

Investigation of the shear-lag effects on the response of L-shaped RC shear walls

M. Tabiee¹, H. Abdoos², A. R. Khaloo^{3*}

1- PhD. student, Department of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- PhD. student, Department of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

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

ABSTRACT

In this study, the shear-lag effects are evaluated on the performance of L-shaped reinforced concrete (RC) shear walls. At first, 42 L-shaped RC shear walls are simulated employing the FlashLab program, and then, the numerical analyses are performed due to the cyclic loading applied within the framework of ABAQUS software. Based on the results of the numerical studies and taking into account the shear-lag effects, axial strain as well as axial deformation distribution are obtained for L-shaped RC shear walls. Thereafter, on the strength of the evolutionary polynomial regression (EPR) and genetic algorithm, new expressions have been developed and introduced for L-shaped sections which allow quick estimation of the axial strain and deformation distributions. The reliability of the proposed expressions has then been examined based on the coefficient of determination, of which the average values for the axial strain and deformation are 80 and 72 percent, respectively. Also, the results of the proposed expression are compared with those of the previous studies for non-rectangular RC shear walls. Finally, on account of the Mean Absolute Relative Error (MARE) index attained for the proposed expressions to that of the previous studies available in the literature, the uniform distribution exhibits the best performance in the response prediction of L-shaped RC walls. Furthermore, calculation of the MARE values indicates that the established formulations can respectively predict the axial strain and deformation of L-shaped RC shear walls with average error of 65 and 54 percent of the MARE values of the available expressions addressed in the literature.

ARTICLE INFO

Receive Date: 04 May 2022

Revise Date: 30 July 2022

Accept Date: 03 August 2022

Keywords:

L-shaped RC shear wall
Shear-Lag
Cyclic loading
Axial strain & deformation
EPR Method
Genetic Algorithm

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.340500.2804>

*Corresponding author: Alireza Khaloo.

Email address: khaloo@sharif.edu

بررسی رفتار دیوارهای برشی بتنی L-شکل با در نظر گرفتن اثرات تأخیر برشی

محمد طبیعی^۱، هاتف عبدوس^۲، علیرضا خالو^{۳*}

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

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

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

چکیده

در این مطالعه، اثرات ناشی از پدیده تأخیر برشی در عملکرد دیوارهای برشی بتنی L-شکل تحت بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی می‌شود. ابتدا با استفاده از برنامه FlashLab، ۴۲ دیوار برشی با مقطع کوتاه، متوسط و لاغر با مقطع L-شکل و با بال‌های نابرابر ساخته شد و سپس تحلیل عددی آن در چارچوب نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس صورت گرفت. بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی و با در نظر گرفتن اثرات ناشی از تأخیر برشی، توزیع کرنش و تغییرشکل محوری، به عنوان پارامترهای رفتاری دیوارهای برشی بتنی با مقطع L-شکل، ترسیم شدند و سپس با اتکا به روش‌های رگرسیون تکاملی (EPR) و الگوریتم ژنتیک، روابط کاربردی جهت تخمین کرنش و تغییرشکل محوری این دیوارها ارائه شد. سنجش دقت روابط پیشنهادی بر اساس ضریب تعیین مشخص و به‌طور میانگین برای کرنش و تغییرشکل محوری به ترتیب مقادیر ۸۰ و ۷۲ درصد حاصل شد که نشانگر عملکرد مطلوب روابط ارائه شده در تخمین پارامترهای پاسخ است. همچنین، مقادیر حاصل از روابط پیشنهادی با روابط مطرح شده در مطالعات پیشین برای دیوارهای غیرمستطیلی مقایسه و سپس توصیه‌هایی جهت برآورد توزیع کرنش و تغییرشکل محوری در دیوارهای برشی بتنی L-شکل ارائه شده است. همچنین، به منظور ارزیابی دقت روابط پیشنهادی، از شاخص میانگین خطای نسبی (MARE) استفاده شده است. به این ترتیب، با محاسبه نسبت MARE روابط پیشنهاد شده در این مطالعه به MARE توزیع‌های کرنش و تغییرشکل مطالعات پیشین، مشاهده شد که در ارزیابی مقدار کرنش محوری، توزیع یکنواخت به همراه توزیع ارائه شده در این مطالعه بهترین دقت را داشته و به‌طور میانگین خطای آن‌ها از ۶۵ درصد خطای سایر روابط کمتر است. همچنین، در پیش‌بینی مقدار تغییرشکل محوری ملاحظه شد که توزیع پیشنهادی این پژوهش به‌طور میانگین با خطایی کمتر از ۵۴ درصد سایر روابط، بهترین دقت و عملکرد را در محاسبه این پارامتر پاسخ از دیوارهای بتنی با مقطع L-شکل دارد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی بتنی L-شکل، تأخیر برشی، بارگذاری چرخه‌ای، کرنش و تغییرشکل محوری، روش EPR، الگوریتم ژنتیک.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.340500.2804	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.340500.2804	۱۴۰۲/۰۳/۳۱	۱۴۰۱/۰۵/۱۲	۱۴۰۱/۰۵/۱۲	۱۴۰۱/۰۵/۰۸	۱۴۰۱/۰۲/۱۴
			علیرضا خالو		*نویسنده مسئول:	
			khaloo@sharif.edu		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

امروزه در صنعت ساخت سازه‌ها، از دیوارهای برشی بتن آرمه با مقطع مستطیلی به‌وفور استفاده می‌شود و در قالب مطالعات گسترده آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی به چگونگی عملکرد این المان‌های سازه‌ای تحت بارگذاری‌های مختلف اشاره شده است. این در حالی است که در برخی موارد، به دلیل محدودیت‌های سازه‌ای و معماری و نیز در راستای تأمین شکل‌پذیری و سختی موردنیاز، خصوصاً در سازه‌های بلندمرتبه، استفاده از دیوارهای برشی با مقاطع غیرمستطیلی موضوعیت خواهد داشت. از بین دیوارهای برشی بتنی غیرمستطیلی متداول می‌توان به دیوارهای با مقطع $-I$ ، $-T$ ، $-L$ ، $-Z$ و $-U$ شکل اشاره نمود که از اتصال دو یا چند مقطع مستطیلی حاصل می‌شوند. در حالت کلی، ویژگی‌های هندسی متفاوت دیوارهای با مقطع غیرمستطیلی در مقایسه با دیوارهای مستطیلی می‌تواند این المان‌های سازه‌ای را در معرض بارگذاری‌های خمشی و پیچشی قرار دهد که متأثر از موقعیت مرکز سطح و مرکز برش این مقاطع است. لذا، انتظار می‌رود که عملکرد دیوارهای غیرمستطیلی متمایز با دیوارهای برشی مستطیلی باشد و لزوم مطالعات بیشتر بر روی این مقاطع جهت بررسی دقیق‌تر عملکرد آنها ضروری به نظر می‌رسد.

در دیوارهای غیرمستطیلی به دلیل اعمال نیروهای جانبی، فرض اویلر-برنولی^۱ جهت تعیین توزیع تنش و کرنش محوری در این مقاطع موضوعیت ندارد، چرا که به دلیل وجود تغییرشکل‌های اعوجاجی در محدوده اتصال بال به جان، تنش و کرنش محوری در این ناحیه بیشتر از سایر نقاط مقطع بوده که از آن به عنوان تأخیر برشی^۲ یاد می‌شود. این پدیده منجر به کاهش سختی مؤثر، بار ترک‌خوردگی و نیز ظرفیت خمشی مقطع خواهد شد.

عمده مطالعات موجود در ادبیات فنی پیرامون پدیده تأخیر برشی بر روی مقاطع توخالی و جدارنازک انجام گرفته است [۱-۵] و پژوهش‌های نسبتاً محدودی بر روی پدیده تأخیر برشی و تأثیر آن در دیوارهای برشی بتنی با مقطع غیرمستطیلی انجام شده است. طی یک مطالعه مروری جامع، خالو و همکاران [۶] پدیده تأخیر برشی و چگونگی اثرگذاری آن را بر عملکرد مقاطع غیرمستطیلی گردآوری نمودند. در ادامه، به برخی از مهمترین مراجع و دستاوردهای آنها با محوریت تأثیر پدیده تأخیر برشی در مقاطع غیرمستطیلی اشاره خواهد شد.

از اولین مطالعات انجام گرفته پیرامون پدیده تأخیر برشی می‌توان به مطالعات تحلیلی ریزنر^۳ [۷] در سال ۱۹۴۶ اشاره نمود که در آن، برای تیرهای با مقطع توخالی از یک توزیع درجه دوم جهت اعمال تغییرشکل محوری ناشی از تأخیر برشی استفاده شد. سونگ^۴ و اسکوردلیس^۵ [۸] با استفاده از سری فوریه، اثرات ناشی از تأخیر برشی را به‌صورت تحلیلی و برای تیرهای بتنی با مقطع توخالی، $-I$ و $-T$ شکل بررسی نمودند که صرفاً در ناحیه الاستیک معتبر بودند. حاجی کاظمی و کمپانی [۹] با اعمال تغییرات لازم در توابع تنش ابری و با استفاده از سری‌های توانی توانستند اثر پدیده تأخیر برشی را در یک سازه بلند قوطی شکل لحاظ کنند. مقایسه نتایج حاصل از روابط تحلیلی با مطالعه عددی سازه مورد بررسی نشانگر دقت بسیار بالای توابع تنش ابری توسعه یافته بود. پروکیک^۶ و همکاران [۱۰] با استفاده از روش اجزای محدود توانستند اثرات تأخیر برشی را در مقاطع جدار نازک و با سطح مقطع دلخواه لحاظ نمایند. روش عددی پیشنهادی آنها مبتنی بر تابع تغییرشکل اعوجاجی پیشنهادی پروکیک [۱۱] بوده که برای هر دو نوع از مقاطع جدار نازک باز و بسته برقرار است.

همچنین، اهمیت بررسی پدیده تأخیر برشی در مقاطع غیرمستطیلی از منظر مطالعات آزمایشگاهی موجود نیز به اثبات رسیده است. به عنوان مثال، نتایج مطالعات آزمایشگاهی بروگن^۷ و همکاران [۱۲-۱۳] در مورد دیوارهای با مقطع $-T$ شکل نشان داد که اثر تأخیر برشی پیش از وقوع تسلیم‌شدگی آرماتورهای فولادی مقطع مشهودتر بوده و توزیع یکنواخت آرماتورهای طولی نسبت به حالتی که آرماتورها در المان‌های مرزی متمرکز باشند، منجر به کاهش تأثیر این پدیده می‌شود.

¹ Bernoulli-Euler assumption

² Shear-lag

³ Reissner

⁴ Song

⁵ Scordelis

⁶ Prokic

⁷ Brueggen

بیشتر مطالعات تحلیلی پیرامون وقوع تأخیر برشی در دیوارهای غیرمستطیلی در ناحیه الاستیک و بر مبنای اصل کمینه انرژی صورت گرفته است. ژنگ^۸ و لی^۹ [۱۴] بر مبنای روش خرابایی، پدیده تأخیر برشی را در دیوارهای برشی بالدار ترک‌خورده ارزیابی و در آن، به اثر فزاینده افزایش ضخامت بال مقطع و بار محوری وارده به سازه در شدت وقوع تأخیر برشی و نیز اثر کاهش جابه‌جایی تراز فوقانی و طول دیوار اشاره نمودند. همچنین، لیو^{۱۰} و همکاران [۱۵]، به اثرات قابل توجه تأخیر برشی در مقادیر مربوط به توزیع تغییرشکل و تنش محوری در دیوارهای برشی بتنی T-شکل اذعان کردند. نی^{۱۱} و کائو^{۱۲} [۱۶] اثر تأخیر برشی در تیرها و دیوارهای برشی بتنی با مقطع I-شکل و با دو بال نابرابر را به صورت تحلیلی بررسی نمودند و بر اساس تغییرشکل اعوجاجی حاصل از یک تابع درجه دوم، اثر تأخیر برشی را اعمال و رابطه‌ای جهت تخمین عرض مؤثر در این مقاطع ارائه کردند. در سال ۲۰۱۹ و در طی یک مطالعه آزمایشگاهی، توزیع تنش و کرنش محوری در دیوارهای با مقطع ناودانی شکل توسط حالت^{۱۳} [۱۷] ارزیابی گردید و بر مبنای نتایج حاصله، رابطه‌ای جهت تخمین عرض مؤثر در این دیوارها پیشنهاد شد.

خالو و همکاران [۱۸] با بررسی توابع چندجمله‌ای با درجات مختلف برای تغییرشکل اعوجاجی تأخیر برشی در یک مقطع I-شکل با بال‌های نامتقارن، چندجمله‌ای مرتبه دوم را به عنوان مناسب‌ترین توزیع برای تغییرشکل اعوجاجی متأثر از تأخیر برشی معرفی نمودند. بر اساس نتایج پژوهش دیگری از خالو و همکاران [۱۹]، اثر ضریب پواسون بتن، ضخامت بال و ارتفاع مقطع در محاسبات مربوط به عرض مؤثر در دیوارهای برشی بالدار ناچیز و تأثیر بار محوری و بارهای جانبی وارده به سازه قابل توجه می‌باشد. در سال‌های اخیر به منظور تسریع روند شبیه‌سازی دیوارهای برشی شیوه‌ها و برنامه‌های گوناگونی در ادبیات فنی ارائه شده است [۲۰-۲۱]، در همین راستا در سال ۲۰۲۲، خالو و همکاران [۲۲]، با توسعه برنامه FlashLab، مطالعات عددی گسترده‌ای با محوریت بررسی تأثیر پدیده تأخیر برشی در عملکرد دیوارهای برشی بتنی با مقطع بالدار ارائه نمودند. این برنامه از طریق کدنویسی به زبان برنامه‌نویسی پایتون و به کمک نرم‌افزار آباکوس قادر است تا نمونه‌های متعددی از دیوارهای برشی بتن آرمه با مقطع بالدار را با استفاده از المان‌های پوسته‌ای مدل‌سازی و در مدت زمان کوتاهی تحلیل نماید.

در سال ۲۰۲۱، ژنگ و همکاران [۲۳] اثرات غیرخطی توزیع کرنش نیز و تأخیر برشی را در بال فشاری دیوارهای برشی بتنی بالدار به صورت تحلیلی و عددی بررسی نمودند. همچنین، در این مطالعه، اثر تسلیم‌شدگی آرماتورهای کششی در پدیده تأخیر برشی بررسی شد و رابطه‌ای تجربی جهت ارزیابی تأثیر بارگذاری چرخه‌ای در غیرخطی شدن توزیع کرنش‌های فشاری بال دیوارهای برشی ارائه گردید.

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌های انجام شده در حوزه بررسی اثر تأخیر برشی در دیوارهای برشی غیرمستطیلی متمرکز به مقاطع I، T، U و قوطی شکل بوده و مطالعات نسبتاً محدودی بر روی عملکرد دیوارهای L-شکل انجام شده است. لذا، در این پژوهش مد نظر است تا رفتار دیوارهای برشی بتنی L-شکل تحت بارگذاری چرخه‌ای و با در نظر گرفتن اثرات ناشی از پدیده تأخیر برشی ارزیابی شود. سپس با انجام مطالعات پارامتری بر روی مدل‌های عددی، روابطی کاربردی جهت تعیین توزیع کرنش و تغییرشکل محوری در این مقاطع ارائه می‌شود.

گفتنی است که از جمله شیوه‌های کارآمد در استخراج روابط مناسب از داده‌های حاصل از مطالعات پارامتری، استفاده از روش‌های مختلف رگرسیون‌گیری است [۲۴]، از همین رو در این مطالعه به کمک روش رگرسیون تکاملی چندجمله‌ای^{۱۴} (EPR)، روابطی جهت پیش‌بینی کرنش و تغییرشکل محوری دیوارهای برشی بتنی با مقطع L-شکل توصیه شده است. در پایان این بخش روندنمایی مدون و هدفمندی از مراحل و فرآیند انجام این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.

⁸ Zhang

⁹ Li

¹⁰ Liu

¹¹ Ni

¹² Cao

¹³ Hoult

¹⁴ Evolutionary Polynomial Regression



شکل ۱: روندنمای فرآیند مطالعه.

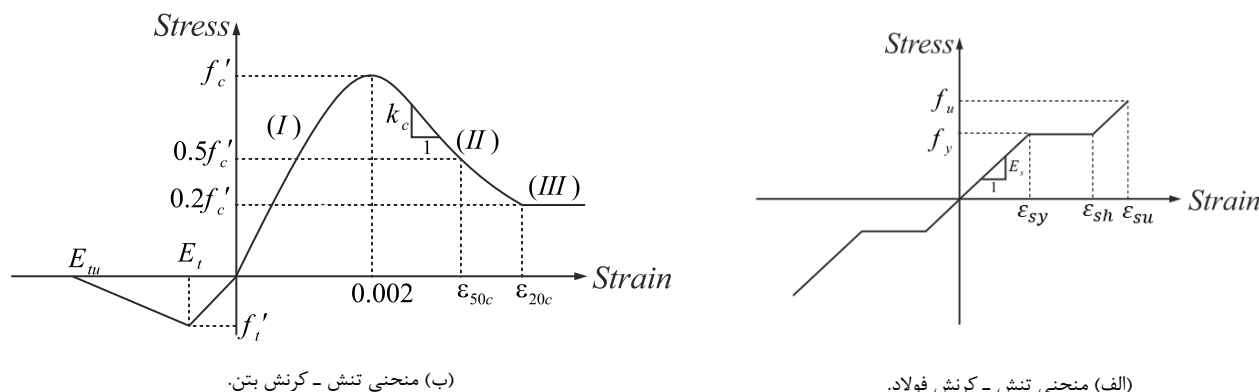
۲- مدل‌سازی دیوارهای L-شکل با استفاده از روش اجزای محدود

با توجه به کارایی مطلوب روش اجزای محدود در مدل‌سازی‌های عددی دیوارهای برشی بتنی با مقاطع غیرمستطیلی و بررسی پدیده تأخیر برشی [۲۷-۲۵]، در این مطالعه از برنامه FlashLab جهت ساخت مدل در مطالعات عددی استفاده شده که در ادامه جزئیات مربوط به مدل‌سازی و صحت‌سنجی مدل‌های عددی استفاده شده در این پژوهش بیان شده است.

۲-۱- مدل‌سازی مصالح

در این بخش، رفتار مصالح مصرفی فولاد و بتن در کشش و فشار تعیین و نحوه خرابی آن‌ها مشخص می‌شود. همچنین، ضخامت المان‌های پوسته‌ای و آرایش آرماتورهای به‌کار رفته در هر یک از آن‌ها نیز تعیین می‌شود. جهت مدل‌سازی رفتار غیرخطی آرماتورها، از مدل سه‌خطی منحنی تنش-کرنش فولاد با رفتار یکسان در کشش و فشار استفاده می‌شود (شکل ۲-الف) [۲۸]. برای شبیه‌سازی رفتار بتن از

دو منحنی متفاوت در ناحیه فشاری و کششی نمودار تنش- کرنش استفاده شده است. از همین رو، جهت شبیه‌سازی رفتار بتن در فشار از منحنی پیشنهادی کنت و پارک [۲۸-۲۹] برای المان‌های بتنی محصور شده با تنگ‌های مستطیلی استفاده می‌شود. برای رفتار بتن در کشش، مطابق شکل ۱- (ب)، از مدل دو خطی استفاده می‌گردد [۳۰].



(ب) منحنی تنش - کرنش بتن.

(الف) منحنی تنش - کرنش فولاد.

شکل ۲: منحنی تنش-کرنش: (الف) مصالح فولادی، (ب) مصالح بتنی در شبیه‌سازی عددی.

معادلات مربوط به بخش‌های (I)، (II) و (III) شکل ۱- (ب) از منحنی تنش-کرنش بتن از رابطه (۱) تبعیت می‌کنند [۲۸-۲۹]:

$$\sigma_c = \begin{cases} \left[\frac{2\varepsilon_c}{0.002} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0.002} \right)^2 \right] f'_c & 0 \leq \varepsilon_c < 0.002 \\ \left[1 - \frac{k_c}{f'_c} (\varepsilon_c - 0.002) \right] f'_c & 0.002 \leq \varepsilon_c < \varepsilon_{s,c} \\ 0.7 f'_c & \varepsilon_c \geq \varepsilon_{s,c} \end{cases} \quad (1)$$

که در آن:

$$k_c = \frac{0.5 f'_c}{\varepsilon_{s,c} - 0.002} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{s,c} = \frac{20670 + 0.002 f'_c}{f'_c - 6890000} + \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s_h}} \quad (3)$$

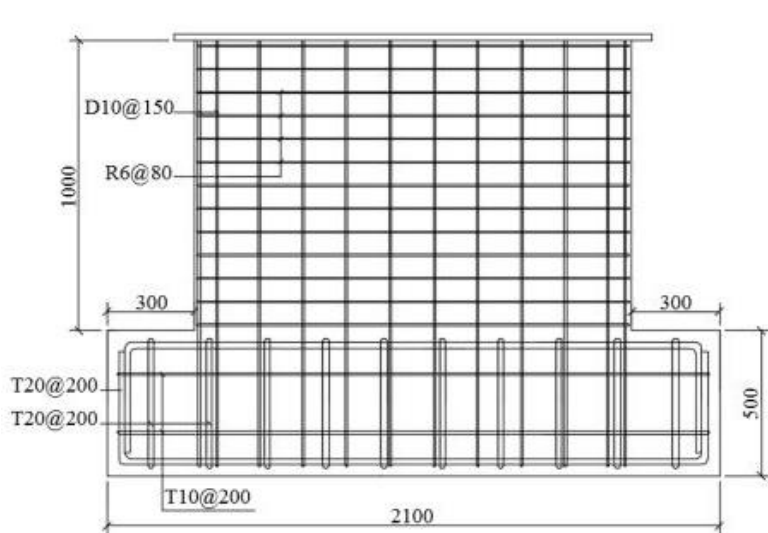
در رابطه (۳)، f'_c مقاومت مشخصه بتن بر حسب پاسکال، ρ_s نسبت حجم آرماتورهای عرضی به حجم بتن محصور در ناحیه مرکزی واقع در حد فاصل لبه خارجی خاموت‌ها، b'' عرض ناحیه مرکزی محصور مابین لبه خارجی خاموت‌ها بر حسب متر و s_h نیز فاصله آرماتورهای عرضی بر حسب متر است. فرض اساسی در مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده خمیری بر این مبناست که ترک‌های کششی در خردشدگی‌های فشاری دو جنبه اصلی مکانیزم گسیختگی بتن بوده و از این رو جهت شبیه‌سازی شکست مصالح بتنی تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای که تحت کشش و فشار متناوب قرار می‌گیرند، عمدتاً از این مدل رفتاری استفاده می‌شود [۳۱]. به همین دلیل، در برنامه FlashLab به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی المان‌های بتنی و نحوه آسیب‌دیدگی آن‌ها، از مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده خمیری استفاده

می‌گردد. پارامترهای مربوط به مدل رفتاری بتن آسیب‌دیده خمیری، مقادیر زاویه اتساع^{۱۵} (ψ)، خروج از مرکزیت سطح پتانسیل پلاستیک^{۱۶} (m)، پارامتر f پارامتر تنظیم‌کننده ویسکوپلاستیک^{۱۷} (η) مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

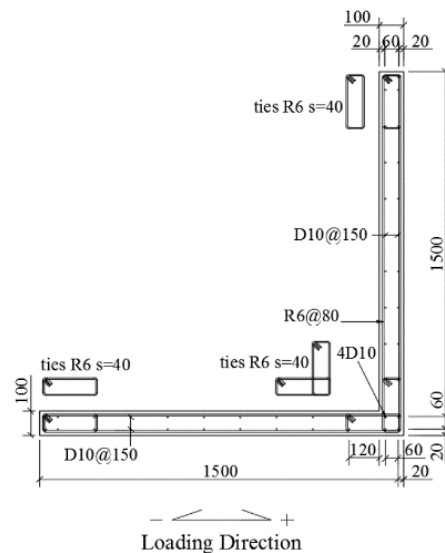
جدول ۱: مشخصات محدوده پلاستیک مصالح بتنی				
ψ	m	f	k	η
30.5°	۰.۱	۱.۱۶	۰.۶۶۷	۰.۱۰۱

۲-۲- صحت‌سنجی در برنامه FlashLab

به منظور صحت‌سنجی عملکرد مدل عددی از برنامه FlashLab استفاده شده و در آن نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی یک دیوار L- شکل با داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمایش جیاکسینگ^{۱۸} [۳۲] مقایسه خواهد شد. در شکل ۳ به ترتیب هندسه نمونه‌ها و آرایش میلگردها، به همراه تاریخچه بارگذاری وارده بر آن‌ها نمایش داده شده است. همچنین، بار محوری وارده به دیوار $f'_c A_g \times 10^{-3} \times 7.2$ می‌باشد.



(ب) مشخصات و جزئیات آرماتورگذاری پی دیوار L- شکل.



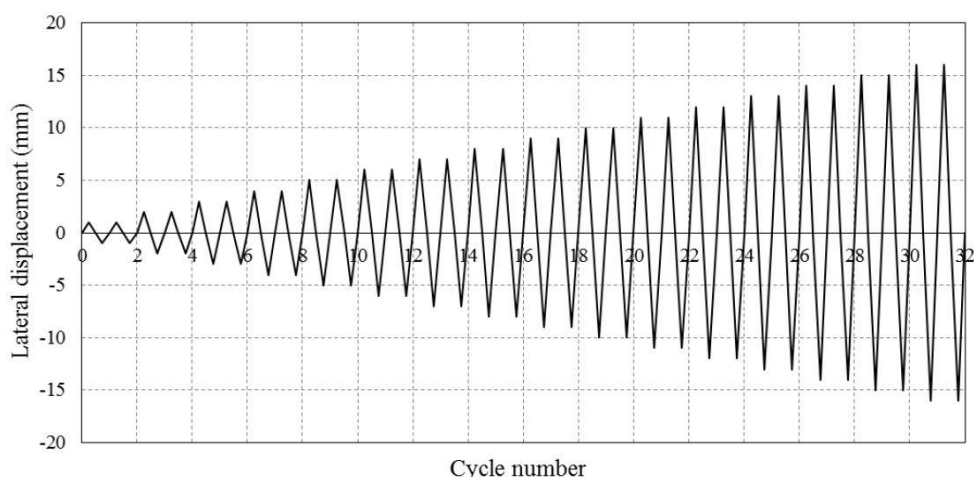
(الف) مشخصات و جزئیات آرماتورگذاری مقطع دیوار L- شکل.

¹⁵ Dilation angle

¹⁶ Eccentricity

¹⁷ Viscosity parameter

¹⁸ Jixing



ج) تاریخچه بارگذاری وارده به دیوار L- شکل.

شکل ۳: مشخصات و جزئیات آرماتورگذاری و بارگذاری دیوار L- شکل پژوهش جیاکسینگ [۳۲].

در جداول ۲ و ۳ به ترتیب مشخصات مکانیکی مربوط به آرماتورهای فولادی و مصالح بتنی نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات آرماتورهای فولادی.

f_y (MPa)	E_s (GPa)	f_u (MPa)	قطر اسمی (mm)	نوع میلگرد
۳۳۵	۲۲۰	۵۰۷	۶	R6
۵۵۴	۲۲۰	۶۴۲	۱۰	D10

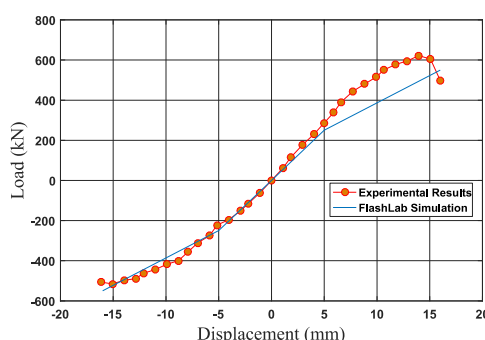
جدول ۳: مشخصات مصالح بتنی.

f'_c (MPa)	f'_t (MPa)	E_c (GPa)
۳۵٫۰	۳٫۷۰	۲۸٫۳

پس از اتمام شبیه‌سازی با ویژگی‌های مزبور، فرآیند تحلیل آغاز شده و به‌عنوان خروجی برنامه، منحنی پسماند^{۱۹} هریک از نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای وارده، حاصل می‌شود. به کمک منحنی پسماند، برای هریک از نمونه‌های مدل‌سازی شده، منحنی پشتواره^{۲۰} نیز ترسیم شده و سپس به صورت دوطرفه ساده‌سازی می‌شود. منحنی پشتواره بدست آمده از شبیه‌سازی عددی به کمک برنامه FlashLab با منحنی‌های پشتواره حاصل از داده‌های آزمایشگاهی، برای دیوار L- شکل مقایسه شده است. بررسی شکل ۴ نشانگر این است که شبیه‌سازی عملکرد نمونه‌ها در ناحیه الاستیک با دقت بسیار بالا انجام شده و میزان اختلاف در این محدوده کمتر از ۵ درصد است. با این حال، خطا در ناحیه غیرالاستیک به مراتب بیشتر از این مقدار بوده و به طور میانگین کمتر از ۱۰ درصد است.

¹⁹ Hysteresis Curve

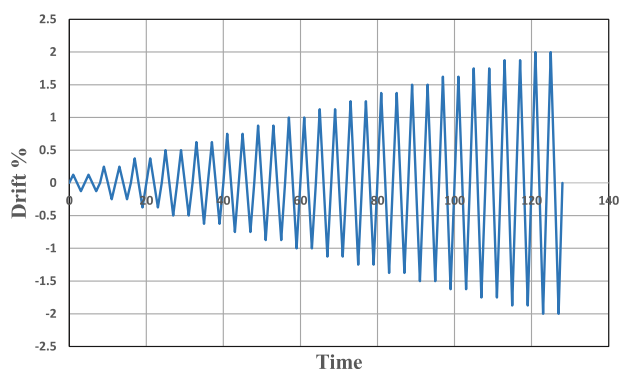
²⁰ Backbone Curve



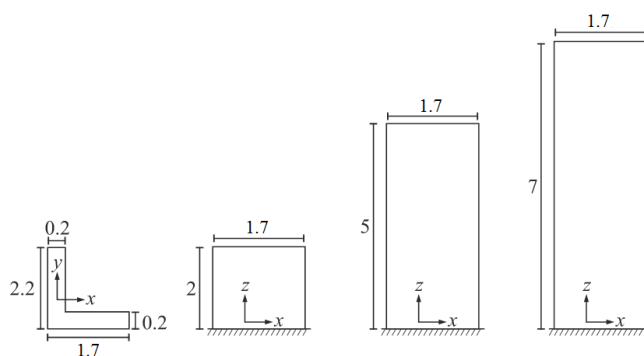
شکل ۴: صحت‌سنجی دیوار L- شکل با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود.

۳-۲- شبیه‌سازی عددی دیوارهای L-شکل

جهت انجام مطالعات پارامتری با استفاده از شبیه‌سازی عددی دیوارهای L- شکل، ابتدا لازم است نمونه‌های از این مقطع در نظر گرفته شود. در شکل ۵-الف) هندسه هر یک از دیوارها نمایش داده شده است. ارتفاع‌های ۲، ۵ و ۷ متری به ترتیب نماینده دیوار کوتاه ($H/B < 2$)، دیوار با رفتار ترکیبی ($2 < H/B < 3$) و دیوار لاغر ($H/B > 3$) برای هر یک از نمونه‌های این مطالعه است. تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای مطابق شکل ۵-ب) به صورت کرنش کنترل به سازه اعمال می‌گردد. لازم به ذکر است که این بارگذاری هم در راستای x و هم در راستای y به نمونه‌ها وارد می‌شود. بار محوری وارد بر نمونه‌ها پنج مقدار صفر، $0.05f'_cA_g$ ، $0.1f'_cA_g$ ، $0.15f'_cA_g$ و $0.2f'_cA_g$ می‌باشد. همچنین، در این مطالعه افزایش طول بال مقطع در بازه ± 1 متری نیز بررسی شده و نتایج به دست آمده اعم از کرنش و تغییرشکل محوری در هر شبیه‌سازی به ازای جابه‌جایی‌های جانبی نسبتی 0.125 ، 0.25 ، ...، 1.875 و 2.0 درصدی قرائت می‌شود.



ب) بارگذاری چرخه‌ای وارد به دیوارها



الف) هندسه دیوارهای L- شکل شبیه‌سازی شده (ابعاد بر حسب متر)

شکل ۵: هندسه دیوار L- شکل شبیه‌سازی شده (کلیه ابعاد بر حسب متر هستند).

به طور خلاصه نحوه آماتورگذاری، مشخصات مکانیکی آرماتورهای فولادی و مشخصات بتن استفاده شده در دیوارهای مفروض در جداول ۴، ۵ و ۶ آورده شده است. در این مطالعه، طول ناحیه محصورشده و ضخامت پوشش بتن به ترتیب برابر ۴۰ و ۴ سانتی‌متر می‌باشد.

جدول ۴: مشخصات آرایش آرماتورهای فولادی در دیوارهای L-شکل.

نوع آرماتورها	آرماتورهای عرضی ناحیه محصورشده	آرماتورهای طولی ناحیه محصورشده	آرماتورهای عرضی	آرماتورهای طولی
چیدمان میلگرد	$\phi 14 @ 10cm$	$\phi 20 @ 15cm$	$\phi 14 @ 30cm$	$\phi 20 @ 30cm$

جدول ۵: مشخصات مکانیکی آرماتورهای فولادی [۳۰].

نوع آرماتور	ν_s	ϵ_{su}	f_u (MPa)	ϵ_{sh}	E_s (GPa)	f_y (MPa)
$\phi 4$	۰٫۳	۰٫۲۰	۴۰۰	۰٫۰۲۰	۲۱۰	۳۰۰
$\phi ۲۰$	۰٫۳	۰٫۱۴	۶۰۰	۰٫۰۰۴	۲۱۰	۴۰۰

جدول ۶: مشخصات مکانیکی مصالح بتنی [۳۳].

نوع بتن	ν_s	ϵ_{ctu}	ϵ_{cu}	ϵ_{cy}	E_c (GPa)	f_t (MPa)	f'_c (MPa)
C30	۰٫۱۵	۰٫۰۰۰۸	۰٫۰۰۰۶	۰٫۰۰۰۱۱۵	۲۶	۳	۳۰

۲-۴- نتایج مدل سازی عددی

در این مطالعه، مجموعاً ۴۲ دیوار با مقطع L- شکل به کمک برنامه FlashLab مدل سازی و با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد. دیوارها دارای بال های نابرابر بوده و به منظور بررسی رفتار سازه در اثر بارگذاری جانبی، پاسخ سازه در ازای اعمال بار جانبی در راستاهای بال بزرگ و کوچک به طور مجزا تحلیل شده است. در بخش بعد به تشریح روش رگرسیون تکاملی (EPR) در تحلیل نتایج شبیه سازی اشاره می شود.

۳- روش رگرسیون تکاملی چندجمله ای (EPR)

به منظور انجام مطالعات پارامتری جهت ارائه روابط کاربردی در تخمین توزیع کرنش و جابه جایی محوری دیوارهای L- شکل، روش رگرسیون گیری بر مبنای چندجمله ای های تکاملی (EPR) [۳۴] استفاده شده است. در این روش، به کمک الگوریتم ژنتیک^{۲۱} [۳۵]، مناسب ترین توابع بر حسب چندجمله ای های گویا جهت برازش به نتایج عددی حاصل استخراج می شوند. در ابتدا یک فرمت کلی برای روابط ممکن میان کمیت وابسته با کمیت های مستقل در نظر گرفته می شود و سپس با جستجو به کمک الگوریتم ژنتیک در روابط ذیل این فرمت کلی، مناسب ترین تابع از بین آنها برای برازش به داده های ارائه شده، حاصل می شود. در پایه ای ترین حالت روش EPR، از توابع چندجمله ای با توان های گویا برای رگرسیون گیری استفاده می شود. هر چند در صورت های اصلاح شده از این روش، امکان افزودن دیگر توابع نیز وجود دارد. در روند اجرای روش EPR، ابتدا فرض می شود که کمیت وابسته Z تابعی از کمیت های مستقل $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ است (رابطه (۴)):

$$Z = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (4)$$

در این راستا، ابتدا m آزمایش انجام شده و مقدار کمیت وابسته بر اساس مقادیر مختلف از کمیت های مستقل تعیین می شود. رابطه (۵) بیانگر نتایج این آزمایش ها در قالب بردار Z و ماتریس X است:

²¹ Genetic Algorithm

$$Z_{m \times n} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_m \end{bmatrix} \quad X_{m \times n} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots & X_{2n} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & \dots & X_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & X_{m3} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

سپس $k+1$ عبارت که متشکل از توابع گویا است، جهت برازش به کمیت وابسته و داده‌های حاصل از آزمایش استفاده می‌گردد. بنابراین خواهیم داشت:

$$Z = c_0 + c_1 Y_1 + c_2 Y_2 + c_3 Y_3 + \dots + c_k Y_k \quad (6)$$

که در آن، c_i ها ضرایب ثابت و Y_i ها عبارتند از:

$$Y_i = X_1^{ES_1} \cdot X_2^{ES_2} \cdot X_3^{ES_3} \cdot \dots \cdot X_n^{ES_n} \quad (7)$$

در رابطه (7)، ES ها ماتریس‌هایی هستند که دربرگیرنده توان‌های مربوط به هر یک از پارامترهای مستقل مطرح شده در رابطه (4) هستند. در صورت معلوم بودن ماتریس ES ، ضرایب c_i ها به عنوان مجهول مطرح بوده و مسئله در قالب رگرسیون‌گیری چند متغیره²² موضوعیت دارد و این ضرایب را می‌توان بر اساس فرض کمترین مجموع مربعات خطاها²³ [36] محاسبه نمود. پس از محاسبه ضرایب c_i ها، کیفیت برازش انجام شده با اتکا به شاخص مجموع مجذور خطاها²⁴ (SSE) قابل ارزیابی است. همچنین، میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی²⁵ (MARE) مشخصه دیگری است که جهت ارزیابی کیفیت یک برازش پیشنهاد می‌شود.

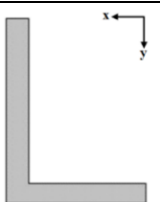
در ادامه بناست تا به کمک برنامه FlashLab و با انجام شبیه‌سازی و مطالعه پارامتری با استفاده از روش EPR و الگوریتم ژنتیک، روابطی به منظور تخمین توزیع کرنش و تغییرشکل محوری دیوارهای برشی بتن آرمه با مقطع L- شکل ارائه شود. روابط پیشنهادی بی‌بعد به صورت $U_z / U_{z(\max)}$ و $\varepsilon_z / \varepsilon_{z(\max)}$ تعریف شده که پس از تعیین توزیع این پارامترها، با استفاده از روابط تعادل و سازگاری در مقطع، هر یک از مقادیر $U_{z(\max)}$ ، $\varepsilon_{z(\max)}$ در هر نقطه از مقطع دیوار نیز قابل محاسبه هستند. توجه شود که در اغلب پژوهش‌های عددی، محققان پس از دستیابی به داده‌ها، مبتنی بر شهود و قضاوت خود از نتایج حاصله و همچنین پارامترهای مؤثر بر آن‌ها و با تکیه بر اصول رگرسیون‌گیری، روابطی را جهت برآورد کمیت موردنظر استخراج می‌کنند. بر اساس مطالعات خالو و همکاران [19]، پارامترهای اساسی در میزان اثرگذاری تأخیر برشی در رفتار دیوارهای برشی بالدار، مقدار بار محوری وارده به همراه میزان جابه‌جایی جانبی سازه معرفی شدند. از همین رو، پارامترهای مؤثر در این مطالعه نیز متشکل از سه کمیت بی‌بعد است که هر یک عبارتند از: $\pi_1 = ALR = N / (f_c' A_g)$ ، $\pi_2 = Drift = U_L / H$ و π_3 که مورد آخر بیانگر محل موردنظر در سطح مقطع بوده و از جدول 7 حاصل می‌شود.

²² Multivariate regression

²³ Least squares method

²⁴ Sum of squared Errors (SSE)

²⁵ Mean Absolute Relative Error (MARE)

جدول ۷. معرفی کمیت بی بعد سوم.		
دستگاه مختصات	جهت بارگذاری	تعریف کمیت بی بعد π_3
	در جهت y	$\pi_3 = \frac{x}{\text{طول بال کوچک}}$
	در جهت x	$\pi_3 = \frac{y}{\text{طول بال بزرگ}}$

لازم به ذکر است که در راستای هموار نمودن نتایج به دست آمده، پیش از ارائه آن‌ها به الگوریتم EPR، کلیه جهش‌ها و تغییرات ناگهانی در داده‌ها فیلتر می‌شوند. سپس داده‌ها مطابق روندنمای الگوریتم EPR [۳۴-۳۵] تحلیل شده و روابطی جهت تخمین نحوه توزیع کرنش محوری ($\epsilon / \epsilon_{\max}$) و جابه‌جایی محوری (U / U_{\max}) به صورت بی‌بعد حاصل می‌شود. به جهت ساده‌سازی روابط ارائه شده، نمای حداکثر برای کلیه عبارات، یک عدد حسابی کوچکتر از ۱۰ و همچنین تعداد جملات به عدد ۶ محدود شده است.

با توجه به ماهیت روش EPR، که بهترین چندجمله‌ای را در دامنه مشخص شده به داده‌ها برازش می‌کند، هدف از انجام این مطالعه پارامتری بیش از آن که متمرکز به حصول روابط مهندسی برای تخمین متغیرهای هدف باشد، در راستای تعیین دقت برآورد توزیع کرنش و تغییر شکل محوری با استفاده از چندجمله‌ای‌ها و نیز شناسایی روند کلی این توزیع‌ها و درجات به دست آمده برای پارامترهای بی-بعد بوده که در واقع مشخص‌کننده روند کلی تغییرات متناظر با این کمیت‌ها نیز می‌باشد. همچنین، جهت ارزیابی دقت روابط رگرسیونی از شاخص ضریب تعیین R^2 استفاده شده و در این راستا، چین^{۲۷} [۳۹] سه مقدار ۰/۱۹، ۰/۳۳ و ۰/۶۷ را به عنوان سه مقدار کلیدی جهت شناسایی برازش ضعیف، متوسط و قوی برای کمیت ارائه نموده است. در ادامه و به تفکیک، روابط به دست آمده برای تخمین توزیع کرنش و تغییر شکل محوری، برای هر مقطع و جهت وارد آمدن بار جانبی ارائه شده است.

۴- تجزیه و تحلیل یافته‌ها

در این بخش، بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و نیز اعمال روش رگرسیون‌گیری EPR، توزیع کرنش و جابه‌جایی محوری دیوارهای L-شکل ارزیابی خواهد شد.

۴-۱- توزیع کرنش محوری دیوارهای L-شکل

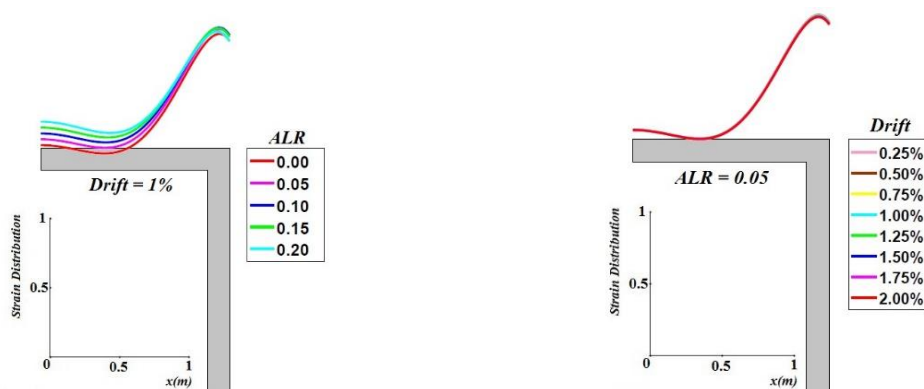
در ادامه، روابطی جهت برآورد توزیع کرنش محوری برای دیوارهای با مقطع L-شکل و برای سه نوع دیوار کوتاه، با رفتار ترکیبی و لاغر و در ازای بارگذاری در جهات x و y ارائه شده است. روابط پیشنهادی برای توزیع کرنش محوری به همراه شاخص ضریب تعیین در این دیوارها با بار اعمال شده در راستای y در جدول ۸ بیان شده است.

²⁶ Coefficient of determination

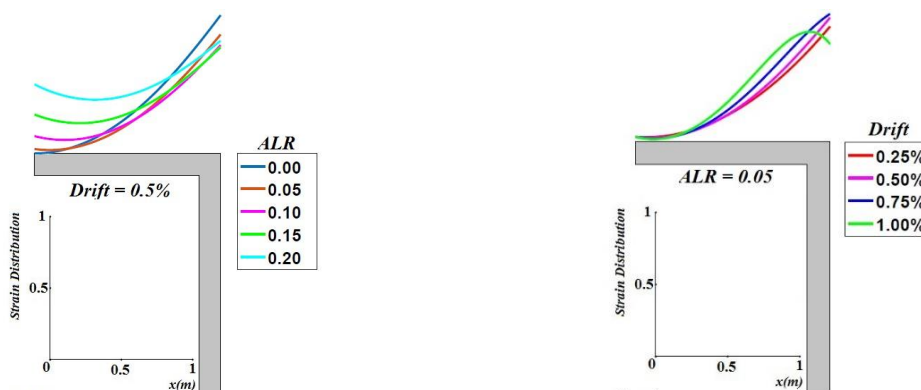
²⁷ Chin

جدول ۸. روابط پیشنهادی برای توزیع کرنش محوری دیوار L-شکل در راستای y.			
R^2	رابطه پیشنهادی کرنش محوری (بار اعمالی در راستای y)، $\varepsilon / \varepsilon_{max}$	شماره رابطه	نوع دیوار
۰.۸۸	$۰.۰۲۶۸۷ + ۱.۰۵۹۳\pi_1 - ۱.۳۶۹۸\pi_1^2 + ۶.۸۱۲۲\pi_1^3 - ۵۴۲.۹۵\pi_1^4\pi_2\pi_3 - ۴۵۰.۲۳\pi_1^5$	(۸)	کوتاه
۰.۷۷	$۰.۰۰۱۴۴۷۶ + ۱۵.۶۸۷\pi_1^2 + ۰.۹۹۲۶۹\pi_1^3 - ۸۵۹.۲۵\pi_1^4\pi_2\pi_3 + ۱۳۲۴\pi_1^5\pi_2^2 - ۱.۰۷۸۹ \times 10^6 \pi_1^6\pi_2^3$	(۹)	با رفتار ترکیبی
۰.۷۷	$۰.۱۰۰۴۱ + ۳۶.۴۶۲\pi_1^2 - ۳۶۲.۸۲\pi_1^3 + ۱.۱۵۱۲\pi_1^4 - ۴۶.۷۳۱\pi_1^5\pi_2 + ۴۶۷.۷۴\pi_1^6\pi_2^2$	(۱۰)	لاغر

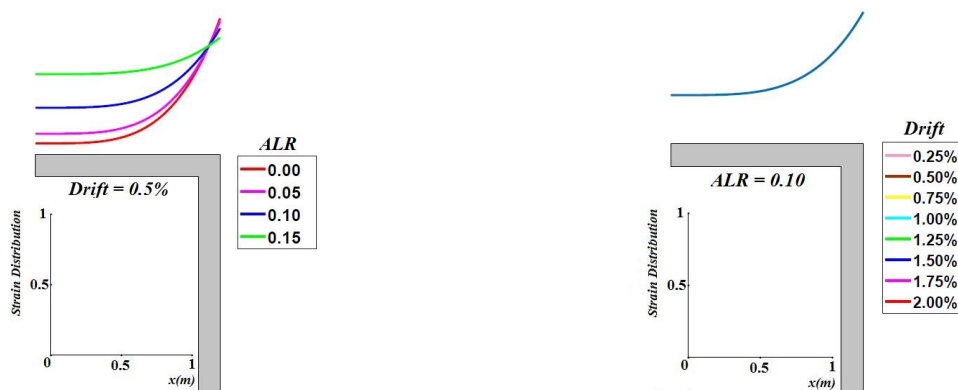
مشاهده می‌شود که روند توزیع کرنش محوری در داخل مقطع (توان پارامتر π_2) تحت اثر پدیده تأخیر برشی عمدتاً از مرتبه ۶ در حال تغییر است. این در حالی است که در مطالعات پیشین [۲۵]، توزیع کرنش محوری نهایتاً از مرتبه ۵ لحاظ شده است. با توجه به ماهیت روش EPR، چندجمله‌ای‌های برازش شده در دامنه مورد بررسی دقیق‌ترین بوده و با لحاظ نمودن مرتبه‌های کمتر، از دقت تخمین کاسته خواهد شد. نمودار تغییرات کرنش محوری با تغییرات درصد بار محوری و جابه‌جایی جانبی نسبی سازه در شکل ۶ آورده شده است.



الف) دیوار کوتاه



ب) دیوار با رفتار ترکیبی



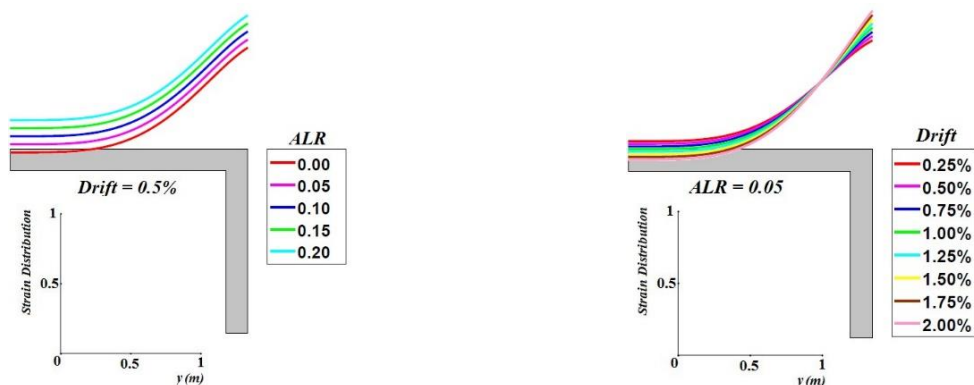
ج) دیوار لاغر

شکل ۶: توزیع کرنش محوری در بال کوچک مقاطع L-شکل.

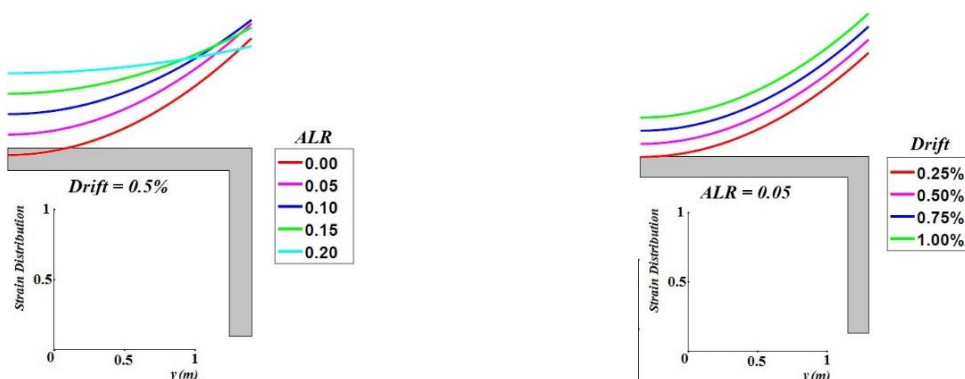
همچنین، مشاهده می‌شود که اگر چه تأثیر جابه‌جایی جانبی نسبی در اغلب نمودارهای توزیع کرنش محوری ناچیز است، اما در مواردی اثر آن قابل نظر کردن نبوده و این در حالی است که اثر این پارامتر در هیچ یک از تحقیقات پیشین بر روی پدیده تأخیر برشی بررسی نشده است. مقادیر جدول ۹ بیانگر تخمین توزیع کرنش محوری و دقت آن تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای در راستای x می‌باشد.

جدول ۹. روابط پیشنهادی برای توزیع کرنش محوری دیوار L-شکل در راستای x .			
R^2	رابطه پیشنهادی کرنش محوری (بار اعمالی در راستای x)، $\varepsilon / \varepsilon_{max}$	شماره رابطه	نوع دیوار
۰.۸۹	$-۰.۲۹۷۷۷ + ۲.۴۳۰۶\pi_1 - ۱۸۷.۴۴\pi_1\pi_2 + ۲.۱۰۳۳\pi_1^2 + ۲۴.۶۴۳\pi_1\pi_2^2 - ۱.۲۵۷۴۱\pi_1^3$	(۱۱)	کوتاه
۰.۷۴	$-۰.۴۹۵۱۲ + ۷.۳۰۷۹\pi_1 + ۸۶.۷۴۹\pi_2 - ۷۲۳.۸۸\pi_1\pi_2 + ۱.۰۵۳۹\pi_1^2 - ۲۰.۲۵۴\pi_1^3\pi_2^2$	(۱۲)	با رفتار ترکیبی
۰.۷۷	$-۰.۲۰۸۵۸ + ۴.۷۱۳۵\pi_1 + ۱.۵۶۱۶\pi_2 - ۶۲۷۳.۵\pi_1^2\pi_2\pi_3 - ۷.۵۴۹۷\pi_1\pi_2^2 + ۶۸۹۱.۸\pi_1^2\pi_2\pi_3^2$	(۱۳)	لاغر

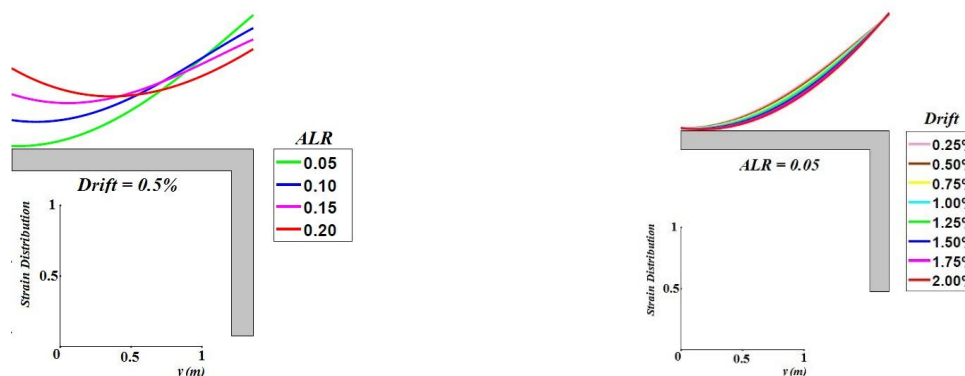
در شکل ۷ منحنی‌های توزیع کرنش محوری در دیوارهای L-شکل تحت اثر بارگذاری جانبی در راستای بال کوچک مقطع نمایش داده شده است.



الف) دیوار کوتاه



(ب) دیوار با رفتار ترکیبی



(ج) دیوار لاغر

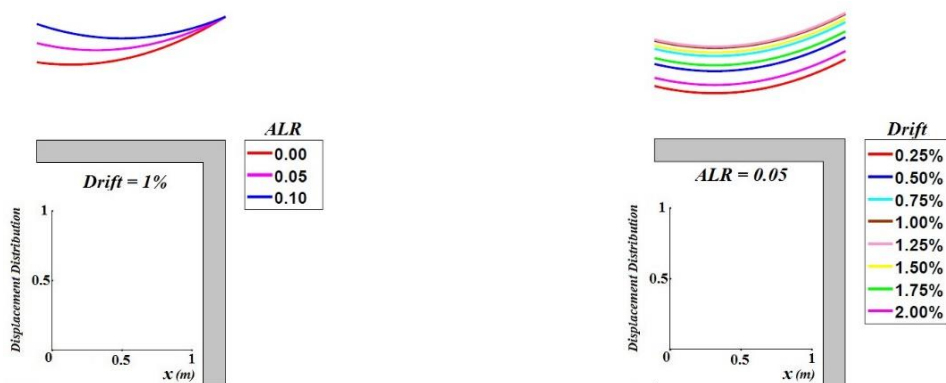
شکل ۷: توزیع کرنش محوری در بال بزرگ مقاطع I- شکل.

۲-۴- توزیع تغییر شکل محوری دیوارهای I- شکل

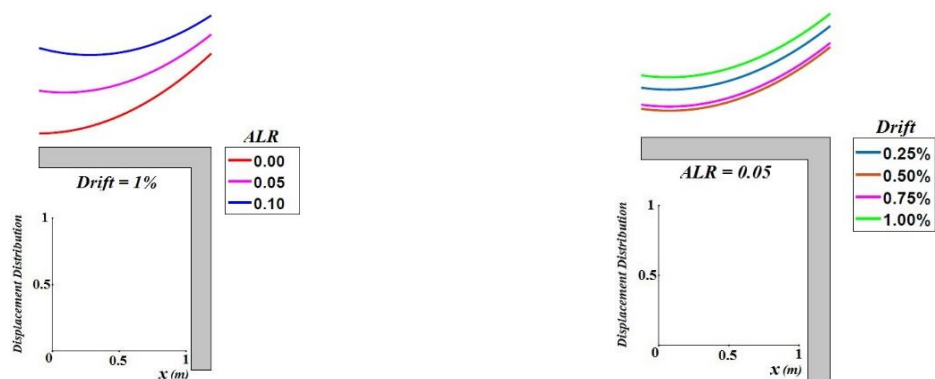
مشابه بخش قبل، روابطی جهت برآورد توزیع تغییر شکل محوری دیوارهای I- شکل و برای سه نوع دیوار کوتاه، با رفتار ترکیبی و لاغر و در ازای بارگذاری در جهات x و y به دست آمده که روابط و نمودارهای متناظر به ترتیب در جدول ۱۰ و شکل ۸ آورده شده است.

جدول ۱۰. روابط پیشنهادی برای توزیع تغییر شکل محوری دیوار I- شکل در راستای y .			
نوع دیوار	شماره رابطه	رابطه پیشنهادی کرنش محوری (بار اعمالی در راستای y)، U / U_{max}	R^2
کوتاه	(۱۴)	$0.45274 + 110.82\pi_1 - 10.537\pi_2 + 3.4582\pi_3\pi_4 - 4960.9\pi_5 + 0.6429\pi_6$	۰.۶۹
با رفتار ترکیبی	(۱۵)	$0.13888 + 14.529\pi_1 - 4233.7\pi_2 - 4.6716\pi_3\pi_4 + 0.78955\pi_5 + 3.6248 \times 10^6 \pi_6\pi_7$	۰.۶۷
لاغر	(۱۶)	$0.48242 - 51.287\pi_1 + 2855.8\pi_2 + 0.41583\pi_3 + 30.722\pi_4\pi_5 - 4.4482 \times 10^6 \pi_6\pi_7\pi_8$	۰.۶۶

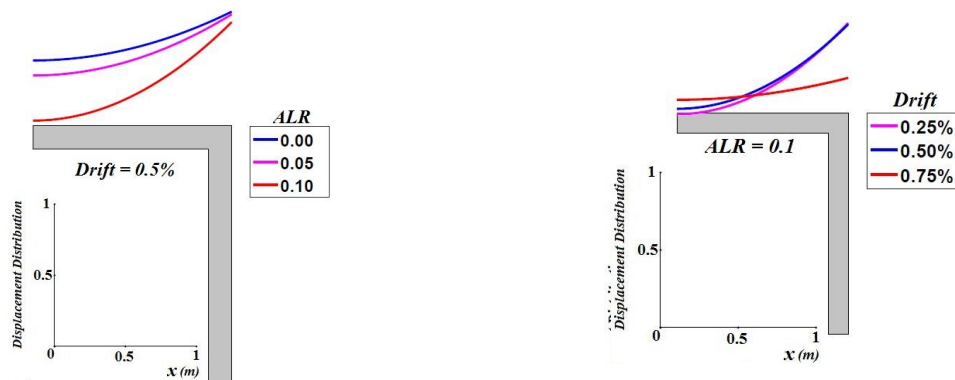
بر اساس نتایج حاصل از نمودارهای شکل ۸ می توان دریافت که دقت مدل سازی EPR در برآورد توزیع تغییر شکل محوری در قیاس با توزیع کرنش محوری مقطع کمتر است.



الف) دیوار کوتاه



ب) دیوار با رفتار ترکیبی



ج) دیوار لاغر

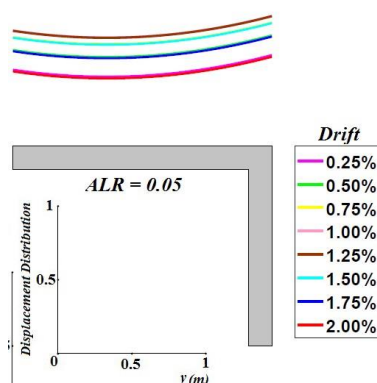
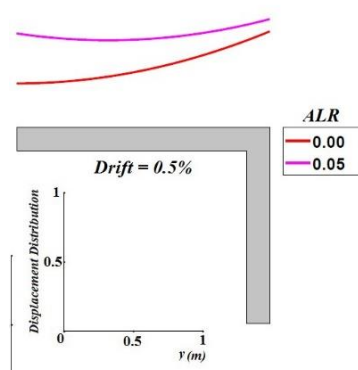
شکل ۸: توزیع تغییرشکل محوری در بال کوچک مقاطع L- شکل.

روابط پیشنهادی توزیع تغییرشکل محوری دیوار L- شکل و در راستای x در جدول ۱۱ آورده شده و نمودارهای شکل ۹ مربوط به این روابط هستند.

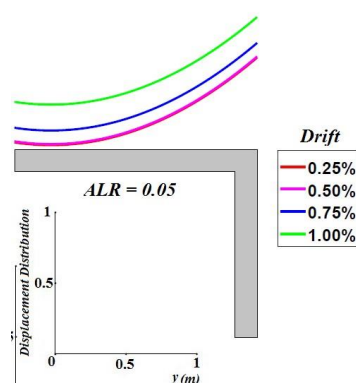
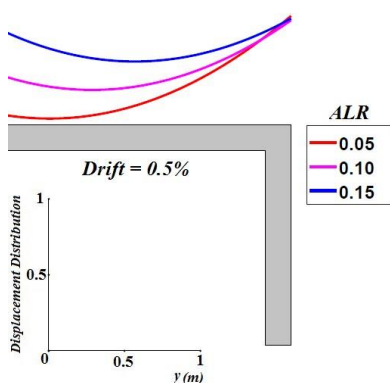
جدول ۱۱. روابط پیشنهادی برای توزیع تغییرشکل محوری دیوار L-شکل در راستای x.

R^2	رابطه پیشنهادی کرنش محوری (بار اعمالی در راستای x)، U / U_{max}	شماره رابطه	نوع دیوار
۰٫۷۴	$-۰٫۰۰۷۷۷۴۱ + ۸٫۶۹۳۸\pi_1 + ۱۰۰٫۹۲\pi_2 - ۴۵۲۰٫۶\pi_3 + ۰٫۴۵۲۵۶\pi_4 - ۱۳۱٫۲۴\pi_5$	(۱۷)	کوتاه
۰٫۷۶	$-۰٫۱۷۵۲ + ۱۳۵٫۶۴\pi_1 - ۶٫۵۸۵۶\pi_2 + ۱٫۰۹۶۸\pi_3 - ۲۵۲۲۳\pi_4 + ۱٫۷۹۱۴ \times ۱۰^۰ \pi_5$	(۱۸)	با رفتار ترکیبی
۰٫۸۱	$-۰٫۸۲۹۴۳ + ۱۹٫۶۷۸\pi_1 - ۳۵۸۲۱\pi_2 + ۳٫۰۶۶۲ \times ۱۰^۰ \pi_3 - ۲۱۹۲۴\pi_4 + ۲۷۰٫۰۹\pi_5$	(۱۹)	لاغر

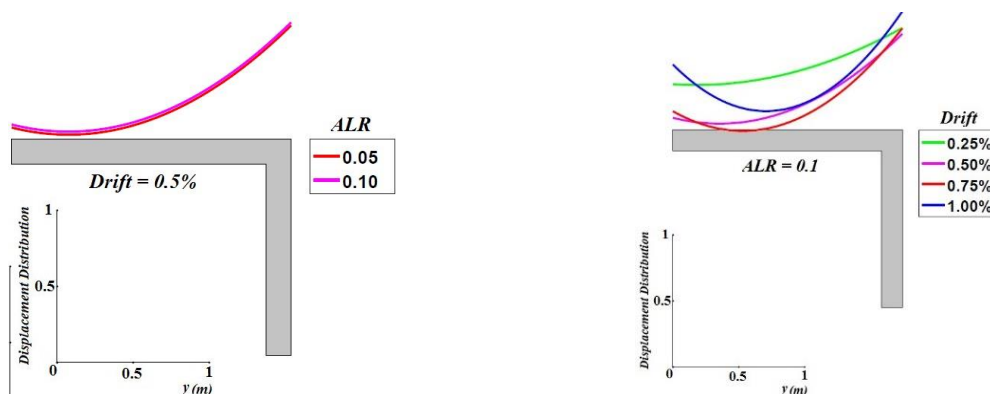
اگر چه مجموعاً روابط ارائه شده برای برآورد تغییرشکل محوری دقت چندانی مطلوبی ندارند و به طور میانگین ضریب تعیین آن‌ها در دیوارهای کوتاه، با رفتار ترکیبی و لاغر به ترتیب برابر ۰/۷۱، ۰/۶۹ و ۰/۷۰ حاصل شد، اما توجه به این نکته حائز اهمیت است که تغییرشکل محوری در قیاس با کرنش و تنش محوری پارامتر حیاتی محسوب نشده و از همین رو در اغلب تحقیقات انجام شده پیرامون پدیده تأخیر برشی به آن پرداخته نشده است.



الف) دیوار کوتاه



ب) دیوار با رفتار ترکیبی



ج) دیوار لاغر

شکل ۹: توزیع تغییرشکل محوری در بال بزرگ مقاطع L- شکل.

۳-۴- سنجش کارایی توزیع کرنش و تغییرشکل پیشنهادی

همان‌طور که اشاره شد، نتایج حاصل از روش EPR بر اساس کمینه‌سازی دو شاخصه MARE و SSE انجام گرفته است. لذا در ادامه، کارایی روابط پیشنهادی کرنش و تغییرشکل محوری دیوارهای L-شکل بر اساس روابط مطالعات موجود در ادبیات فنی [۱۶، ۲۵ و ۴۰] و نیز توزیع یکنواخت کرنل^{۲۸} برای دیوارهای غیرمستطیلی ارزیابی می‌شود. در جداول ۱۲ و ۱۳، به ترتیب نسبت مشخصه MARE روابط پیشنهاد شده در این مطالعه به MARE توزیع‌های پیشنهادی کرنش و تغییرشکل محوری نمایش داده شده است.

جدول ۱۲. محاسبه نسبت MARE* توزیع پیشنهادی بر MARE سایر توزیع‌های کرنش محوری.

توزیع کرنش محوری دیوارهای غیرمستطیلی					شماره رابطه
توزیع یکنواخت کرنل	نی و کائو (۲۰۱۸) [۱۶]	لیو و همکاران (۲۰۱۷) [۱۵]	شی و ونگ (۲۰۱۶) [۴۰]	کوان (۱۹۹۶) [۲۵]	
۱٫۹۳	۰٫۲۰	۰٫۲۵	۰٫۱۰	۱٫۰۰	(۸)
۰٫۸۲	۰٫۲۵	۰٫۳۰	۰٫۱۰	۱٫۰۰	(۹)
۱٫۰۰	۰٫۳۵	۰٫۸۴	۰٫۰۹	۱٫۲۰	(۱۰)
۱٫۳۴	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۷	(۱۱)
۰٫۸۱	۰٫۳۶	۰٫۳۹	۰٫۲۲	۰٫۴۰	(۱۲)
۰٫۱۷	۰٫۲۶	۰٫۲۰	۰٫۶۳	۰٫۲۰	(۱۳)
۱٫۰۱	۰٫۲۵	۰٫۳۴	۰٫۲۰	۰٫۶۵	میانگین

$$* \text{MARE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{\bar{Z}_i - Z_i}{Z_i} \right|$$

در این رابطه، Z_i مقدار واقعی کمیت وابسته و \bar{Z}_i مقدار تخمین زده شده بر اساس مدل ساخته شده است.

نکته قابل ذکر اینکه توزیع یکنواخت کرنل که توسط آیین‌نامه‌ها برای لحاظ کردن تأخیر برشی لحاظ می‌شود، علاوه بر سادگی، از دقت و کارایی مطلوب نیز برخوردار است. همچنین، نتایج حاصل از روابط پیشنهادی نشانگر این موضوع است که پدیده تأخیر برشی منجر به یک افزایش مقدار قابل توجه در مقادیر کرنش محوری در همسایگی محل اتصال بال به جان می‌شود و اساساً توزیع‌های پیشنهاد شده زمانی با دقت مطلوب قادر به برآورد توزیع حقیقی هستند که این جهش موضعی را به خوبی پوشش دهند.

²⁸ Uniform kernel function

جدول ۱۳. محاسبه نسبت MARE توزیع پیشنهادی بر MARE سایر توزیع های تغییر شکل محوری.

توزیع تغییر شکل محوری دیوارهای غیرمستطیلی					شماره رابطه
کوان (۱۹۹۶) [۲۵]	شی و ونگ (۲۰۱۶) [۴۰]	لیو و همکاران (۲۰۱۷) [۱۵]	نی و کائو (۲۰۱۸) [۱۶]	توزیع یکنواخت کرنل	
۰٫۳۸	۰٫۲۱	۰٫۲۸	۰٫۲۱	۰٫۴۶	(۱۴)
۰٫۳۰	۰٫۳۵	۰٫۳۱	۰٫۳۳	۰٫۶۴	(۱۵)
۰٫۶۵	۰٫۵۴	۰٫۸۱	۱٫۱۰	۰٫۶۳	(۱۶)
۰٫۶۵	۰٫۹۲	۰٫۴۳	۰٫۸۰	۰٫۹۶	(۱۷)
۰٫۱۵	۰٫۳۹	۰٫۱۶	۰٫۱۸	۰٫۴۸	(۱۸)
۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۷	(۱۹)
۰٫۳۶	۰٫۴۱	۰٫۳۴	۰٫۴۴	۰٫۵۴	میانگین

همچنین، در آخرین سطر از جداول ۱۲ و ۱۳ میانگین نسبت های حاصل از این پژوهش به مقادیر متناظر با روابط پیشنهادی سایر مطالعات محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. نخست در خصوص توزیع کرنش محوری در دیوارهای برشی بتن آرمه با مقطع بالدار، توزیع پیشنهادی این مطالعه مشابه ضوابط آیین نامه ها استفاده از یک توزیع یکنواخت در یک عرض مؤثر مشخص است. چرا که با بررسی مقادیر جدول ۱۲، ملاحظه می شود که میانگین متناظر این توزیع بیشتر از یک بوده و از مدل پیشنهادی EPR عملکرد بهتری دارد و در عین حال میانگین متناظر با سایر توزیع ها از عدد یک کمتر است.

لازم به ذکر است که اگر چه روابط پیشنهاد شده در این مطالعه و پژوهش های گذشته در حالات گوناگون از هندسه و شرایط دیوارهای بالدار، کارایی بهتری نسبت به توزیع مزبور دارند، اما همان طور که نتایج به دست آمده نشان می دهند، استفاده از توزیع یکنواخت کرنل علاوه بر این که در بسیاری از موارد به عنوان دقیق ترین توزیع در مقایسه با سایر توزیع ها ارزیابی شد و در مجموع از پایداری مناسبی نیز در برآورد توزیع کرنش محوری برخوردار بود، ضمن آن که سادگی کار با این توزیع بسیاری از چالش های مربوط به روابط پیشنهادی دیگر را ندارد.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، با در نظر گرفتن تأثیر تأخیر برشی، رفتار چرخه ای دیوارهای برشی بتنی غیرمستطیلی با مقطع L-شکل ارزیابی گردید. نتایج حاصل از این پژوهش را می توان در قالب موارد زیر خلاصه نمود:

- (۱) در ابتدا، مطالعات عددی با مدل سازی ۴۲ دیوار برشی L-شکل کوتاه، متوسط و لاغر در چارچوب برنامه FlashLab و نرم افزار آباکوس انجام و نتایج حاصل از آن به عنوان مبنای مطالعات پارامتریک جهت تخمین توزیع حاکم بر کرنش و تغییر شکل محوری استفاده شد.
- (۲) در مطالعات پارامتریک، با بکارگیری رگرسیون تکاملی EPR و الگوریتم ژنتیک، روابطی کاربردی جهت تخمین تغییرات کرنش و تغییر شکل محوری دیوارهای برشی با مقطع L-شکل ارائه شد.
- (۳) بر اساس شاخص ضریب تعیین جهت ارزیابی کارایی روابط پیشنهادی این مطالعه، کرنش محوری در این مقاطع با دقت مطلوب تری نسبت به تغییر شکل محوری تخمین زده شده است.
- (۴) نسبت مقادیر حاصل از درصد خطای میانگین، MARE، روابط پیشنهادی به مقادیر نظیر در پژوهش های موجود در ادبیات فنی، کمتر از یک بوده که نشانگر دقت و عملکرد مطلوب روابط ارائه شده در این پژوهش است.

(۵) با محاسبه نسبت مقادیر MARE روابط پیشنهاد شده این مطالعه به MARE توزیع‌های کرنش و تغییرشکل مطالعات پیشین، مشاهده شد که در ارزیابی مقدار کرنش محوری، توزیع پیشنهادی و نیز توزیع یکنواخت بیشترین دقت را در برآورد پاسخ دیوارهای L-شکل داشته، به طوری که میانگین خطای آن‌ها از ۶۵ درصد خطای سایر روابط موجود در ادبیات فنی کمتر است. همچنین، در برآورد مقادیر تغییرشکل محوری نیز توزیع پیشنهادی به طور میانگین با خطایی کمتر از ۵۴ درصد نسبت به سایر روابط موجود، از دقت مطلوبی در پیش‌بینی رفتار دیوارهای L-شکل برخوردار است.

(۶) ضوابط پیشنهادی برای کرنش و تغییرشکل محوری در دیوارهای کوتاه، متوسط و بلند L-شکل نشانگر تأثیر قابل توجه پدیده تأخیر برشی در رفتار هر یک از این دیوارها است، چرا که افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقادیر کرنش محوری در همسایگی محل اتصال بال به جان این مقاطع مشاهده می‌شود.

مراجع

- [1] Zhou, S. J. (2010). Finite beam element considering shear-lag effect in box girder. *Journal of Engineering Mechanics*, 136(9), 1115-1122.
- [2] Li, X., Wan, S., Mo, Y. L., Shen, K., Zhou, T., & Nian, Y. (2019). An improved method for analyzing shear lag in thin-walled box-section beam with arbitrary width of cantilever flange. *Thin-Walled Structures*, 140, 222-235.
- [3] Vojnić-Purčar, M., Prokić, A., & Bešević, M. (2019). A numerical model for laminated composite thin-walled members with openings considering shear lag effect. *Engineering Structures*, 185, 392-399.
- [4] Zhou, M., Zhang, Y., Lin, P., & Zhang, Z. (2022). A new practical method for the flexural analysis of thin-walled symmetric cross-section box girders considering shear effect. *Thin-Walled Structures*, 171, 108710.
- [5] Arici, M., Granata, M. F., & Longo, G. (2022). Symplectic analysis of thin-walled curved box girders with torsion, distortion and shear lag warping effects. *Thin-Walled Structures*, 175, 109244.
- [6] Khaloo, A. R., Tabiee, M., Abdoos, H. (2021). Shear lag effect on non-rectangular RC shear walls: a review of the literature. in: *7th international congress on civil engineering, architecture and urban development*. Tehran: Iran, 11[In Persian].
- [7] Reissner, E. (1946). Analysis of shear lag in box beams by the principle of minimum potential energy. *Quarterly of applied mathematics*, 4(3), 268-278.
- [8] Song, Q. G., & Scordelis, A. C. (1990). Shear-lag analysis of T-, I-, and box beams. *Journal of Structural Engineering*, 116(5), 1290-1305.
- [9] Haji-Kazemi, H., & Company, M. (2002). Exact method of analysis of shear lag in framed tube structures. *The structural design of tall buildings*, 11(5), 375-388.
- [10] Prokić, A., Vojnicpurcar, M., & Lukic, D. (2014). A new finite element considering shear lag. In: *Proceedings of The International Scientific Conference*. Brasov: CIBV, 8.
- [11] Prokić, A. (1996). New warping function for thin-walled beams. II: Finite element method and applications. *Journal of structural engineering*, 122(12), 1443-1452.
- [12] Brueggen, B. L. (2009). *Performance of T-shaped reinforced concrete structural walls under multi-directional loading* (Doctoral dissertation, University of Minnesota).
- [13] 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), 04017040.
- [14] Zhang, Z., & Li, B. (2017). Shear lag effect in tension flange of RC walls with flanged sections. *Engineering Structures*, 143, 64-76.
- [15] Liu, C., Wei, X., Wu, H., Li, Q., & Ni, X. (2017). Research on shear lag effect of t-shaped short-leg shear wall. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 61(3), 602-610.
- [16] Ni, X., & Cao, S. (2018). Shear lag analysis of I-shaped structural members. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(10), e1471.
- [17] Hoult, R. D. (2019). Shear lag effects in reinforced concrete C-shaped walls. *Journal of Structural Engineering*, 145(3), 04018270.

- [18] Khaloo, A. R., Tabiee, M., Abdoos, H. (2021). Analytical study of distribution of shear lag-induced stress in non-rectangular reinforced concrete shear walls. In: *12th international congress on civil engineering*. Mashhad: Iran, 8 [In Persian].
- [19] Khaloo, A. R., Tabiee, M., Abdoos, H. (2021). A Novel Approach to the Parametric Study on the Effective Flange Width of Non-Rectangular Reinforced Concrete Shear Walls. *Journal of Concrete Structure and Materials*, 6(1), 138-161.
- [20] Galal, K., & El-Sokkary, H. (2008, October). Advancement in modeling of RC shear walls. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 10.
- [21] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Shiri, M. (2016). Modeling and analysis of thin steel plate shear walls using the new method. In *2nd international conference on civil engineering, architecture & urban planning elites*, Vol. 2, pp. 124-136.
- [22] Khaloo, A. R., 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.
- [23] Zhang, Z., Luo, D., & Li, B. (2021). Strain Nonlinearity and Shear Lag Effect in Compressive Flange of Reinforced Concrete Structural Walls. *ACI Structural Journal*, 118(3).
- [24] Yadegari, A., Pachideh, G., Gholhaki, M., & Shiri, M. (2016). Seismic performance of C-PSW. In *2nd international conference on civil engineering, architecture & urban planning elites*, Vol. 2, pp. 110-123.
- [25] Kwan, A. K. (1996). Shear lag in shear/core walls. *Journal of Structural Engineering*, 122(9), 1097-1104.
- [26] Arnott, K. (2005). Shear wall analysis- new modelling, same answers. *Structural Engineer*, 83(3), 20-22.
- [27] Palermo, D., Abdulridha, A., & Charette, M. (2007, June). Flange participation for seismic design of reinforced concrete shear walls. In *Proceedings of the 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering*.
- [28] Park, R. and Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. Toronto: John Wiley & Sons, 783.
- [29] Kent, D. C., & Park, R. (1971). Flexural members with confined concrete. *Journal of the structural division*, 97(7), 1969-1990.
- [30] Barth, K. E., & Wu, H. (2006). Efficient nonlinear finite element modelling of slab on steel stringer bridges. *Finite elements in analysis and design*, 42(14-15), 1304-1313.
- [31] Wahalathantri, B., Thambiratnam, D., Chan, T., & Fawzia, S. (2011). A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS. In *Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing* (pp. 260-264). Queensland University of Technology.
- [32] Jiaying, M. (2017). *Experimental and analytical investigations on seismic behavior of non- rectangular reinforced concrete squat walls*. Ph.D. dissertation. Nanyang technological university, Civil engineering department.
- [33] Cetisli, F., & Naito, C. J. (2009). Concrete subjected to varying confinement, I: experimental evaluation. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2), 239-249.
- [34] Giustolisi, O., Savic, D. A. (2006). A symbolic data-driven technique based on evolutionary polynomial regression. *Journal of Hydroinformatics*, 8(3), 207-222.
- [35] Gandomi, A. H., Alavi, A. H., & Ryan, C. (Eds.). (2015). *Handbook of genetic programming applications*. Berlin: Springer, 593.
- [36] Golub, G. H., Van Loan, C. F. (1989). *Matrix computations*. the johns hopkins university press baltimore.
- [37] Khaloo, A. R., Tabiee, M., Abdoos, H. (2021). A numerical investigation of the shear-lag effect on non-rectangular RC shear walls based on evolutionary polynomial regression (EPR). In: *13th National Conference on Concrete*. Tehran: The Iranian Concrete Society (ICS), 15 [In Persian].
- [38] Ahangar-Asr, A., Faramarzi, A., Mottaghifard, N., & Javadi, A. A. (2011). Modeling of permeability and compaction characteristics of soils using evolutionary polynomial regression. *Computers & Geosciences*, 37(11), 1860-1869.
- [39] Chin, W. W. (1998). The partial least squares approach to structural equation modelling. *Modern methods for business research*, 295(2), 295-336.
- [40] Shi, Q. X., & 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.