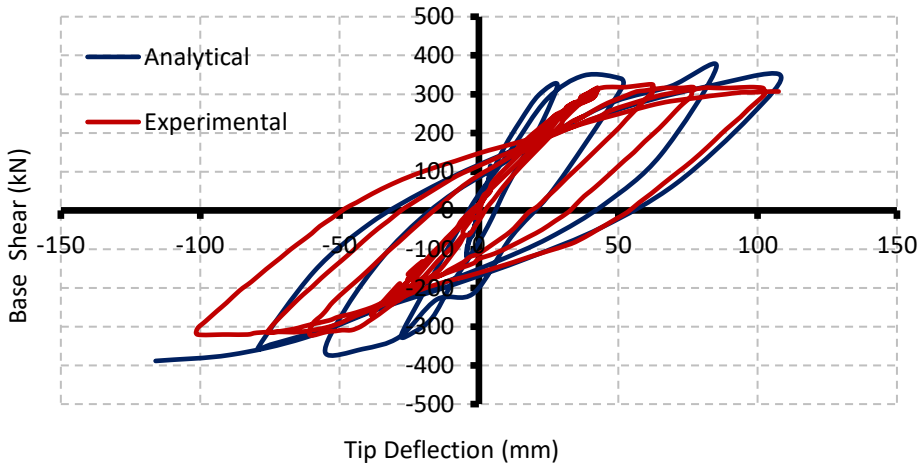
[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

جدول ۴- مشخصات مهاربند کمانش‌تاب

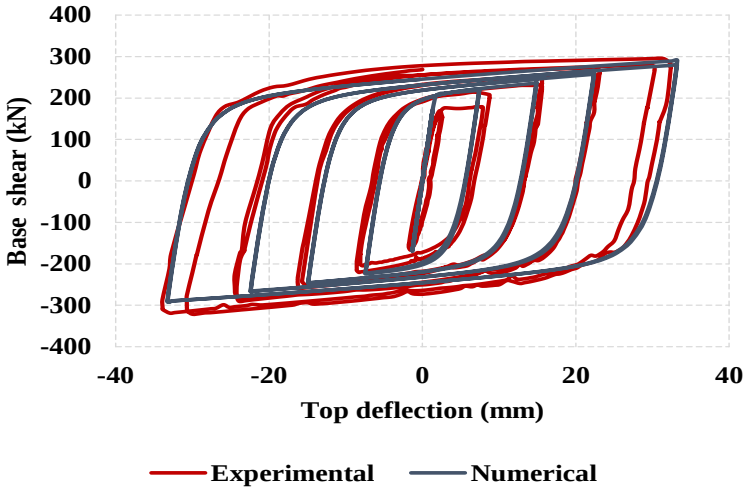
مساحت مقطع(mm^2)	قطر مقطع (mm)	سازه
8659	105	۶ طبقه
17203	148	۱۲ طبقه

۴- صحت‌سنجی مدل‌سازی

مدل‌های غیرخطی در نرم‌افزار اجزای محدود Seismostruct2020 مدل‌سازی شده‌اند. یک قاب جانبی دوبعدی با یک ستون اضافی دارای سختی محوری با سختی خمشی ناچیز مدل‌سازی شد. به‌منظور در نظر گرفتن اثر P-Delta، بار سازه‌ای به ستون مذکور اعمال شد. قبل از تحلیل قاب‌ها، روند مدل‌سازی از طریق مقایسهٔ مدل‌های نرم‌افزاری با مطالعات تجربیِ موجود از قبل، صحت‌سنجی شد. برای اطمینان کامل از دقت مدل‌ها، هر قسمت به‌طور کامل کالیبراسیون شد. از جمله دیوار برشی و مهاربند کمانش‌تاب به دقت کالیبره شد. نتیجهٔ مدل‌سازی یک دیواربرشی بتن‌آرمه در نرم‌افزار Seismostruct توسط سون‌هو چو و همکاران[1] [۱۶] در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین نتیجهٔ مدل‌سازی مهاربند کمانش‌تاب آزمایش‌شده در شکل (۶) نمایش داده شده است که نمایان‌گر تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی است.



شکل ۵- کالیبراسیون دیوار برشی [۱۲]



شکل ۶- کالیبراسیون مهاربند کمانش‌تاب [۸]

[1] Cho et al

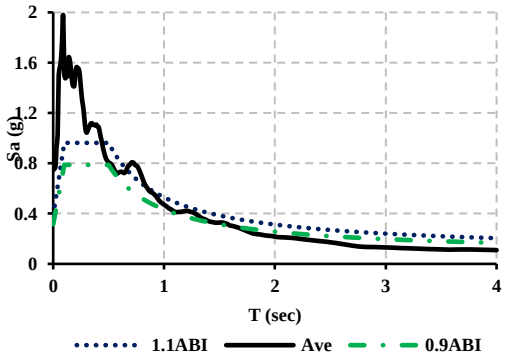
[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

۵- مشخصات مدل‌های مورد بررسی و فرضیات تحلیل

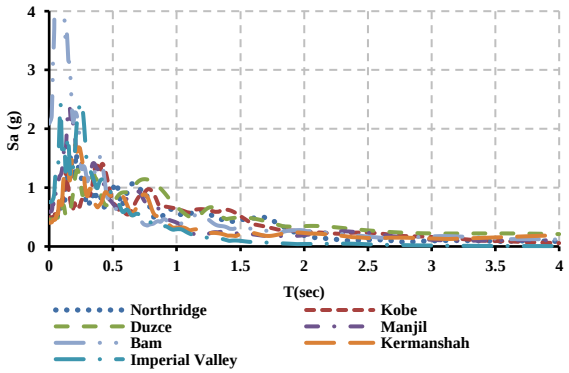
مدل‌های اجزای محدود دیوار برشی بتن‌آرمه تحت هر دو بارگذاری استاتیکی و دینامیکی قرار داده شدند. تحلیل‌های استاتیکی شامل تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل استاتیکی تاریخچه زمانی روی مدل‌ها انجام شد. برای تحلیل دینامیکی یا به‌عبارت دیگر تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی، مجموعه‌ای از هفت رکورد زلزله استفاده شد. رکوردهای انتخاب‌شده و جزئیات مربوط به آن‌ها در جدول (۵) فهرست شده است. برای مقیاس‌کردن شتاب‌نگاشت‌ها از آیین‌نامهٔ بارگذاری آمریکا (ASCE7-22) استفاده شده است [۱۷]. شکل (۷) طیف متوسط و مقایسهٔ آن با آیین‌نامه و شکل (۸) طیف‌های مقیاس‌شده را نشان می‌دهد. تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی در شدت‌های مختلف انجام شد. نتایج تحلیل‌ها در بخش‌های زیر گزارش شده است.

جدول ۵- جزئیات زلزله‌های به‌کاررفته

Record	Recording Station	Year	Earthquake Magnitude	R_{rup} (km)	DT (sec)	Duration	Scale Factor	PGA (cm/s²)
Northridge	Tarzana	1994	6.69	36.7	0.02	59.98	0.431	914.29
Kobe	Takatori	1995	6.9	24.8	0.01	31.99	0.495	902.75
Duzce	Bolu	1999	7.14	12	0.005	103.52	0.457	724.96
Manjil	Abbar	1990	7.37	12.5	0.02	53.5	0.589	504.23
Bam	Bam	2003	6.5	47.1	0.005	58.87	2.08	791.66
Kermanshah	Sarpolezahab	2017	6.3	18	0.02	30	0.402	684.53
Imperial Valley	El Centro Array #11	1979	6.95	10.4	0.005	30	0.752	372.09



شکل ۷- مقایسهٔ نمودار متوسط با ASCE7-22



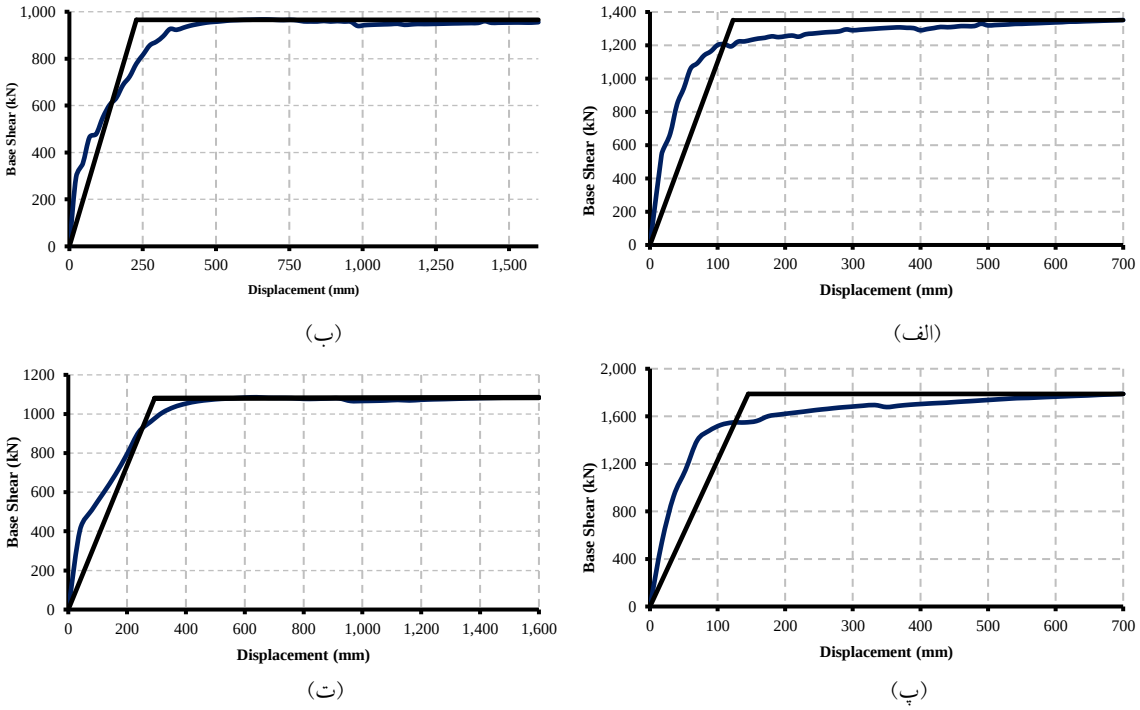
شکل ۸- شتاب‌نگاشت‌های مقیاس‌شده

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

۶- نتایج

۶-۱- تحلیل استاتیکی غیرخطی

سازه‌ها تحت یک بار جانبی فزایندهٔ اعمال‌شده به هر دیافراگم تحلیل شدند. افزایش بار تا زمانی که سازه‌ها به جابه‌جایی هدف رسیدند یا علائمی از فروپاشی و ناپایداری جانبی را نشان دادند، ادامه پیدا کرد. نمودارهای بار افزونه[1] در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، ظرفیت نیروی برشی سازه‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب در مقایسه با سیستم دیوار برشی معمولی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. اگرچه پارامترهای پاسخ جانبی محاسبه‌شده، کاهش قابل‌توجهی در ضریب شکل‌پذیری نشان می‌دهند.



شکل ۹- نمودارهای بار افزونه (الف) و (ب): به‌ترتیب قاب ۶ و ۱۲طبقه بدون قطعهٔ تعویض‌پذیر (پ) و (ت): به‌ترتیب قاب ۶ و ۱۲ طبقه با قطعهٔ تعویض‌پذیر

جدول ۶- نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی

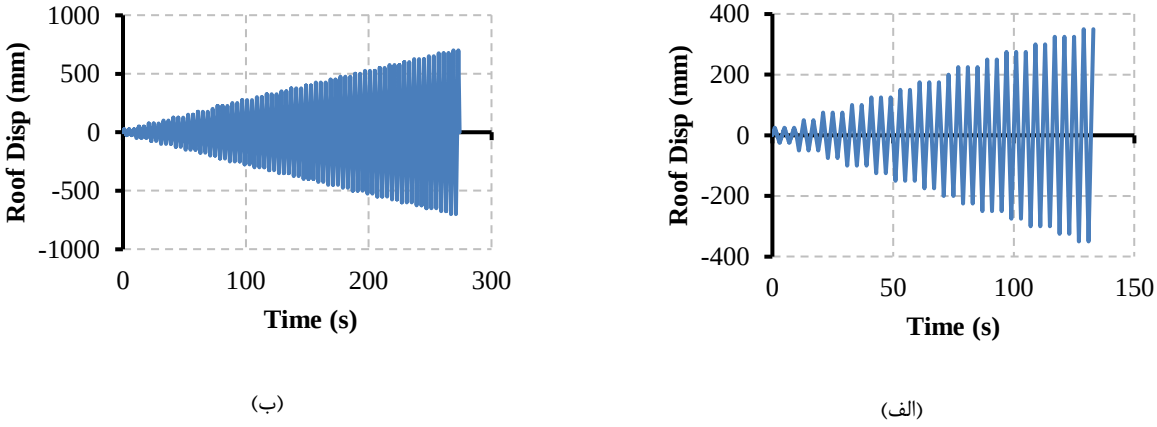
پارامترها	سازه ۶ طبقه		سازه ۱۲ طبقه	
	سازه بدون BRB	سازه با BRB	سازه بدون BRB	سازه با BRB
F_y (KN)	1788.3	1351.4	1212.1	1086.3
Δ_y (mm)	145.392	122.911	293.305	223.627
Δ_{target} (mm)	194.281	206.341	360.524	360.618
μ	1.34	1.68	1.23	1.61

[1] Pushover

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

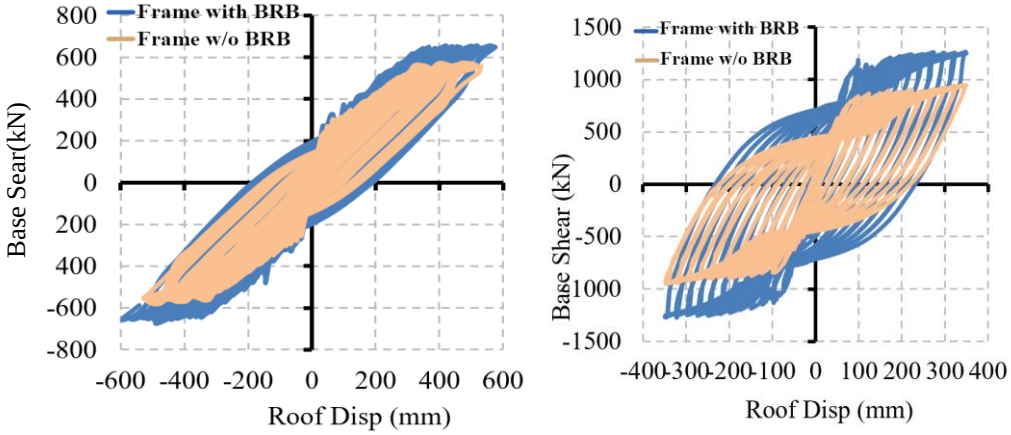
۶-۲- تحلیل شبه‌استاتیکی چرخه‌ای

اگرچه تحلیل‌های بار افزونه درک جامعی در مورد پاسخ جانبی سیستم پیشنهادی می‌دهد، اما هنوز جنبه‌هایی وجود دارد که نمی‌توان آن‌ها را در تحلیل بار افزونه بررسی کرد. از این‌رو، تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی(استاتیکی تاریخچه زمانی[1]) نیز در قالب چرخه‌ای انجام شد. پروتکل بارگذاری مطابق با ATC24 است [۱۸]. پروتکل پیشنهادی شامل یک سری حلقه‌های هیسترزیس است که از ۲۵ میلی‌متر شروع می‌شود و حداکثر تا جابه‌جایی‌های ۳۵۰ و ۷۰۰ میلی‌متر به‌ترتیب برای سازه‌های ۶ و ۱۲ طبقه ادامه پیدا می‌کند. پروتکل‌های بارگذاری را می‌توان در شکل (۱۰) مشاهده کرد. نتایج تحلیل نشان داد مقاومت حداکثر و استهلاک انرژی افزایش پیدا کرده است. نمودارهای حاصل از این تحلیل در شکل (۱۱) آورده شده و کار انجام‌شده توسط این قاب‌ها در جدول (۷) خلاصه شده است.



(ب) (الف)

شکل ۱۰- (الف): پروتکل بارگذاری ساختمان ۶ طبقه (ب): پروتکل بارگذاری ساختمان ۱۲ طبقه

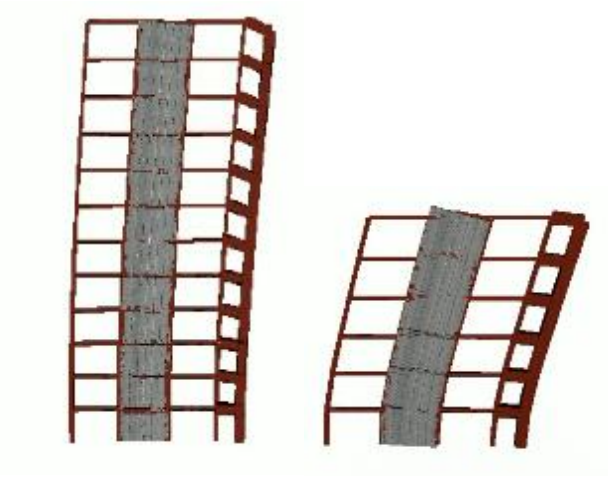


(ب) (الف)

شکل ۱۱- (الف): مقایسهٔ نمودارهای هیسترزیس قاب ۶ طبقه (ب): مقایسهٔ نمودارهای هیسترزیس قاب ۱۲ طبقه

[1] Static Time History Analysis

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]



(ب) (الف)

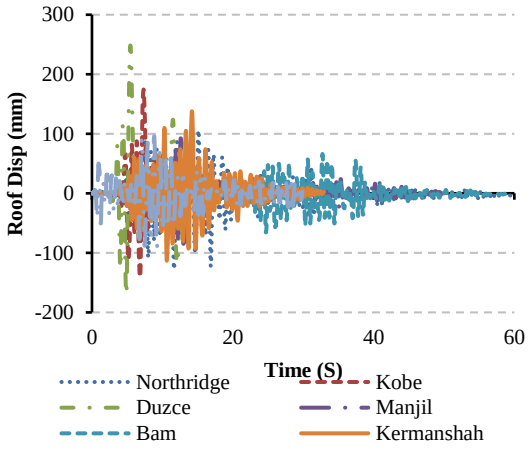
شکل ۱۲- (الف): نمونه‌ای از الگوی تغییرشکل قاب ۶ طبقه تحت بار جانبی (ب): نمونه‌ای از الگوی تغییرشکل قاب ۶ و ۱۲ طبقه تحت بار جانبی

جدول ۷- کار انجام‌شده توسط قاب‌ها

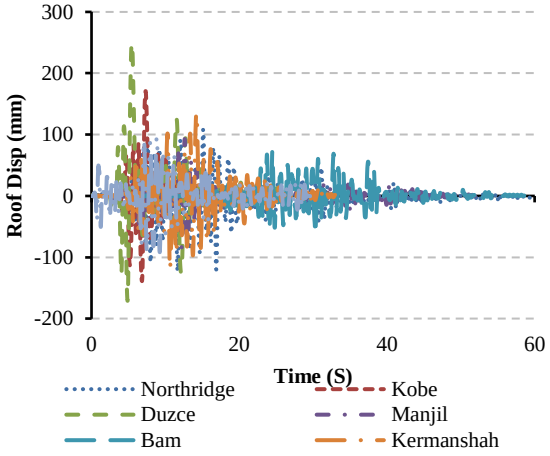
تعداد طبقات	کار انجام‌شده (J)	
	دیوار برشی	دیوار برشی با مهاربند
6	6534000	9610000
12	2570000	3570000

۶-۳- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

ارزیابی پاسخ سازه‌ای از طریق مقایسهٔ کمی برش پایه و جابه‌جایی حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی[1] انجام شد. برای سازه‌های مورد بررسی، جابه‌جایی بام نسبت به زمان در شکل (۱۳) و برش پایه در مقابل زمان در شکل (۱۴) نشان داده شده است. جابه‌جایی‌های هر دو دیوار برشی و دیوار برشی با مهاربند، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۵] در محدودهٔ مجاز ۲/۵ درصد قرار گرفته بود. نمونهٔ دارای مهاربند کمانش‌تاب موفق به کاهش جابه‌جایی‌ها و برش پایه در برخی موارد شد که نشان دهندهٔ بهبود پاسخ لرزه‌ای است.



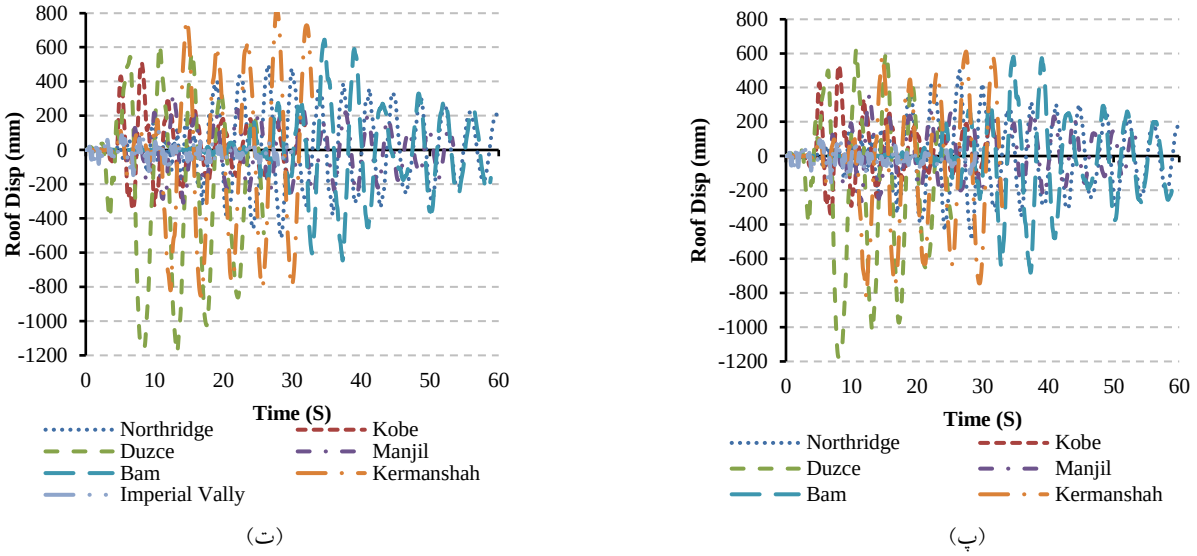
(الف)



(ب)

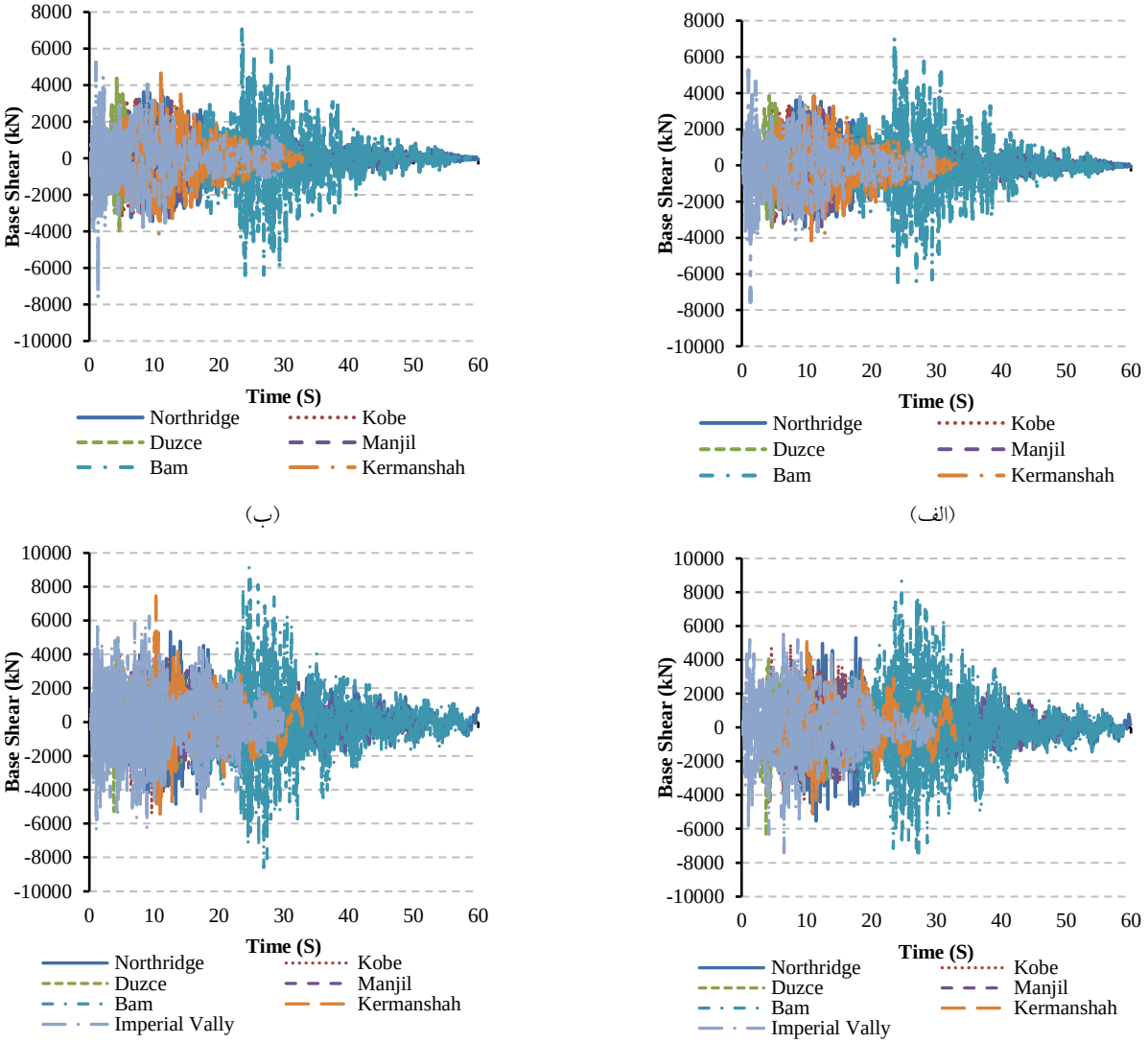
[1] Nonlinear Time History Analysis

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]



(ت) (پ)

شکل ۱۳– نمودارهای جابه‌جایی در برابر زمان (الف) و (ب): به‌ترتیب قاب ۶ طبقه با و بدون قطعهٔ تعویض‌پذیر (پ) و (ت): به‌ترتیب قاب ۱۲ طبقه با و بدون قطعهٔ تعویض‌پذیر



(ب) (الف)

(ت) (پ)

شکل ۱۴– نمودارهای برش پایه در برابر زمان (الف) و (ب): به‌ترتیب قاب ۶ طبقه با و بدون قطعهٔ تعویض‌پذیر (پ) و (ت) : به‌ترتیب قاب ۱۲ طبقه با و بدون قطعهٔ تعویض‌پذیر

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

۶-۴- تحلیل دینامیکی افزایشی

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در چندین شدت انجام شد، به‌عبارت دیگر تحلیل دینامیکی افزایشی[1] (IDA) انجام شد. چنین روشی عوامل تأثیرگذار گسترده‌تری را در رفتار لرزه‌ای سازه‌های مطالعاتی در نظر می‌گیرد. مقایسهٔ کمی پاسخ لرزه‌ای دیوار برشی معمولی و دیوار برشی همراه با مهاربند برای درک جامع رفتار بهبودیافته در سیستم پیشنهادی ضروری است. از این‌رو، پارامترهای پاسخ لرزه‌ای با استفاده از نتایج IDA محاسبه شد. پارامترها شامل ضریب اضافه‌مقاومت (R_s)، ضریب شکل‌پذیری (R_μ) و ضریب رفتار (R) است.

$$R_\mu = \frac{V_{b\,(Dyn.u)}}{V_{b\,(Dyn,e)}} \qquad (۱)$$

که در آن $(V_{b\,(Dyn,e)})$ حداکثر برش پایه الاستیک و $(V_{b\,(Dyn.u)})$ برش پایه نهایی در جابه‌جایی هدف است.

$$R_s = \frac{V_{b\,(Dyn.u)}}{V_{b\,(st,y)}} \qquad (۲)$$

که در آن $(V_{b\,(st,y)})$ برش پایه مربوط به اولین تشکیل مفصل پلاستیکی است که از طریق تحلیل استاتیکی غیرخطی به‌دست آمده است. در نهایت ضریب رفتار را می توان با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه کرد:

$$R = R_s R_\mu \qquad (۳)$$

پارامترهای محاسبه‌شده در جدول‌های (۸) الی (۱۱) فهرست شده است. نتایج نشان می‌دهد مهاربند کمانش‌تاب به‌عنوان عنصر مرزی در پای دیوار برشی باعث افزایش ۳۵/۱، ۱۱/۷ و ۳۲/۳ درصد به‌ترتیب در ضریب اضافه‌مقاومت (Rs)، ضریب شکل‌پذیری (Rμ) و ضریب رفتار (R) در ساختمان ۶ طبقه و ۱۲، ۵ و ۱۹/۵ درصد در ساختمان ۱۲ طبقه شده است.

جدول ۸- ضرایب اضافه‌مقاومت، شکل‌پذیری و فاکتورهای اصلاح قاب ۶ طبقه بدون مهاربند کمانش‌تاب

Record	DM	IM	$V_{b\,(Dyn,u)}$ (kN)	$V_{b\,(St,y)}$ (kN)	$V_{b\,(Dyn,e)}$ (kN)	R_s	R_m	R_{LRFD}
Northridge	0.02	1.536	2456		4278	1.373	1.74	2.390
Kobe	0.02	1.439	2889		4932	1.615	1.7	2.746
Duzce	0.02	1.242	2785		3845	1.557	1.38	2.149
Manjil	0.02	3.684	4552	1788.338	9650	2.545	2.12	5.396
Bam	0.02	2.2	3129		6651.5	1.750	2.12576	3.719
Kermanshah	0.02	2.075	2890		4587	1.616	1.587	2.565
Imperial Vally	0.02	5.84	4652		5763	2.601	1.239	3.223
		Average				1.865	1.70	3.170
		σ				0.460	0.313	1.032
		C.V.				0.246	0.184	0.326

[1] Incremental Dynamic Analysis

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

جدول ۹- ضرایب اضافه‌مقاومت، شکل‌پذیری و فاکتورهای اصلاح قاب ۶ طبقه با مهاربند کمانش‌تاب

Record	DM	IM	$V_{b\,(Dyn,u)}$ (kN)	$V_{b\,(St,y)}$ (kN)	$V_{b\,(Dyn,e)}$ (kN)	R_s	R_m	R_{LRFD}
Northridge	0.02	1.948	2917		5779	2.158	1.981	4.276
Kobe	0.02	1.787	2035		4174	1.506	2.051	3.088
Duzce	0.02	1.5	2090		5868	1.546	2.808	4.342
Manjil	0.02	3.476	3542	1351.486	7474	2.621	2.110	5.530
Bam	0.02	2.2	4238		6651.5	3.136	1.569	4.922
Kermanshah	0.02	1.81	2017		3889	1.492	1.928	2.878
Imperial Vally	0.02	5.42	7015		5857	5.191	0.835	4.334
		Average				2.521	1.90	4.196
		σ				1.235	0.553	0.872
		C.V.				0.490	0.292	0.208

جدول ۱۰- ضرایب اضافه‌مقاومت، شکل‌پذیری و فاکتورهای اصلاح قاب ۱۲ طبقه بدون مهاربند کمانش‌تاب

Record	DM	IM	$V_{b\,(Dyn,u)}$ (kN)	$V_{b\,(St,y)}$ (kN)	$V_{b\,(Dyn,e)}$ (kN)	R_s	R_m	R_{LRFD}
Northridge	0.02	3.23	3711		7958	3.062	2.144	6.565
Kobe	0.02	1.642	3559		6778	2.936	1.904	5.592
Duzce	0.02	0.775	1661		4615	1.370	2.778	3.807
Manjil	0.02	3	7857	1212.111	7876	6.482	1.002	6.498
Bam	0.02	1.374	3979		5987	3.283	1.505	4.940
Kermanshah	0.02	0.908	1749		6660	1.443	3.808	5.495
Imperial Vally	0.02	10.865	4037		8002	3.331	1.982	6.602
		Average				3.129	2.161	5.643
		σ				1.571	0.842	0.955
		C.V.				0.502	0.390	0.169

جدول ۱۱- ضرایب اضافه‌مقاومت، شکل‌پذیری و فاکتورهای اصلاح قاب ۱۲ طبقه با مهاربند کمانش‌تاب

Record	DM	IM	$V_{b\,(Dyn,u)}$ (kN)	$V_{b\,(St,y)}$ (kN)	$V_{b\,(Dyn,e)}$ (kN)	R_s	R_m	R_{LRFD}
Northridge	0.02	3.052	4393		9871	4.044	2.247	9.086
Kobe	0.02	1.571	3515		7172	3.236	2.040	6.602
Duzce	0.02	0.844	2376		4711	2.187	1.983	4.337
Manjil	0.02	2.759	6500	1086.355	6702	5.983	1.031	6.170
Bam	0.02	1.179	4345		6268	4.000	1.443	5.770
Kermanshah	0.02	0.988	3661		6621	3.370	1.809	6.095
Imperial Vally	0.02	10.865	1870		9979	1.721	5.336	9.186
		Average				3.506	2.270	6.749
		σ				1.292	1.308	1.646
		C.V.				0.369	0.576	0.244

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

۷- نتیجه‌گیری

بهبود لرزه‌ای و ارزیابی پاسخ لرزه‌ای دیوارهای برشی بتن مسلحِ معمولی با اســتفاده از عناصــر مرزی فولادیِ قابل‌تعویض یعنی مهاربندهای کمانشــی در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. به‌طور کلی، دیوار برشـی همراه با مهاربند کمانش‌تاب پیشـنهادی ثابت کرد که در بهبود پاسـخ سـازه‌ای مؤثر اسـت. در این بخش نکات قابل‌توجهی ارائه شده است:

– استفاده از المان مرزی فولادی تعویض‌پذیر باعث کاهش اندک سختی در سازه می‌گردد.

– با کاهش سختی در سازه با دیوار برشی بتن‌آرمه همراه با المان مرزی فولادیِ تعویض‌پذیر، جابه‌جایی نسـبی طبقات همچنان در محدودهٔ مجاز ۲٪ ارتفاع است.

– بـا حـذف المـان مرزی فولادیِ تعویض‌پـذیر، در منحنی هیسـترزیس پدیدهٔ پرچمی‌شـدن مشـاهده شـد و با کاهش سـطح زیر منحنی، شکل‌پذیری در سازهٔ ۶ و ۱۲ طبقه به‌ترتیب ۳۰ و ۲۵ درصد کاهش یافته است.

– با افزایش ارتفاع سـازه، تأثیر المان مرزی فولادیِ تعویض‌پذیر بر روی شــکل‌پذیری ســازه اندکی کاهش یافته، ولی همچنان شکل‌پذیری آن نسبت به دیوار برشی بدون المان مرزی فولادیِ تعویض‌پذیر بیش‌تر است.

– ضرایب اضافه‌مقاومت، شکل‌پذیری و ضریب رفتار قاب‌ها در سـازهٔ ۶ طبقه با سیسـتم دیوار برشـی بتن‌آرمه بدون المان مرزی فولادیِ تعویض‌پـذیر بـه‌ترتیـب برابر ۱/۹، ۱/۷ و ۳/۲ و برای سیستم دیوار برشی بتن‌آرمه با المان مرزی فولادیِ تعویض‌پذیر برابر ۲/۵، ۱/۹ و ۴/۲ می‌باشد.

– ضرایب اضافه‌مقاومت، شکل‌پذیری و ضریب رفتار قاب‌ها در سازهٔ ۱۲ طبقه با سیستم دیوار برشی بتن‌آرمه بدون المان مرزی فولادیِ تعویض‌پـذیر بـه‌ترتیـب برابر ۳/۱، ۲/۲ و ۵/۶ و برای سیستم دیوار برشی بتن‌آرمه با المان مرزی فولادیِ تعویض‌پذیر برابر ۳/۵، ۲/۳و ۶/۷ می‌باشد.

– مقدار ضــریب رفتار به‌دســت‌آمده در این تحقیق برای دیوار برشـــی بتن‌آرمـه بـدون المـان مرزی فولادی کم‌تر از مقـدار درنظرگرفته‌شده در آیین‌نامه است.

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]

۸- مراجع

[1] Tores, P., Mohehle, J., and ATC-94 Group (2010), "Recommendations for Seismic Design of Reinforced Concrete Walls Buildings Based on Studies of the Chile Earthquake", NEHRP Consultants Joint Venture , NIST GCR 14-917-25.

[2] Parsafar, S., and Moghadam, A.S. (2017), "Development of a rocking R/C shear wall system implementing repairable structural fuses", International Journal of Advanced Structural Engineering, 9(3): p. 247-258.

[3] Guo, T., Zhang, G., and Chen, C. (2014), "Experimental study on self-centering concrete wall with distributed friction devices", Journal of Earthquake Engineering, 18(2): p. 214-230.

[4] Chen, C., et al. (2018), "Study on the shear wall structure with combined form of replaceable devices", Advances in Structural Engineering, 21(9): p. 1327-1348.

[5] Watanabe, A., et al. (1988), "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube", in Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering.

[6] Dehghani, M., and Tremblay, R. (2018), "Design and full-scale experimental evaluation of a seismically endurant steel buckling-restrained brace system", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 47(1): p. 105-129.

[7] Razavi, S.A., et al., (2018), "Buckling-restrained brace with CFRP encasing: Mechanical behavior & cyclic response", Steel and Composite Structures, An International Journal, 27(6): p. 675-689.

[8] Razavi, S.A., Mirghaderi, S.R., and Hosseini, A. (2014), "Experimental and numerical developing of reduced length buckling-restrained braces", Engineering Structures, 77: p. 143-160.

[9] Mehdipanah, A., Mirghaderi, S.R., and Razavi S.A. (2016), "Seismic performance of stiffness-based designed buckling-restrained braced frame and special moment-resisting frame dual systems", Structure and Infrastructure Engineering, 12(8): p. 918-935.

[10] Carpenter, L.D., et al. (2011), "Performance of tall buildings in Viña del Mar in the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake", The Structural Design of Tall and Special Buildings, 20(1): p. 17-36.

[11] Kam, W.Y., and Pampanin, S. (2011), "The seismic performance of RC buildings in the 22 February 2011 Christchurch earthquake", Structural Concrete, 12(4): p. 223-233.

[12] Xiong, Z. (2008), "Lessons learned from Wenchuan earthquake: to improve the seismic design of school buildings", in 14th World Conference in Earthquake Engineering, Beijing, China.

[۱۳] مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۹۹) – مبحث نهم، طرح و اجرای ساختمانهای بتنآرمه، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، ایران.

[۱۴] مقررات ملی ساختمان ایران (۱۴۰۱) – مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمانهای فولادی، وزارت راه و شهرسازی، معاونت مسکن و ساختمان، ایران.

[۱۵] آییننامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله – استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۶)، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی.

[16] Cho, S.H., et al. (2004), "Structural steel boundary elements for ductile concrete walls. Journal of Structural Engineering", 130(5): p. 762-768.

[17] ASCE 7-22, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Standards. American Society of Civil Engineers.

[18] ATC-24, "Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures", 1992.

[Downloaded from old.journalisss.ir on 2026-02-07]