

Contribution of reinforcing bars on the cyclic performance of a curved RC shear wall: An experimental survey

H. Abdoos¹, A. R. Khaloo^{2*}

1- Ph.D. of Structural Engineering, Department of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Distinguished Professor, Department of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

This paper presents the findings of an state-of-the-art experimental testing program aiming to assess how the longitudinal and transverse reinforcements do contribute on the cyclic response of a curved reinforced concrete shear wall (CRCSW). To fulfill the research objectives, a one-third scale specimen is designed and fabricated, which has been equipped with a large number of strain gauges. In total, 32 strain gauges are attached to the longitudinal and transverse reinforcing bars. The loading is applied within the eight phases up to the target displacement, and the maximum experienced strain values are then captured. Afterward, the peak strain values are plotted against the drift values to thoroughly track the strain profile of the specimen. A general decreasing trend is observed for the strain values along the height of the CRCSW. The onset of longitudinal rebar yielding was at drift ratio of 0.54% and bearing capacity of 90.86 kN. In addition, the contribution of the longitudinal reinforcements is more significant than those of transverse reinforcements. Due to the shear span ratio of 1.3 for the CRCSW, this observation is compatible with the contribution of reinforcing bars in squat RCSW. Moreover, owing to the eccentricity of the lateral loading with respect to the shear center of the section, a warping torsion is introduced, which magnifies the axial stress and strain values, especially at the vicinity of the wall tips, and in turn, it can expedite the yielding occurrence of the longitudinal reinforcing bars. Furthermore, the average maximum induced stress within the mid-portion of the wall's cross-section ranged between 41% to 98% of the reinforcement's yielding stress from the top to mid-height of the wall. For the transverse reinforcements, the mentioned values are respectively 48, 66, and 85% of the yielding stress across the base, middle, and top levels of the wall height.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 March 2024

Revise Date: 20 May 2024

Accept Date: 21 June 2024

Keywords:

Experimental investigation

Curved RC shear wall

Cyclic response

Strain gauge

Warping torsion

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.449688.3376>

*Corresponding author: Alireza Khaloo.

Email address: khaloo@sharif.edu

بررسی آزمایشگاهی مشارکت آرماتورهای فولادی در عملکرد چرخه‌ای یک دیوار برشی بتنی مسلح خمیده

هاتف عبدوس^۱، علیرضا خالو^{۲*}

۱- دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه، مشارکت آرماتورهای فولادی یک دیوار برشی بتنی خمیده تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای و در غیاب بار محوری ارزیابی می‌شود. ابتدا، یک نمونه آزمایشگاهی با مقیاس یک‌سوم طراحی و ساخته شد و تحت بارگذاری جانبی تا جابه‌جایی نسبی هدف دو درصد قرار گرفت. فرایند ساخت و ابزار دقیق نمونه در آزمایشگاه دینامیک سازه کف قوی دانشگاه صنعتی شریف انجام شد. به منظور تعیین میزان مشارکت آرماتورهای فولادی در عملکرد چرخه‌ای دیوار برشی خمیده، در مجموع، از ۳۲ کرنش‌سنج استفاده شد که ۱۴ کرنش-سنج بر روی آرماتورهای طولی و ۱۸ کرنش‌سنج بر روی آرماتورهای عرضی تعبیه شد. با توجه به اعمال بار به مرکز سطح مقطع دیوار خمیده و خروج از مرکزیت راستای بارگذاری با مرکز برش، مقطع در معرض اعوجاج پیچشی قرار گرفت و منجر به تغییر شکل و تنش‌های محوری مازاد بر لنگر خمشی شده و آرماتورهای طولی را، خصوصاً در نواحی مرزی دیوار، در معرض افزایش تنش و تسلیم‌شدگی قرار داد. مقادیر ثبت‌شده از کرنش‌سنج‌ها نشانگر مشارکت بیشتر آرماتورهای طولی در قیاس با آرماتورهای عرضی بوده و درصد عمده آرماتورهای طولی، خصوصاً در نواحی پای دیوار و نزدیک به فصل مشترک پی و دیوار، تسلیم شده و شروع آن در جابه‌جایی جانبی نسبی ۰/۵۴ درصد و بار متناظر ۹۰/۸۶ کیلونیوتن رخ داده است. تا پیش از رسیدن دیوار برشی خمیده به جابه‌جایی جانبی هدف، شواهدی دال بر تسلیم‌شدگی آرماتورهای عرضی مشاهده نشد. با توجه به نسبت ابعادی ۱/۳ و کوتاه بودن دیوار، این نتیجه‌گیری با مشارکت آرماتورها در دیوارهای مستطیلی و غیرمستطیلی بالدار مطابقت داشت. همچنین، میانگین بیشینه مقادیر تنش آرماتورهای طولی در نیمه میانی مقطع و در تراز میانی و فوقانی ارتفاع دیوار به ترتیب ۹۸ و ۴۱ درصد تنش تسلیم آرماتورها بوده و برای آرماتورهای عرضی، به ترتیب در ترازهای پایه، میانی، و فوقانی به ترتیب ۸۵، ۶۶، و ۴۸ درصد تنش تسلیم آرماتورها اندازه‌گیری شد.

کلمات کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی، دیوار برشی بتنی خمیده، بارگذاری چرخه‌ای، کرنش‌سنج، اعوجاج پیچشی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.449688.3376	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.449688.3376	۱۴۰۳/۱۱/۳۰	۱۴۰۳/۰۴/۰۱	۱۴۰۳/۰۴/۰۱	۱۴۰۳/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۰۱/۰۴
			علیرضا خالو		*نویسنده مسئول:	
			khaloo@sharif.edu		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه بکارگیری المان‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای با انحنای در پلان و ارتفاع به عنوان یکی از گزینه‌های مطلوب معماران و طراحان سازه مطرح بوده و در صنعت ساخت و ساز اجرا می‌شوند [۱-۵]. در این بین، استفاده از دیوارهای برشی بتنی خمیده به عنوان المان سازه‌ای با هندسه منحصر بفرد، با هدف تأمین باربری جانبی و ثقلی در سازه‌های کوتاه مرتبه تا بلندمرتبه، توجه پژوهشگران را به خود معطوف داشته است، چرا که علاوه بر جنبه‌های معماری و زیبایی‌شناختی، منجر به تسهیل انتقال و توزیع بهتر بارهای جانبی شده، و بسته به هندسه قوس می‌تواند ظرفیت باربری و سختی مورد نیاز را در هر دو جهت اصلی پلان سازه فراهم آورد [۶-۷]. همچنین، استفاده از دیوارهای برشی بتنی با مقطع خمیده در پلان نه تنها می‌تواند منجر به حذف المان مرزی در محل برخورد جان و بال دیوارهای با مقطع غیرمستطیلی بالدار شود، بلکه اثرات منفی ناشی از تمرکز تنش متأثر از پدیده تأخیر برشی^۱ را به حداقل می‌رساند [۸-۱۲]. این پدیده در قالب مطالعات آزمایشگاهی [۱۳-۱۶]، تحلیلی [۱۷، ۱۱، ۶]، و عددی [۱۸-۲۲] پیرامون دیوارهای برشی بتنی غیرمستطیلی بررسی شده و عرض مؤثری^۲ که در محاسبات تحلیلی و عددی مقاطع بالدار تعریف می‌شود، مبتنی بر مفاهیم تأخیر برشی و با در نظر گرفتن اثرات ناشی از آن می‌باشد [۲۳-۲۴].

۲- مرور ادبیات فنی

در ادامه و در بخش مرور ادبیات فنی، یک طبقه‌بندی مدون با در نظر گرفتن مقاطع پر کاربرد و اجرایی از دیوارهای غیرمستطیلی با مقطع T-شکل، U-شکل، L-شکل، و H-شکل به تفکیک ارائه شده و در آن تمرکز بر مطالعات آزمایشگاهی با محوریت عملکرد چرخه‌ای این مقاطع تحت بارگذاری جانبی و در معرض بارگذاری محوری، در صورت وجود، است.

از اولین پژوهش‌های انجام شده بر روی دیوارهای T-شکل می‌توان به آزمایش گودسیر [۲۵] در سال ۱۹۸۵ اشاره نمود که در چارچوب آن، یک نمونه در مقیاس ۰/۳۳ ساخته شد و جابه‌جایی خارج از صفحه و خردشدگی بتن پای دیوار به عنوان سازوکار خرابی آن معرفی شد. تامسن و والاس [۲۶] عملکرد چرخه‌ای دو نمونه دیوار T-شکل را در مقیاس ۰/۲۵ ارزیابی نمودند که بار محوری در محدوده $0.07 f'_c A_g$ تا $0.10 f'_c A_g$ به دیوارها اعمال شده بود و نحوه خرابی در المان‌های مرزی دیوار مد نظر قرار گرفت. همچنین، در مطالعات آزمایشگاهی چویی و همکاران [۲۷]، تأثیر جزئیات محصورشدگی در نواحی مرزی دو دیوار برشی T-شکل در عملکرد لرزه‌ای و نیز شکل-پذیری آن‌ها ارزیابی شد. بروگن و همکاران [۲۸] با ساخت دو نمونه آزمایشگاهی، اثر متغیرهای اجرایی مانند درصد آرماتورهای طولی و عرضی، وصله‌گذاری آرماتورها، ابعاد و جزئیات المان‌های مرزی، و تأخیر برشی را در دیوارهای برشی با مقطع T-شکل مطالعه نمودند. لن و همکاران [۲۹]، پنج دیوار برشی T-شکل و در مقیاس ۰/۵۰ را با المان‌های مرزی H-شکل فولادی تحت بارگذاری جانبی در جهات مختلف آزمایش نمودند و خرابی تمامی دیوارها متأثر از سازوکار شکست برشی و از نوع شکست فشاری قطری اعلام شد. آلمیدا و همکاران [۳۰]، پنج نمونه آزمایشگاهی در مقیاس‌های ۰/۶۷ تا ۱/۰۰ را در آزمایشگاه مهندسی زلزله و دینامیک سازه دانشگاه EPFL سوئیس ساختند و اثر بارگذاری درون صفحه دوجہته، ضخامت دیوار، و نسبت دهانه برشی را در عملکرد سازه‌ای دیوارهای T-شکل مشخص نمودند.

سیتیپانت و وود [۳۱] با ساخت دو دیوار برشی بتنی با مقطع U-شکل، مؤلفه‌های پاسخ این دیوارها را با محاسبه قابلیت اتلاف انرژی، سختی مؤثر در سطوح مختلف جابه‌جایی، و تأثیر آرماتورهای جان ارزیابی نمودند. آیلی و رینوارد [۳۲] با ساخت سه نمونه دیوار U-شکل بزرگ مقیاس و تأمین محصورشدگی در نواحی مرزی این دیوارها توانستند با حفظ پایداری کامل، مقدار شکل‌پذیری تغییرمکانی $\mu=6$ را تحت بارگذاری تک‌جهته و دوجہته فراهم آورند. بپر و همکاران [۳۳]، در قالب مطالعات آزمایشگاهی، دو دیوار برشی U-شکل را در مقیاس ۰/۵۰ ساختند و به اهمیت راستای اعمال بارگذاری در شکل‌پذیری، ظرفیت باربری و نیز سازوکار انتقال نیرو در محل تقاطع بال و جان این مقاطع اشاره شد. کنستانتین و بپر [۳۴] عملکرد لرزه‌ای دو دیوار برشی U-شکل را تحت بارگذاری دوجہته بررسی نمودند و بر

¹ Shear-Lag² Effective Width

اساس نتایج این آزمایش مشخص شد که ضوابط آیین‌نامه‌ای موجود برای: (۱) توزیع آرماتورهای طولی، (۲) فرض مستوی ماندن صفحات جهت ارزیابی ظرفیت باربری، (۳) طول محصورشدگی المان‌های مرزی بال دیوار، و (۴) ارزیابی پایداری خارج از صفحه نواحی انتهایی بال‌ها نیاز به بازنگری دارند.

ناکچی و همکاران [۳۵] چهار دیوار برشی L-شکل و در مقیاس ۰/۱۲۵ را تحت بارگذاری جانبی شبه‌استاتیکی و در حضور بار محوری آزمایش نمودند و به کارآمدی خاموت‌های بسته در محصورشدگی بتن در نواحی مرزی و نیز افزایش شکل‌پذیری دیوارها اشاره شد. هوساکا و همکاران [۳۶] با ساخت چهار نمونه در مقیاس ۰/۱۷، اثر محصورکنندگی آرایش آرماتورهای عرضی در نواحی مرزی دیوار و مقاومت بتن را بررسی نمودند. اینادا و همکاران [۳۷] سه نمونه دیوار برشی L-شکل را، به عنوان بخشی از هسته مرکزی یک ساختمان ۴۰ طبقه و در مقیاس ۰/۲۲ ساختند. سازوکار خرابی دیوارها متأثر از خردشدگی بتن در ناحیه فشاری بوده و با استفاده از آرماتورهای محصورکننده در نواحی مرزی دیوار، شکل‌پذیری بیشتری در مقطع تأمین شد.

لی و لی [۳۸] شش دیوار L-شکل و با مقیاس ۰/۵۰ را تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دارند و نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش نسبت ارتفاع به ضخامت دیوار، عملکرد لرزه‌ای سازه تضعیف شده و با افزایش نیروی محوری وارد شده به مقطع، منحنی چرخه‌ای دیوارها نامتقارن‌تر شده است. همچنین، نتایج مطالعات آزمایشگاهی کونو و همکاران [۳۹]، بر اساس دو دیوار L-شکل با مقیاس ۰/۱۳، نشانگر اهمیت محصورشدگی نواحی مرزی در سازوکار خرابی این دیوارها می‌باشد. حسن‌البنت و ایوبوف [۴۰] چهار دیوار با مقطع L-شکل و در مقیاس ۰/۵۰ و با نسبت‌های طول بال به ضخامت ۱:۳، ۱:۵، ۱:۸، و ۱:۱۰ را تحت بارگذاری چرخه‌ای و نسبت بار محوری ۰/۱ آزمایش نمودند. بر اساس نتایج این آزمایش، شکل‌پذیری نمونه‌ها در بازه ۳/۴۵ تا ۴/۱۵ قرار داشت و افزایش بار محوری منجر به کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها شد.

در مطالعات آزمایشگاهی ما و لی [۴۱] بر روی چهار دیوار برشی کوتاه با نسبت ابعادی ۰/۶۷، تأثیر راستای اعمال بارگذاری و نیز نیروی محوری بر عملکرد لرزه‌ای این دیوارها ارزیابی شد که بر اساس نتایج حاصل، اعمال نیروی محوری فشاری افزایش ۲۷ درصدی سختی مؤثر دیوار را به همراه داشته است. هان و همکاران [۴۲] دوازده دیوار برشی L-شکل را تحت بارگذاری چرخه‌ای جانبی و در حضور مقادیر مختلفی از بار محوری آزمایش کردند. در تمامی نمونه‌ها، پیش از نائل شدن به ظرفیت باربری بیشینه، تسلیم‌شدگی آرماتورهای طولی در نواحی مرزی دیوار مشاهده شد و سازوکار خرابی نمونه‌ها متأثر از نسبت دهانه برشی دیوارها اعلام شد.

کیتادا و همکاران [۴۳]، با هدف ارتقای عملکرد دیوارهای برشی بالدار، دو دیوار H-شکل را روی میز لرزان آزمایش نمودند و در نهایت، بروز ترک‌های برشی در ناحیه میانی جان دیوار، ترک‌های افقی بال، و وقوع لغزش در ناحیه تحتانی جان دیوار منجر به خرابی دیوارها شد. ماروتا و همکاران [۴۴]، با ساخت نه دیوار برشی H-شکل در مقیاس ۰/۵۰، تأثیر لنگر پیچشی را که بصورت درصدی از لنگر خمشی در تراز پایه دیوار اعمال شده بود، در عملکرد سازه‌ای این دیوارها ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج این آزمایش تعیین شد که ظرفیت پیچشی تابعی از نسبت لنگر پیچشی وارده به لنگر خمشی در تراز پایه دیوار بوده و نیز مشارکت جان دیوار H-شکل در ظرفیت پیچشی مقطع قابل‌ملاحظه نمی‌باشد. پالرمو و وکیو دو دیوار H-شکل را تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش نمودند و سازوکار خرابی دیوار اول ناشی از خردشدگی بتن در شش صفحه قائم و موازی در طول جان دیوار و برای دیوار دوم متأثر از وقوع لغزش در تراز فوقانی جان دیوار بوده است. ما و لی [۱۵] دو دیوار H-شکل را در معرض بارگذاری جانبی ۴۵ درجه نسبت به جان مقطع قرار دادند تا عملکرد این دیوارها را تحت بارگذاری غیر از جهات اصلی خمش ارزیابی نمایند که در آن، عملکرد سازه‌ای دیوارها از منظر روند تغییرات کرنش و الگوی ترک-خوردگی مقایسه شد.

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده پیرامون دیوارهای برشی با مقطع غیرمستطیلی، راستای اعمال بارگذاری جانبی، عمدتاً ماراً بر مرکز سطح مقطع دیوار می‌باشد. این در حالی است که در این مقاطع، با توجه به مشخصات هندسی دیوار، ممکن است مرکز سطح و مرکز برش بر هم منطبق نباشند که به تبع آن، یک خروج از مرکزیت ذاتی به طول حد فاصل مرکز برش تا مرکز سطح مقطع وجود دارد و

منجر به اعمال لنگر پیچشی به مقطع دیوار می‌شود. در پژوهش‌های مشابه، اهمیت این موضوع در عملکرد دیوارهای برشی غیرمستطیلی و نیز کاهش سختی مؤثر ناشی از اثرات اعوجاج پیچشی^۳ در مقطع دیوار محرز شده است [۱۹،۴۵].

به عنوان جمع‌بندی می‌توان مطرح نمود که رفتار دیوارهای برشی بتنی اساساً متأثر از هندسه مقطع دیوار، مقدار آرماتورهای طولی و عرضی و نیز نحوه چیدمان آنها در مقطع دیوار می‌باشد [۴۶-۴۷] و بررسی ادبیات فنی نیز نشان می‌دهد که مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی، و عددی بسیار محدودی پیرامون دیوارهای برشی بتنی خمیده صورت گرفته است و رفتار این المان‌های سازه‌ای بعضاً ناشناخته باقیمانده است. لذا، در این پژوهش که بصورت آزمایشگاهی انجام شده، مد نظر است تا هندسه مقطع دیوار که بخشی از کمان یک دایره با شعاع انحنای ثابت است با آرماتورهای طولی و عرض مسلح شود که در آن، آرماتورهای عرضی نیز بخشی از کمان دایره و با شعاع ثابت هستند. در حالت کلی، برخلاف دیوارهای مستطیلی و غیرمستطیلی بالدار که آرماتورهای عرضی آنها بصورت مستقیم اجرا می‌شوند، در دیوارهای برشی بتنی خمیده، آرماتورهای عرضی بصورت منحنی و بر اساس هندسه دیوار و نقشه‌های اجرایی ساخته می‌شوند که با توجه به ضخامت دیوار، شعاع انحنای آرماتورهای عرضی داخلی و خارجی در یک تراز ارتفاعی ثابت، متفاوت می‌باشد.

بنا به توضیحات فوق، که در آن به اهمیت فرایند ساخت و نکات اجرای دیوارهای برشی بتنی مسلح خمیده اشاره شد، ساختار مقاله در ادامه بشرح زیر می‌باشد. در فصل دوم، جزئیاتی از برنامه مطالعات آزمایشگاهی شامل مشخصات هندسی و مکانیکی نمونه، چیدمان آزمایش، نصب تجهیزات و ابزار دقیق بیان می‌شود. در بخش سوم، مشاهدات آزمایشگاهی و ثبت داده‌های حاصل از کرنش سنج‌های نصب شده در نقاط از پیش تعیین شده بر روی آرماتورهای طولی و عرضی ارائه می‌شود. تحلیل و تفسیر نتایج، با محوریت بررسی میزان مشارکت آرماتورهای طولی و عرضی، در بخش چهارم این پژوهش انجام شده و در فصل پنجم، خلاصه‌ای از نتایج به همراه نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۳- برنامه مطالعه آزمایشگاهی

۳-۱- فرضیات آزمایش

مطالعات آزمایشگاهی و مستندات این پژوهش با هدف ارتقای شناخت فعلی مهندسان، معماران، و پژوهشگران نسبت به رفتار سازه‌ای دیوارهای برشی بتنی خمیده تدارک دیده شده و تمامی مراحل ساخت، آماده‌سازی نمونه و چیدمان آزمایش در آزمایشگاه دینامیک سازه کف قوی دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. نظر به مطالعات اندک صورت گرفته در این زمینه، گستره انجام کار، و محدودیت‌های آزمایشگاهی و اجرایی موجود، فرضیاتی در فرایند طراحی، قالب‌بندی و ساخت نمونه اعمال شد که به برخی از مهمترین آنها اشاره می‌شود:

- (۱) مقطع دایره بخشی از کمان دایره با شعاع انحنای ثابت است،
- (۲) ضخامت مقطع دیوار در طول آن ثابت می‌باشد،
- (۳) دیوار فاقد المان مرزی در نواحی انتهایی است،
- (۴) بارگذاری دیوار در راستای ثقلی، در غیاب بار محوری خارجی بوده و مقطع دیوار صرفاً تحت اثر وزن تیر فوقانی آن قرار دارد،
- (۵) جانمایی تیر بارگذاری روی دیوار خمیده و نحوه اعمال بارگذاری جانبی بگونه‌ای است که بار به مرکز سطح مقطع وارد می‌شود.
- (۶) با توجه به خروج از مرکزیت محل اعمال بارگذاری از مرکز برش مقطع دیوار، یک آرماتور طولی مازاد در دورترین‌های کنج-های مقطع تعبیه شده تا از وقوع خرابی پیش از موعد ناشی از اعوجاج پیچشی ممانعت بعمل آید.
- (۷) چینش آرماتورهای طولی در مقطع دیوار خمیده در راستاهای عبوری از مرکز دایره فرضی قوس صورت گرفته شده است.

³ Warping Torsion

(۸) با توجه به تفاوت شعاع انحنای آرماتورهای عرضی در یک تراز ثابت، خاموت‌ها بصورت دو تکه ساخته و بصورت هم‌تراز اجرا شده است.

۳-۲- چیدمان آزمایش

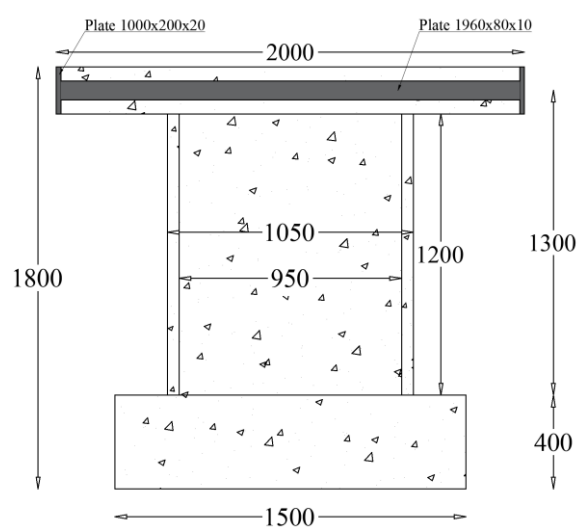
با مد نظر قرار دادن فرضیات مطرح شده در زیربخش پیشین، نمونه‌ای با مقیاس تقریبی ۰/۳۳ ساخته شد و جزئیات طراحی و ساخت دیوار برشی بتنی مسلح خمیده نیز متناظر با مقیاس انجام آزمایش در نقشه‌های اجرایی نمونه پیاده‌سازی شد [۴۸]. در فرایند ساخت نمونه، ابتدا با در نظر گرفتن ضوابط مندرج در آیین‌نامه بتن آمریکا برای دیوارهای برشی بتنی با مقطع مستطیلی، الزاماتی در راستای تناسبات تحلیل و طراحی دیوار برشی بتنی خمیده آزمایش شده لحاظ گردید. سپس، ابعاد و مشخصات هندسی نمونه و مشخصات مکانیکی فولاد و بتن خودمتراکم، با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه، ظرفیت باربری جک و تراز ارتفاعی جک، تغییر سیستم بارگذاری وارده به سازه بوده که قابلیت تأمین جابه‌جایی خارج از صفحه نیز برای آن فراهم شده است. با توجه به تغییرات عمده اعمال شده در سیستم بارگذاری و در جهت اطمینان و ایمنی دستگاه‌ها، از ۵۰ درصد ظرفیت اسمی جک (۲۸۰ کیلونیوتن) استفاده شد.

در شکل ۱، جزئیات نقشه‌های اجرایی و تصاویر نهایی مربوط به نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی خمیده ساخته شده نشان داده شده که در آن تمامی ابعاد به میلی‌متر هستند. مقطع دیوار خمیده کمانی از دایره با ضخامت ثابت ۱۰۰ میلی‌متر و زاویه انحنای ۶۰ درجه بوده و شعاع مرکزی مقطع تا وسط ضخامت دیوار ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد. ارتفاع پانل دیوار ۱۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت تیر بارگذاری ۲۰۰ میلی‌متر بوده و به تبع آن، فاصله فصل مشترک پی و دیوار تا محل اعمال بارگذاری، که وسط تیر بارگذاری است، ۱۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

آرماتورهای مسلح‌کننده مقطع دیوار متشکل از میلگردهای طولی و عرضی و سنجاق‌ها با قطر اسمی ۸ میلی‌متر هستند که در مجموع، ۲۰ آرماتور طولی مشتمل بر ۱۶ آرماتور طولی در ۱۶ راستا به همراه آرماتورهای مازاد بر اساس فرض (۶)، در دو ردیف شعاعی در مقطع تعبیه شده که فاصله مرکز به مرکز آرماتورهای طولی در دو لایه داخلی و خارجی به ترتیب ۱۳۵/۷ و ۱۴۳/۴ میلی‌متر و درصد اجرایی آرماتورهای طولی مقطع دیوار ۱/۰۰ می‌باشد. همچنین، آرماتورهای عرضی به دو صورت اجرا شده است: (۱) آرماتورهای خمیده اصلی که در برگیرنده آرماتورهای طولی مقطع هستند، و (۲) سنجاق‌ها. آرماتورهای خمیده اصلی به صورت دو تکه مجزا و در فواصل ۱۵۰ میلی‌متری و هر دو انتهای آنها با خم ۱۳۵ درجه اجرا شده است. بخش اول، در برگیرنده آرماتورهای طولی خارجی با شعاع بیشتر و بخش دوم، در برگیرنده آرماتورهای طولی داخلی با شعاع کمتر است. سنجاق‌ها نیز آرماتورهای طولی را در راستای شعاعی در بردارند و انتهای آنها یک درمیان در مقطع و ارتفاع دیوار خم ۹۰ و ۱۳۵ درجه را به صورت استاندارد دارند. همچنین، درصد معادل آرماتورهای عرضی مقطع ۰/۶۷ درصد می‌باشد. جزئیات مربوط به نوردکاری و اجرای خم آرماتورهای عرضی دیوار در بخش پیوست مقاله عبدوس و خالو [۷] آورده شده است.



(۲) تصویر نمونه ساخته شده

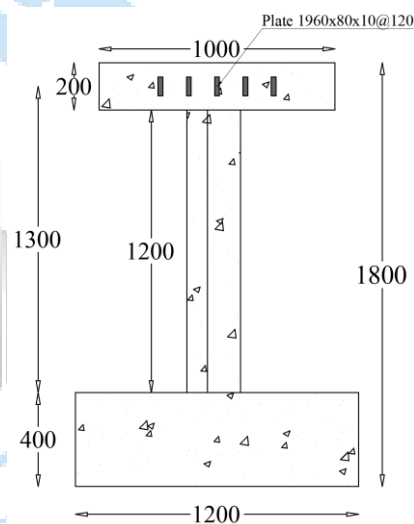


(۱) طرح شماتیک نقشه‌های اجرایی

(الف) نمای روبروی نمونه از داخل قوس



(۲) تصویر نمونه ساخته شده

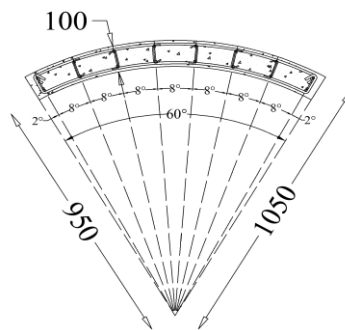


(۱) طرح شماتیک نقشه‌های اجرایی

(ب) نمای شرقی نمونه



(۲) تصویر نمونه ساخته شده



(۱) طرح شماتیک نقشه‌های اجرایی

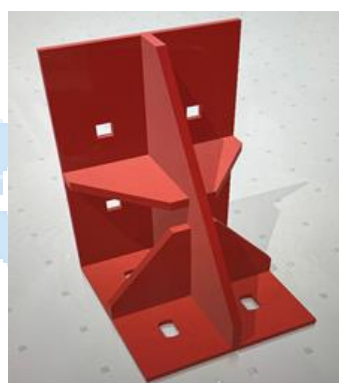
(ج) سطح مقطع دیوار

شکل ۱: جزئیات اجرایی و مشخصات هندسی نمونه دیوار برشی خمیده (تمامی ابعاد به میلی‌متر هستند).

پی و تیر بارگذاری نمونه با استفاده از شبکه آرماتورهای فولادی تحتانی و فوقانی $\Phi 20 @ 130 \text{mm}$ مسلح شده است. یکی از مراحل مهم در انجام این آزمایش، لزوم توجه به چگونگی اتصال پی به کف آزمایشگاه بود که در آن، میزان بلندشدگی، جابجایی و چرخش پی در طی فرآیند بارگذاری چرخه‌ای به حداقل برسد. به منظور کاهش ابعاد پی و به تبع آن، کاهش حجم بتن‌ریزی، از میل‌مهاری استفاده شده که بصورت جانبی از عرض پی عبور کرده و با استفاده از ۶ قطعه فولادی امکان اتصال آن به کف قوی آزمایشگاه فراهم گردید. اتصال ورق فولادی L-شکل که با سخت‌کننده‌هایی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر از یک بال به پی و از طریق ۴ میل‌مهاری سرتاسری به قطر ۲۰ میلی‌متر و طول ۱۴۰۰ میلی‌متر که پیش از بتن‌ریزی پی و در عرض آن تعبیه شده و در آن مدفون بوده، فراهم گردید و از بال دیگر، با استفاده از ۴ پیچ فولادی پرمقاومت ۲۵ میلی‌متری به کف آزمایشگاه متصل می‌شوند. در نهایت، این اتصالات با ۱۶ پیچ پرمقاومت ۲۵ میلی‌متری به کف آزمایشگاه وصل شده و با استفاده از تورک‌متر و به صورت اصطکاکی بسته شده‌اند. شکل ۲ بیانگر جزئیات ساخت قطعه رابط فولادی بین پی نمونه آزمایشگاهی و کف قوی آزمایشگاه می‌باشد.



(۲) ساخت قطعه فولادی رابط بین پی و کف قوی



(۱) طرح سه‌بعدی قطعات فولادی رابط



(۳) وضعیت قرارگیری میل‌مهاری در پی نمونه



(۴) وضعیت نهایی اتصال پی به کف قوی آزمایشگاه

شکل ۲: اتصال پی به کف قوی از طریق میل مهارها و قطعات فولادی رابط L-شکل.

از لحاظ محاسبه تئوری، ظرفیت این پیچ‌ها به مراتب بالاتر از نیروهای وارده به آنها بوده و می‌توان نسبت به عملکرد پی در بارگذاری اطمینان خاطر داشت. با این حال، بر اساس اطلاعات حاصل از پردازش تصاویر، میزان جابه‌جایی و چرخش‌های احتمالی به‌طور کامل رصد شد و مقادیر اندازه‌گیری بسیار ناچیز بوده و اتصال نمونه آزمایشگاهی به کف قوی آزمایشگاه را می‌توان بصورت گیردار فرض نمود.

همچنین، به‌منظور حصول اطمینان از انتقال یکنواخت بارگذاری جانبی وارده به دیوار، پنج ورق پیوستگی سرتاسری به ابعاد $1960\text{mm} \times 80\text{mm} \times 10\text{mm}$ از جنس فولاد St52 در تیر بارگذاری تعبیه شده و بصورت نفوذی کامل به ورق‌های ابتدایی و انتهایی جوش داده شده است. با توجه به اضافه شدن اعوجاج پیچشی به نیروهای وارده به سازه دیوار برشی خمیده که متأثر از خروج از مرکزیت مرکز برش از مرکز سطح (عبوری از راستای اعمال بارگذاری جانبی) است، نمونه ساخته شده تغییرشکل‌های خارج از صفحه را تجربه می‌کند. در نتیجه، تغییرات موردنیاز در سیستم بارگذاری موجود در آزمایشگاه، جهت تأمین همزمان حرکت‌های درون‌صفحه و خارج از صفحه نمونه آزمایشگاهی، اعمال شد که در مقاله عبدوس و خالو [۷] جزئیات مربوط به اجزای تشکیل‌دهنده، نحوه طراحی، و سازوکار این سیستم بارگذاری تشریح شده است.

تمامی آرماتورهای استفاده شده از نوع S420 بوده و بر اساس نتایج آزمایش کشش مستقیم [۴۹] بر روی سه نمونه میلگرد، مقادیر تنش تسلیم، تنش نهایی، و مدول الاستیسیته میلگردهای طولی و عرضی مسلح‌کننده دیوار به ترتیب ۴۷۷ مگاپاسکال، ۶۰۰ مگاپاسکال، و ۲۰۵ گیگاپاسکال می‌باشد. همچنین، طرح مخلوط بتن استفاده شده در تمامی اجزای تشکیل‌دهنده نمونه، شامل پی، دیوار، و تیر بارگذاری، یکسان بوده و با توجه به تراکم میلگردها در نمونه، ضخامت کم نمونه، و هندسه خمیده آن، از بتن خودمتراکم^۴ با قابلیت کارایی و روانی بالا استفاده شد که علاوه بر تأمین سطح ظاهری مطلوب برای بدنه دیوار خمیده جهت نصب کرنش‌سنج بر روی آن، آسیبی به حسگرهای مدفون و نصب‌شده بر روی آرماتورهای فولادی طولی و عرضی وارد نشود. در روز آزمایش، میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای اخذ شده از بتن دیوار ۴۶٫۲۶ مگاپاسکال می‌باشد.

بارگذاری وارده به دیوار به صورت جانبی و چرخه‌ای در غیاب بار محوری بوده و به‌منظور برداشت جزئیات عملکرد سازه در فرایند بارگذاری چرخه‌ای، افزایش دامنه جابه‌جایی‌های هدف یک میلی‌متر و با دو تکرار در هر چرخه در نظر گرفته شده و این الگوی بارگذاری بر اساس پژوهش‌های مشابه انجام شده بر روی دیوارهای برشی بتنی با مقطع غیرمستطیلی انتخاب شده است [۵۰، ۵۱]. همچنین، بارگذاری جانبی با نرخ ۵ میلی‌متر در دقیقه [۵۲] تا رسیدن به جابه‌جایی هدف ۲۶ میلی‌متری، معادل جابه‌جایی جانبی نسبی دو درصد، به تراز میانی تیر بارگذاری که از مرکز سطح مقطع دیوار عبور می‌کند، اعمال شده است. معیار توقف بارگذاری جانبی وارده به سازه، کاهش ۵۰ درصدی ظرفیت باربری دیوار برشی بتنی خمیده منظور گردید. لازم به ذکر است که اعمال بارگذاری، مطابق جدول ۱، در هشت گام صورت گرفته و بیشینه جابه‌جایی در هر گام به عنوان نماینده آن معرفی می‌شود تا بتوان در بخش سوم این پژوهش، مشاهدات و ثبت نتایج آزمایشگاهی، روند تغییرات کرنش ایجاد شده در آرماتورهای طولی و عرضی را ارزیابی نمود.

^۴ Self-Compacting Concrete (SCC)

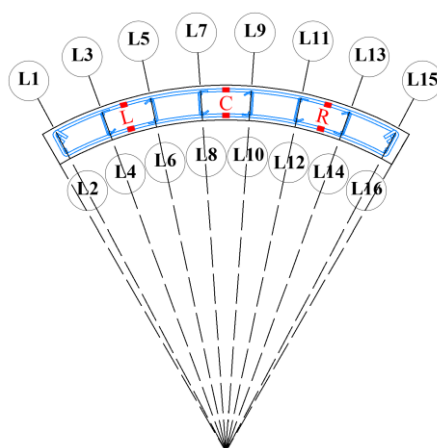
جدول ۱: گام‌های اعمال بارگذاری جانبی چرخه‌ای.								
شماره گام	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
جابه‌جایی هدف (میلی‌متر)	۵-۰	۸-۵	۱۱-۸	۱۴-۱۱	۱۷-۱۴	۲۰-۱۷	۲۳-۲۰	۲۶-۲۳
جابه‌جایی جانبی نسبی (درصد)	۰٫۳۸-۰	۰٫۶۲-۰٫۳۸	۰٫۸۵-۰٫۶۲	۱٫۰۸-۰٫۸۵	۱٫۳۱-۱٫۰۸	۱٫۵۴-۱٫۳۱	۱٫۷۷-۱٫۵۴	۲٫۰۰-۱٫۷۷
نماینده گام	۰٫۳۸	۰٫۶۲	۰٫۸۵	۱٫۰۸	۱٫۳۱	۱٫۵۴	۱٫۷۷	۲٫۰۰

۳-۳- آرایش کرنش‌سنج‌ها و نحوه نام‌گذاری آنها

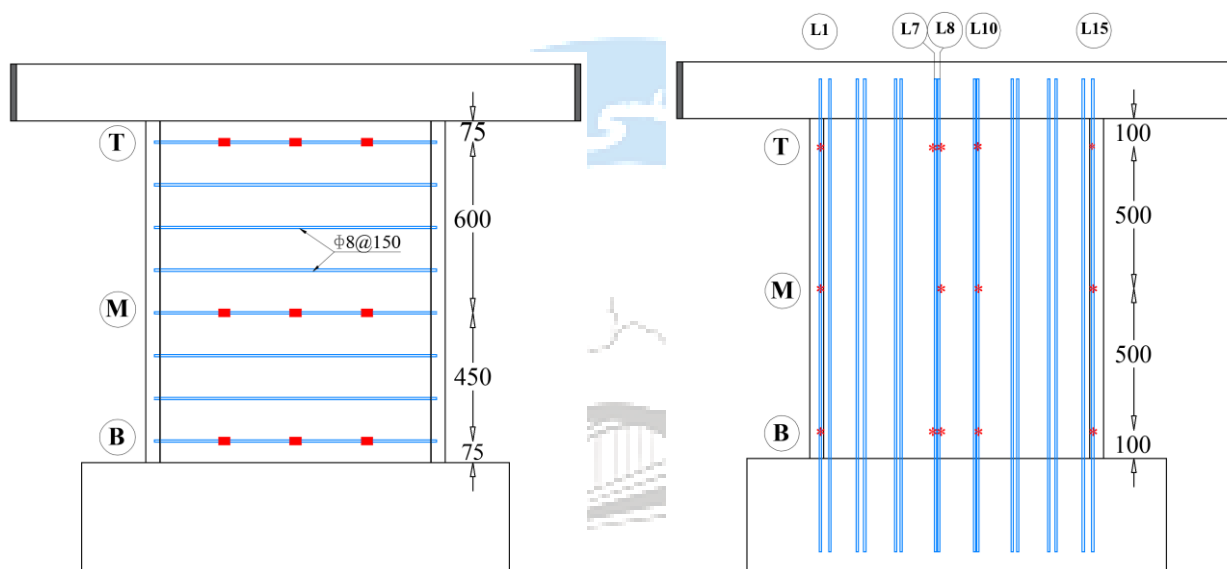
در قالب مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش، در مجموع ۳۲ کرنش‌سنج بر روی آرماتورهای فولادی مسلح‌کننده دیوار خمیده نصب گردید که از این بین، ۱۴ کرنش‌سنج روی آرماتورهای طولی و ۱۸ کرنش‌سنج روی آرماتورهای عرضی تعبیه شد. جانمایی کرنش‌سنج‌ها بگونه‌ای انتخاب شده تا روند تغییرات کرنش در فرایند بارگذاری وارده، در طول و ارتفاع دیوار برشی خمیده، قابل بررسی باشد. شکل ۳ موقعیت قرارگیری این کرنش‌سنج‌ها را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳ (ب)، موقعیت کرنش‌سنج‌های طولی در سه تراز تحتانی (B)، میانی (M)، و فوقانی (T) و در ۵ راستا با شماره‌های ۱، ۷، ۸، ۱۰، و ۱۵ قابل توصیف بوده که با پسوند LR^۵ و به همین منوال نامگذاری شده‌اند. به طریق مشابه و مطابق شکل ۲ (الف) و (ج)، آرماتورهای عرضی با پسوند TR^۶، در سه تراز تحتانی (B)، میانی (M)، و فوقانی (T) نام‌گذاری شده و در هر تراز ارتفاعی ثابت، آرماتور عرضی داخلی (I) با شعاع کمتر و آرماتور عرضی خارجی (O) با شعاع بیشتر، در سمت چپ (L)، وسط (C)، و راست (R) نمایش داده می‌شوند. به عنوان مثال، کرنش‌سنج نصب‌شده در تراز تحتانی آرماتور طولی مستقر در راستای ۱ با LR-B-1 نشان داده شده و کرنش‌سنج بخش میانی خاموت داخلی (با شعاع کمتر) و در تراز فوقانی ارتفاع TR-T-C-I نامگذاری شده است.

⁵ Longitudinal Reinforcement (LR)

⁶ Transverse Reinforcement (TR)



(الف) تصویر مقطع دیوار خمیده



(ج) تصویر ارتفاع دیوار خمیده، آرماتورهای عرضی

(ب) تصویر ارتفاع دیوار خمیده، آرماتورهای طولی

شکل ۳: جانمایی و نام گذاری کرنش سنج‌های نصب شده بر روی آرماتورهای طولی و عرضی (ابعاد به میلی‌متر هستند).

۴- مشاهدات و ثبت نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- مقدمه

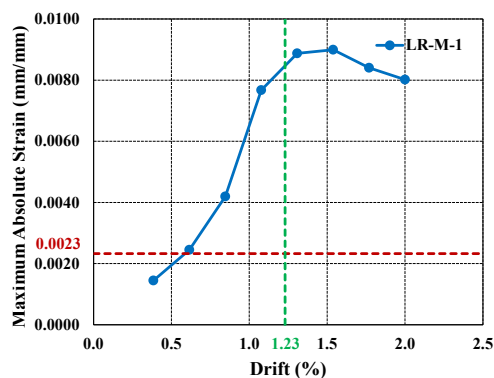
پس از تعیین فرایند اعمال بارگذاری بر اساس گام‌های تعریف شده، پس از ثبت روند تغییرات مقادیر کرنش ایجاد شده در محل نصب کرنش‌سنج‌ها، بیشینه مقدار آنها به عنوان پاسخ سیستم در آن گام تعیین و سپس منحنی تغییرات آن در طی هشت گام با درصد جابه‌جایی جانبی نسبی ترسیم و در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. با توجه به اینکه وقوع تسلیم‌شدگی در آرماتورهای فولادی می‌تواند به عنوان نقطه عطفی در عملکرد آن محسوب شود، در تمامی نمودارهای خط‌چین افقی قرمز رنگی ترسیم شده که آستانه وقوع تسلیم‌شدگی را نشان می‌دهد که با توجه به تنش تسلیم ۴۷۷ مگاپاسکالی و مدول الاستیسیته ۲۰۵ گیگاپاسکالی آرماتورها، مقدار کرنش تسلیم ۰/۰۰۲۳ می‌باشد. همچنین، با توجه به اینکه لحظه وقوع لغزش^۷ در فصل مشترک پی و دیوار به عنوان یک مرحله کلیدی در عملکرد سازه‌ای دیوارهای خمیده شناخته شده [۷]، جابه‌جایی جانبی نسبی متناظر آن، ۱/۲۳ درصد، با خط‌چین قائم سبز رنگ مشخص شده

⁷ Onset of sliding

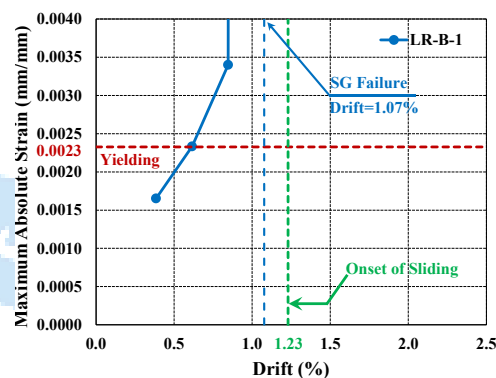
است. لازم به ذکر است که در برخی از نمودارها، عبارت SG Failure به همراه جابه‌جایی جانبی نسبی متناظر آن با رنگ آبی درج شده که نشان‌دهنده جداسازی کرنش‌سنج‌ها از محل نصب آنها ناشی از تغییر طول زیاد آرماتورهای فولادی و یا خرابی موضعی و شدید در محل نصب کرنش‌سنج‌ها می‌باشد.

۲-۴- آرماتورهای طولی

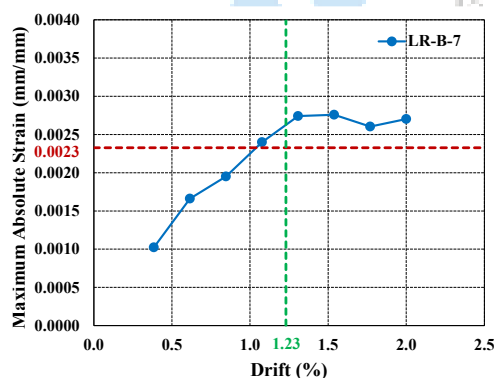
در شکل‌های ۴ (۱) تا ۴ (۱۴) روند تغییرات بیشینه کرنش اندازه‌گیری شده از آرماتورهای طولی بر حسب درصد جابه‌جایی جانبی نسبی در هشت گام ترسیم شده است.



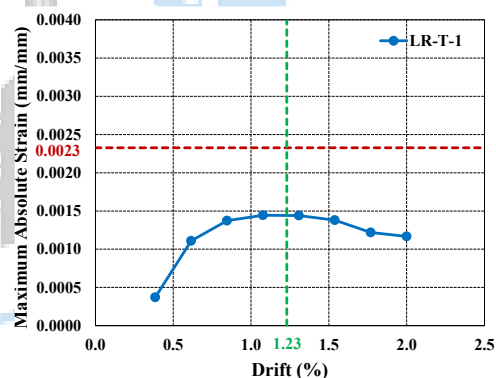
LR-M-1 (۲)



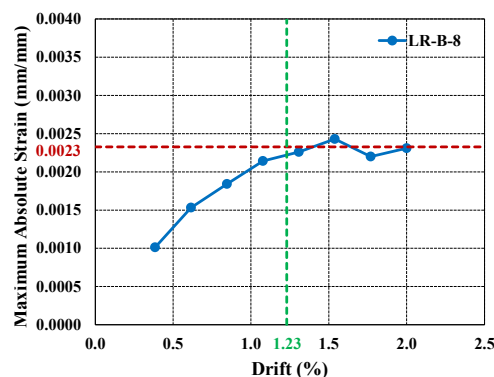
LR-B-1 (۱)



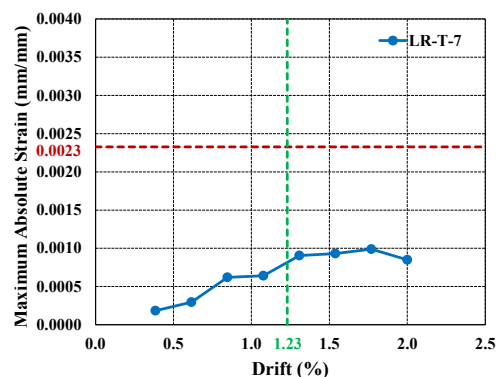
LR-B-7 (۴)



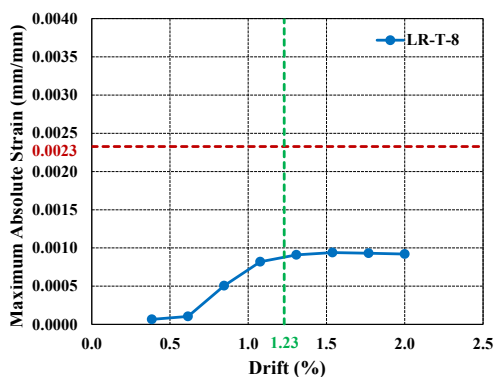
LR-T-1 (۳)



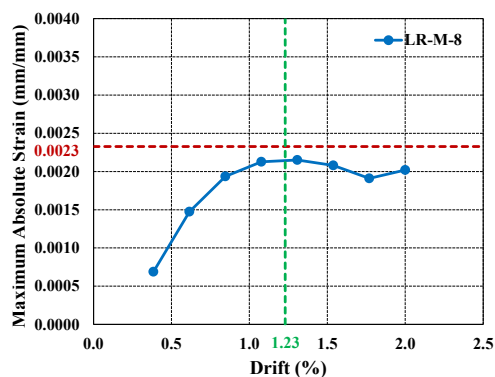
LR-B-8 (۶)



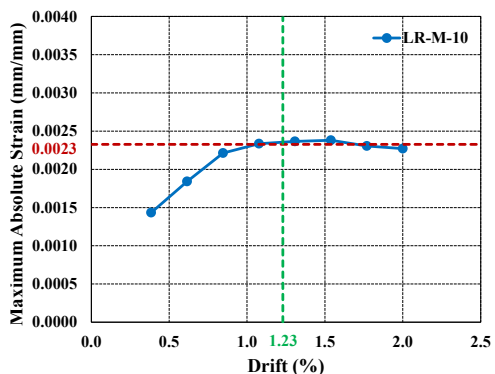
LR-T-7 (۵)



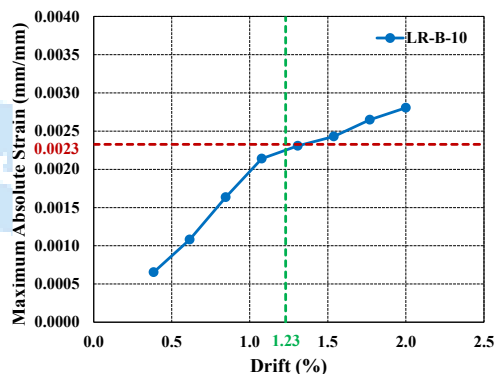
LR-T-8 (۸)



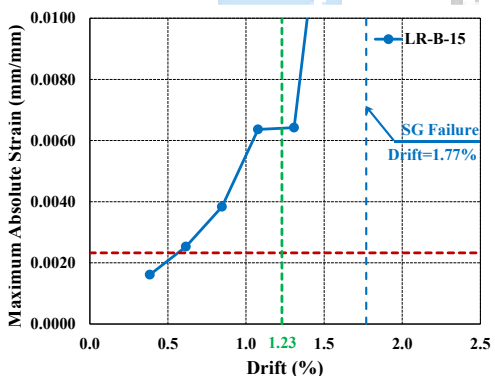
LR-M-8 (۷)



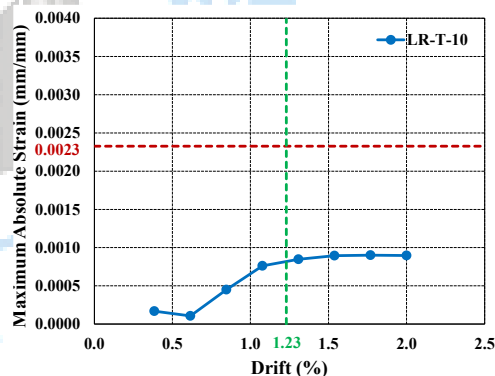
LR-M-10 (۱۰)



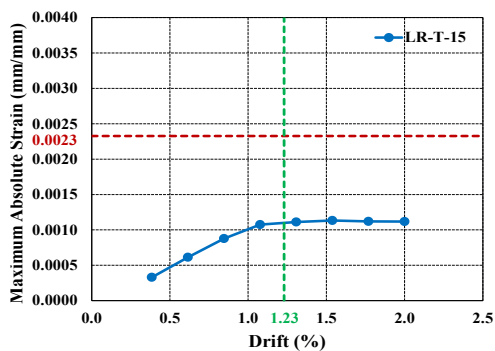
LR-B-10 (۹)



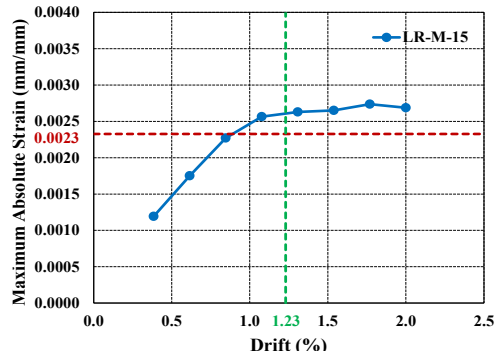
LR-B-15 (۱۲)



LR-T-10 (۱۱)



LR-T-15 (۱۴)

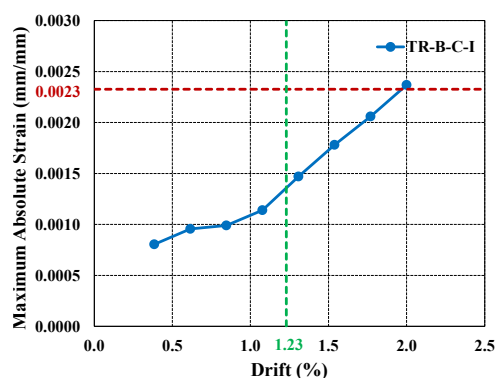


LR-M-15 (۱۳)

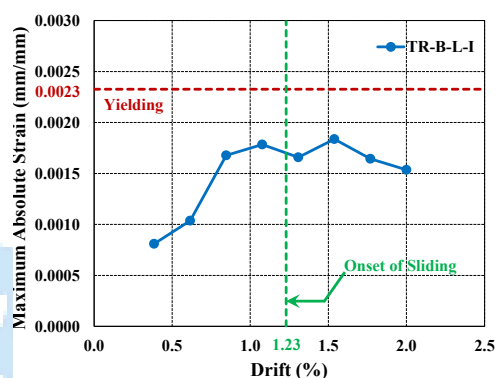
شکل ۴: نتایج حاصل از کرنش سنج‌های نصب‌شده بر روی آرماتورهای طولی.

۳-۴- آرماتورهای عرضی

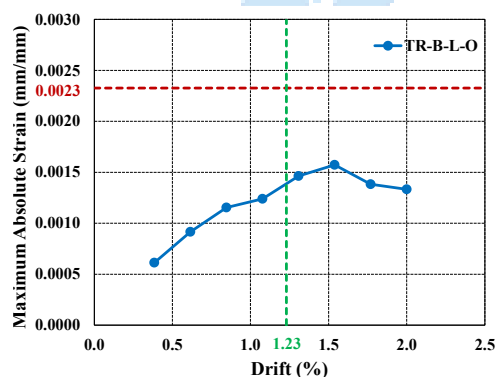
مطابق روند زیربخش پیشین، در شکل‌های ۵ (۱) تا (۱۷) چگونگی تغییرات بیشینه کرنش ثبت شده از آرماتورهای عرضی بر حسب درصد جابه‌جایی جانبی نسبی در هشت گام از بارگذاری وارده ترسیم شده است. همچنین، با توجه به اینکه در چرخه دوم از جابه‌جایی هدف ۳ میلی‌متری شواهد نشانگر جداشدگی کرنش سنج TR-B-R-I از محل نصب بر روی سطح میلگرد بوده، لذا در جهت اطمینان از درج نتایج آن صرف‌نظر شده است.



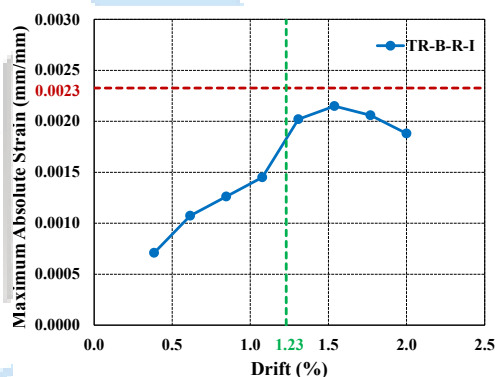
TR-B-C-I (۲)



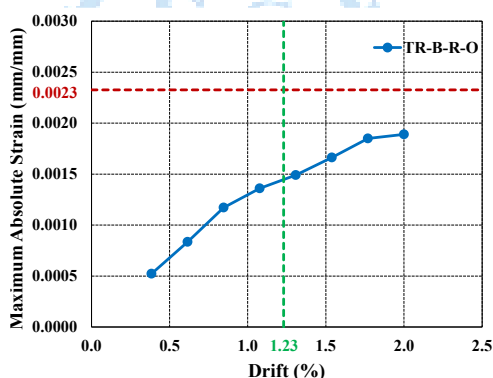
TR-B-L-I (۱)



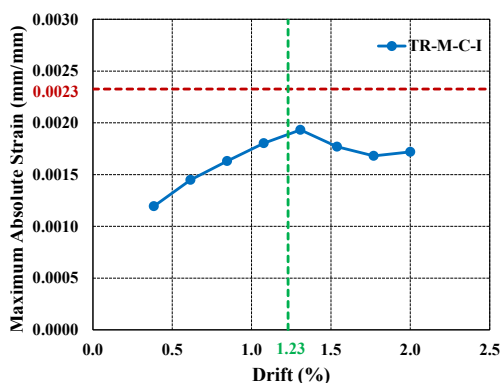
TR-B-L-O (۴)



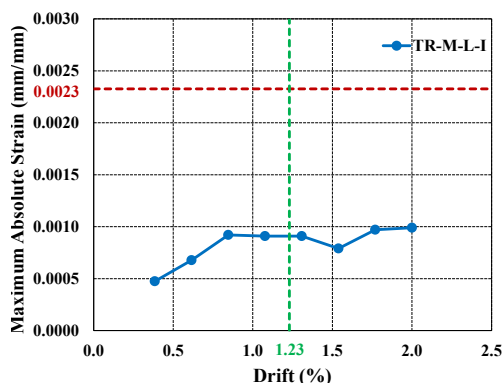
TR-B-R-I (۳)



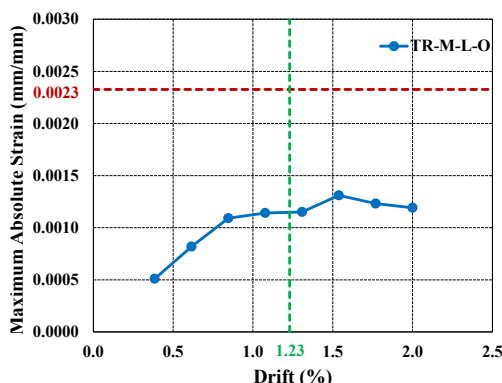
TR-B-R-O (۵)



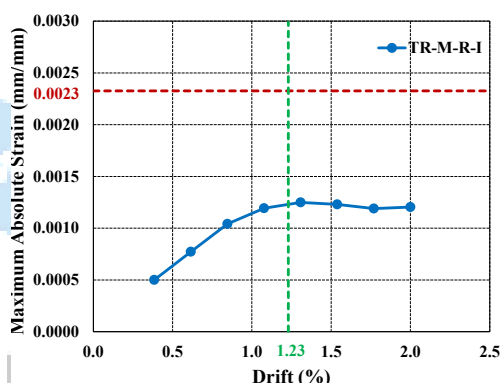
TR-M-C-I (۷)



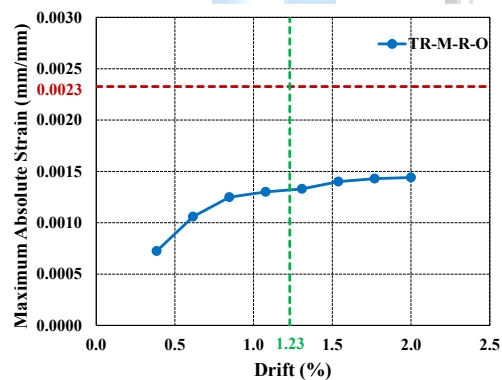
TR-M-L-I (۸)



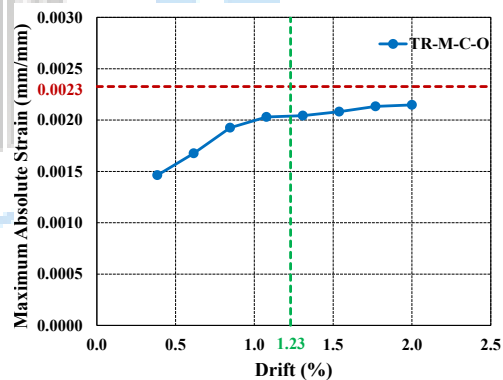
TR-M-L-O (۹)



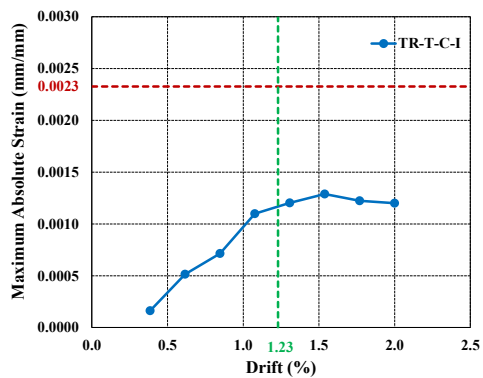
TR-M-R-I (۱۰)



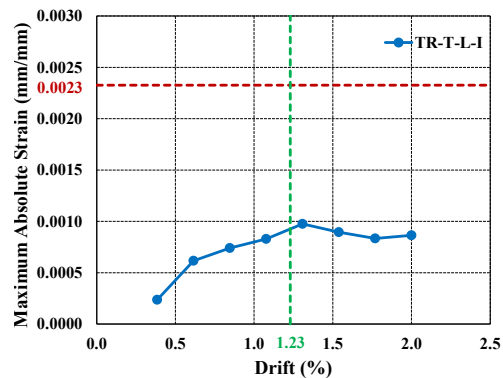
TR-M-R-O (۱۱)



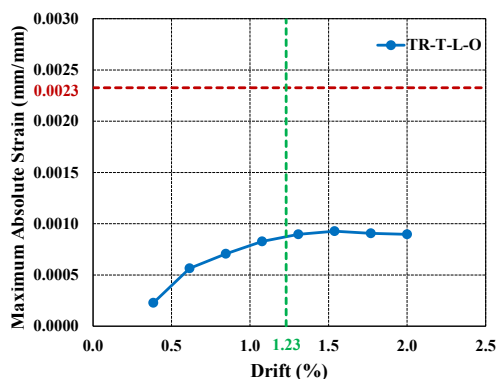
TR-M-C-O (۱۲)



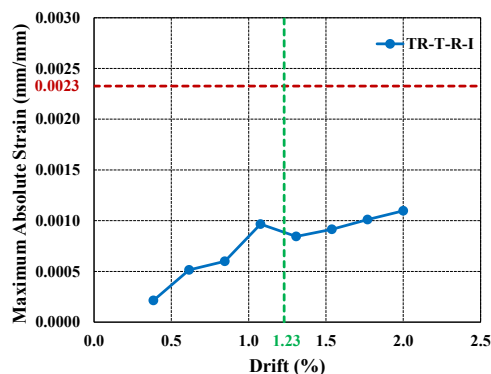
TR-T-C-I (۱۳)



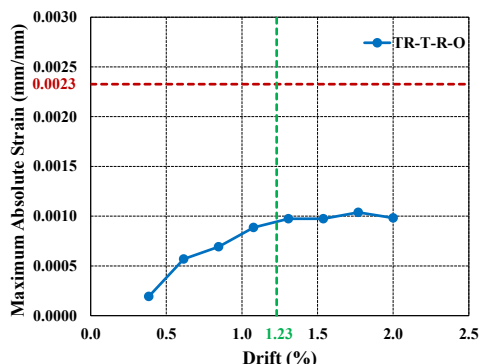
TR-T-L-I (۱۴)



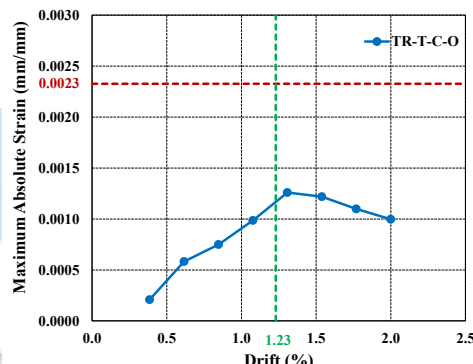
TR-T-L-O (۱۵)



TR-T-R-I (۱۴)



TR-T-R-O (۱۷)



TR-T-C-O (۱۶)

شکل ۵: نتایج حاصل از کرنش سنج‌های نصب‌شده بر روی آرماتورهای عرضی به ازای تغییرات جابه‌جایی جانبی نسبی.

۵- تحلیل و تفسیر نتایج آزمایشگاهی

۵-۱- مشارکت آرماتورهای طولی

آرماتورهای طولی در تراز پایه دیوار به تسلیم رسیدند که عمدتاً پس از وقوع لغزش در فصل مشترک دیوار و پی می‌باشد. اولین نشانه تسلیم‌شدگی آرماتورهای طولی در جابه‌جایی جانبی نسبی ۰/۵۴ درصد و در ظرفیت باربری حدود ۹۱ کیلونیوتن مشاهده شد. بیشترین مشارکت آرماتورهای طولی مقطع را آرماتورهای تعبیه شده در دورترین تارهای کششی/فشاری مقطع، در راستاهای L1 و L15، تجربه کردند. شدت نیروهای وارده به آنها به گونه‌ای بود که کرنش‌سنج‌های نصب‌شده در تراز پایه دیوار در راستای L1 و L15 به ترتیب در جابه‌جایی جانبی نسبی ۱/۰۷ و ۱/۷۷ درصد از سطح میلگردها جدا شده و فرایند ثبت داده متوقف شده که متأثر از پوسته‌شدن پوشش بتن و خردشدگی بتن در نواحی ابتدایی و انتهایی پایه دیوار است.

همچنین، بر اساس نتایج حاصل، کرنش آرماتورهای طولی در تراز میانی دیوار عمدتاً در محدوده کرنش تسلیم بوده که مقابله ترک‌های افقی در نواحی مرزی دیوار و نیز مجاورت مرکز برخورد ترک‌های قطری در وجوه داخلی و خارجی دیوار در تسلیم شدن آرماتورها مؤثر بودند [۷]. همچنین، میانگین تنش آرماتورهای طولی در راستاهای L7، L8، و L15 که در نیمه میانی مقطع دیوار قرار دارند، حدود ۹۸ درصد تنش تسلیم می‌باشد.

هیچ‌یک از آرماتورهای طولی در تراز فوقانی دیوار تسلیم نشدند و کرنش ایجادشده در آرماتورهای طولی تراز فوقانی در نواحی ابتدایی و انتهایی دیوار نسبت به آرماتورهای طولی در بخش میانی مقطع بیشتر بوده که متأثر از تغییر طول محوری ناشی از لنگر خمشی و نیز تغییر شکل‌های محوری مازاد ناشی از وقوع اعوجاج پیچشی در مقطع بوده که به دلیل خروج از مرکزیت نیروی جانبی وارده به سازه از

مرکز برش آن ایجاد شده و شدت آن در لبه‌های ابتدایی و انتهای دیوار بیشتر از بخش‌های میانی مقطع می‌باشد [۶]. همچنین، میانگین تنش آرماتورهای طولی در تراز فوقانی راستاهای L7، L8، و L15، حدود ۴۱ درصد تنش تسلیم بوده و برای راستاهای L1 و L15 که نزدیک به نواحی مرزی دیوار هستند، درصد تنش تسلیم می‌باشد.

۵-۲- مشارکت آرماتورهای عرضی

بیشترین کرنش در بین آرماتورهای عرضی دیوار را آرماتورهای در تراز پایه دیوار تجربه کرده‌اند. کرنش سنج‌های نصب‌شده در نواحی ابتدایی و انتهای دیوار مقادیر تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند و کرنش سنج‌های میانی با توجه به قرارگیری در محل برش ماکزیمم مقطع متقارن دیوار برشی خمیده، مقادیر بیشتری را ثبت کرده‌اند که نشانگر وجود ترک‌های قطری ضربه‌ری شکل بوده که در سطح پانل دیوار نمایان شده و این مشاهده برای سایر آرماتورهای عرضی در یک تراز ارتفاعی یکسان نیز رؤیت شده است.

در تراز ارتفاعی میانه دیوار، خاموت‌های تعبیه‌شده در وسط دیوار در قیاس با نواحی ابتدایی و انتهای آن کرنش‌های به نسبت بیشتری را تجربه کردند که متأثر از عبور اصلی‌ترین ترک قطری دیوار بوده که به تبع آن، خردشدگی موضعی بتن را در محل برخورد ترک-های قطری به همراه دارد. همچنین، ترک‌های قطری به دلیل عمق بیشتری که نسبت به ترک‌های ناشی از خمش و اعوجاج پیچشی دارند، می‌توانند اثرگذاری بیشتری در مقادیر کرنش ایجادشده داشته باشند. با افزایش تراز ارتفاعی محل نصب کرنش سنج روی آرماتورهای عرضی، یک روند کاهش در مقادیر کرنش و تنش برای هر دو خاموت داخلی و خارجی مشاهده می‌شود.

در تراز ارتفاعی یکسان در بخش فوقانی دیوار، روند مشابهی برای تغییرات کرنش آرماتورهای عرضی داخلی و خارجی قابل مشاهده است. پیش از جابه‌جایی جانبی نسبی ۰/۸۵ درصد این مقادیر قابل ملاحظه نبوده، اما پس از آن مقادیر کرنش تا بیش از ۴۰ درصد نسبت به کرنش‌های نواحی ابتدایی و انتهای افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تراز ارتفاعی کرنش سنج‌ها، حداکثر تنش ایجاد شده در آرماتورهای عرضی در تراز پایه، میانی، و فوقانی دیوار به ترتیب ۸۵، ۶۶، و ۴۸ درصد تنش تسلیم می‌باشد.

از میان آرماتورهای عرضی مستقر در تراز تحتانی دیوار، کرنش سنج نصب‌شده بر روی نیمه میانی آرماتور عرضی داخلی در آخرین مرحله بارگذاری در جابه‌جایی جانبی نسبی ۲ درصد تسلیم شده که تمرکز چند ترک عرضی در این ناحیه و خردشدگی بتن در مجاورت آن منجر به افزایش شدت کرنش‌ها شده است [۷]. سایر آرماتورها در این تراز به صورت میانگین ۲۰ درصد کرنش کمتری نسبت به مقدار کرنش تسلیم‌شدگی دارند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، میزان مشارکت آرماتورهای طولی و عرضی در یک دیوار برشی بتنی مسلح خمیده با مقیاس ۰/۳۳ که مقطع آن بصورت قطاعی از یک دایره و با ضخامت ثابت بوده، تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای و در غیاب بار محوری ارزیابی شده است. در ابتدا، ۳۴ کرنش سنج شامل ۱۴ کرنش سنج برای آرماتورهای طولی و ۱۸ کرنش سنج برای آرماتورهای عرضی در ترازهای ارتفاعی و راستاهای طولی مختلف تعبیه شد. با توجه به اعمال هشت مرحله‌ای بارگذاری جانبی به سازه، بیشینه مقادیر کرنش در هر گام تعیین و سپس روند تغییرات آن بر حسب درصد جابه‌جایی جانبی نسبی برای آرماتورهای طولی و عرضی دیوار خمیده ترسیم شد. بخشی از مهم‌ترین نتایج و دستاوردهای حاصل از این پژوهش در قالب موارد زیر خلاصه می‌شود:

(۱) بطور کلی، با افزایش تراز ارتفاعی موقعیت قرارگیری کرنش سنج‌های نصب‌شده بر روی آرماتورهای طولی و عرضی یک روند کاهشی در مقادیر قرائت‌شده قابل مشاهده است.

(۲) اولین نشانه تسلیم‌شدگی آرماتورها، مربوط به آرماتورهای طولی مستقر در دورترین تارهای مقطع و در نواحی مرزی پایه دیوار بوده که در جابه‌جایی جانبی نسبی ۰/۵۴ درصد و در ظرفیت باربری حدود ۹۱ کیلونیوتن مشاهده گردید.

(۳) وقوع لغزش در فصل مشترک دیوار و پی در تسلیم‌شدگی آرماتورهای طولی در تراز پایه دیوار اثر بسزایی داشته است.

- (۴) عمده آرماتورهای طولی تسلیم‌شدگی را تجربه کرده‌اند که با توجه نسبت ابعادی ۱/۳ دیوار برشی خمیده و کوتاه بودن آن، مشارکت آرماتورهای طولی در عملکرد مقطع قابل توجه بوده و این موضوع با نتایج مطالعات آزمایشگاهی پیرامون اثرگذاری آرماتورهای طولی در عملکرد دیوارهای برشی مستطیلی و نیز غیرمستطیلی کوتاه مطابقت دارد.
- (۵) آرماتورهای طولی در دورترین تارهای کششی و فشاری مقطع به دلیل وجود لنگر خمشی و نیز پدیده اعوجاج پیچشی در معرض تغییرشکل و تنش‌های محوری قابل‌ملاحظه‌ای قرار داشتند که به تبع آن، تسلیم‌شدگی را در تراز پایه دیوار تجربه کردند.
- (۶) در دیوار برش خمیده کوتاه آزمایش‌شده، شرایط تسلیم‌شدگی برای آرماتورهای عرضی فراهم نشد و همانند سایر دیوارهای برشی مستطیلی و غیرمستطیلی با نسبت ابعادی کوتاه، میزان مشارکت آرماتورهای عرضی کمتر از آرماتورهای طولی می‌باشد.
- (۷) مقادیر تنش ایجاد شده در آرماتورهای عرضی در یک تراز ارتفاعی ثابت، تقریباً یکسان بوده و روند تغییرات مشابهی میان تنش آرماتورهای عرضی داخلی و خارجی مشاهده می‌شود. همچنین، حداکثر تنش آرماتورهای عرضی در تراز پایه، میانی، و فوقانی دیوار به ترتیب ۸۵، ۶۶، و ۴۸ درصد تنش تسلیم می‌باشد.
- (۸) با توجه به مطالعات محدودی که پیرامون تعیین عملکرد دیوارهای برشی خمیده وجود دارد، مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی برای صحت‌سنجی مطالعات تحلیلی و عددی مد نظر قرار گیرد.

۷- تشکر و قدردانی

مطالعه آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه دینامیک سازه کف قوی دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است و نگارندگان مقاله از مدیریت آزمایشگاه و نیز کارشناسان مسئول آن کمال تشکر و قدردانی دارند.

مراجع

- [1] Khaloo, A. R., & Kafimosavi, M. (2007). Enhancement of flexural design of horizontally curved prestressed bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 12(5), 585–590. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2007\)12:5\(585\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2007)12:5(585))
- [2] Abdoos, H., Khaloo, A. R., & Foyouzat, M. A. (2020). On the out-of-plane dynamic response of horizontally curved beams resting on elastic foundation traversed by a moving mass. *Journal of Sound and Vibration*, 115397.
- [3] Foyouzat, M. A., Abdoos, H., Khaloo, A. R., & Mofid, M. (2022). In-plane vibration analysis of horizontally curved beams resting on visco-elastic foundation subjected to a moving mass. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 172, 109013.
- [4] Khaloo, A. R., Foyouzat, M. A., Abdoos, H., & Mofid, M. (2023). Axial force contribution to the out-of-plane response of horizontally curved beams under a moving mass excitation. *Applied Mathematical Modelling*, 115, 148–172. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.10.047>
- [5] Abdoos, Hatef, Foyouzat, M. A., & Khaloo, A. R. (2023). Parametric study on the dynamics of horizontally curved beams due to a moving inertial load considering the induced torsional moment. *Journal of Structural and Construction Engineering*. <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.368612.2964>
- [6] Abdoos, Hatef, Khaloo, A., & Tabiee, M. (2024). An analytical investigation into the lateral load response of curved RC shear walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. <https://doi.org/10.1002/TAL.2097>
- [7] Abdoos, H., & Khaloo, A. R. (2024). Failure mechanism of a curved RC shear wall subjected to cyclic loading: Experimental findings. *Engineering Structures*, 304(February), 117703. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117703>
- [8] Shi, Q., & Wang, B. (2016). Simplified calculation of effective flange width for shear walls with flange. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(12), 558–577.
- [9] Ni, X., & Cao, S. (2018). Shear lag analysis of I-shaped structural members. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(10), e1471.

- [10] Lu, N., & Li, W. (2020). Analytical Study on the Effective Flange Width for T-shaped Shear Walls. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(1), 253–264.
- [11] Tabiee, M., Abdoos, H., Khaloo, A., & Kavei, S. (2023). Effective width estimation of flanged reinforced concrete shear walls. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. <https://doi.org/10.1002/TAL.2057>
- [12] Khaloo, A., Abdoos, H., & Tabiee, M. (2021). A Novel Approach to the Parametric Study on the Effective Flange Width of Non-Rectangular Reinforced Concrete Shear Walls. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(1), 138–161.
- [13] Zhang, Z. W., & Li, B. (2014). Evaluation of seismic performance of slender L-shaped and T-shaped RC structural walls. *Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Paper*, 213.
- [14] Brueggen, B. L., French, C. E., & Sritharan, S. (2017). T-shaped RC structural walls subjected to multidirectional loading: test results and design recommendations. *Journal of Structural Engineering*, 143(7), 4017040.
- [15] Ma, J., & Li, B. (2018). Experimental and Analytical Studies on H-Shaped Reinforced Concrete Squat Walls. *ACI Structural Journal*, 115(2).
- [16] Hoult, R., & Beyer, K. (2021). RC U-shaped walls subjected to in-plane, diagonal, and torsional loading: New experimental findings. *Engineering Structures*, 233, 111873.
- [17] Tabiee, M., Abdoos, H., & Khaloo, A. (2023). Concurrent effects of the shear-lag and warping torsion on the performance of non-rectangular RC shear walls. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(2), 138.
- [18] Hoult, R. D. (2019). Shear lag effects in reinforced concrete C-shaped walls. *Journal of Structural Engineering*, 145(3), 4018270.
- [19] Hoult, R. (2021). Torsional capacity of reinforced concrete U-shaped walls. *Structures*, 31, 190–204.
- [20] Palermo, D., Abdulridha, A., & Charette, M. (2007). *FLANGE PARTICIPATION FOR SEISMIC DESIGN OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS*.
- [21] Khaloo, A., Tabiee, M., & Abdoos, H. (2022). A Numerical Laboratory for Simulation of Flanged Reinforced Concrete Shear Walls. *Journal of Numerical Methods in Civil Engineering*, 6(3), 92–102.
- [22] Abdoos, Hatef, Khaloo, A., & Tabiee, M. (2023). Effective width estimation of L-shaped RC shear walls using EPR algorithm. *Sharif Journal of Civil Engineering*.
- [23] Khaloo, A R, Tabiee, M., & Abdoos, H. (2021a). Analytical study of distribution of shear lag-induced stress in non-rectangular reinforced concrete shear walls. *12th International Congress on Civil Engineering, Mashhad, Iran*, 8.
- [24] Khaloo, A R, Tabiee, M., & Abdoos, H. (2021b). Shear lag effect on non-rectangular RC shear walls: a review of the literature. *7th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran, Iran*, 11.
- [25] Goodsir, W. J. (1985). *The design of coupled frame-wall structures for seismic actions*.
- [26] Thomsen, J. H., & Wallace, J. W. (1995). *Displacement-based design of RC structural walls: an experimental investigation of walls with rectangular and T-shaped cross-sections*. Clarkson University, Department of Civil Engineering.
- [27] Choi, C.-S., Ha, S.-S., Lee, L.-H., Oh, Y.-H., & Yun, H.-D. (2004). Evaluation of deformation capacity for RC T-shaped cantilever walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(03), 397–414.
- [28] Brueggen, B. L., French, C. E., & Sritharan, S. (2017). T-shaped RC structural walls subjected to multidirectional loading: test results and design recommendations. *Journal of Structural Engineering*, 143(7), 4017040.
- [29] Lan, W., Zhang, Z., & Li, B. (2017). Seismic performance of T-shaped steel-concrete composite structural walls subjected to loadings from different directions. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, 7–18.
- [30] Almeida, J., Prodan, O., Rosso, A., & Beyer, K. (2017). Tests on thin reinforced concrete walls subjected to in-plane and out-of-plane cyclic loading. *Earthquake Spectra*, 33(1), 323–345.
- [31] Sittipunt, C., & Wood, S. L. (1993). Finite element analysis of reinforced concrete shear walls. *Civil Engineering Studies SRS-584*.
- [32] Ile, N., & Reynouard, J. M. (2005). Behaviour of U-shaped walls subjected to uniaxial and biaxial cyclic lateral loading. *Journal of Earthquake Engineering*, 9(1), 67–94.
- [33] Beyer, K., Dazio, A., & Priestley, M. J. N. (2008). Quasi-static cyclic tests of two U-shaped reinforced concrete walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(7), 1023–1053.
- [34] Constantin, R., & Beyer, K. (2016). Behaviour of U-shaped RC walls under quasi-static cyclic diagonal loading. *Engineering Structures*, 106, 36–52.
- [35] Nakachi, T., Toda, T., & Tabata, K. (1996). Experimental study on deformation capacity of reinforced concrete core

- walls after flexural yielding. *Young*, 52, 71–79.
- [36] Hosaka, G., Funaki, H., Hosoya, H., & Imai, H. (2008). Experimental study on structural performance of RC shear wall with L shaped section. *Proceedings, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*.
- [37] Inada, K., Chosa, K., Sato, H., Kono, S., & Watanabe, F. (2008). Seismic performance of RC L-shaped core structural walls. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [38] Li, W., & Li, Q. (2012). Seismic performance of l-shaped rc shear wall subjected to cyclic loading. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(12), 855–866.
- [39] Kono, S., Sakamoto, K., & Sakashita, M. (2011). Simulation of seismic load resistance of core-walls for tall buildings. *Applied Mechanics and Materials*, 82, 386–391.
- [40] Hasnalbant, M., & Eyyubov, C. (2016). The Effects of Cross Sectional Dimensions on the Behavior of L-Shaped RC Structural Members. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 10, 1355–1363.
- [41] Ma, J., & Li, B. (2017). Seismic behavior of L-shaped RC squat walls under various lateral loading directions. *Journal of Earthquake Engineering*, 23(3), 422–443.
- [42] Han, X., Chen, B., Ji, J., Xie, S., & Lu, H. (2019). Deformation limits of L-shaped reinforced concrete shear walls: Experiment and evaluation. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(13), e1627.
- [43] Kitada, Y., Akino, K., Terada, K., Aoyama, H., & Miller, A. (1997). *Report on seismic shear wall international standard problem organized by OECD/NEA/CSNI*.
- [44] Maruta, M., Suzuki, N., Miyashita, T., & Nishioka, T. (2000). Structural capacities of H-shaped RC core wall subjected to lateral load and torsion. *Proceedings of the 12th WCEE. New Zealand: The New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 1028.
- [45] Krpan, P., & Collins, M. P. (1981). Predicting torsional response of thin-walled open RC members. *Journal of the Structural Division*, 107(6), 1107–1127.
- [46] Palermo, Daniel, Vecchio, F. J., & Solanki, H. (2002). Behavior of three-dimensional reinforced concrete shear walls. *ACI Structural Journal*, 99(1), 81–89.
- [47] Hosseini, S. A., Kheyroddin, A., & Mastali, M. (2019). An experimental investigation into the impacts of eccentric openings on the in-plane behavior of squat RC shear walls. *Engineering Structures*, 197, 109410.
- [48] Noor, F. A., & Boswell, L. F. (1992). *Small scale modelling of concrete structures*. CRC Press.
- [49] ASTM Standard A370-20. *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. (2020).
- [50] Li, X., Zhang, J., Cao, W. (2020). Hysteretic behavior of high-strength concrete shear walls with high-strength steel bars: Experimental study and modelling. *Engineering Structures*. 214, 110600.
- [51] Ma, S. Y. M., Bertero, V. V., & Popov, E. P. (1976). Experimental and analytical studies on the hysteretic behavior of reinforced concrete rectangular and T-beams. *Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California*.
- [52] Hube, M. A., María, H. S., Arroyo, O., Vargas, A., Almeida, J., & López, M. (2020). Seismic performance of squat thin reinforced concrete walls for low-rise constructions. *Earthquake Spectra*, 36(3), 1074-1095.