

## Strain demand in boundary elements of concrete shear walls with hybrid steel-composite rebars

Erfan Shafei<sup>1\*</sup>

1- Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

### ABSTRACT

The present research investigates the strain demand of boundary elements of concrete shear walls reinforced with hybrid steel-composite rebars. In this regard, the numerical model of an existing full-scale sample has been done in VecTor-2.0 software and the results has been validated. Then, parametric studies were carried out for different values of the hybridization ratio where the cyclic response, maximum force, secant stiffness, single-cycle energy, displacement recovery index and strain values of the rebars are extracted. The results show that the combination of steel and composite rebars improves the hysteresis response of shear walls, maintains the post-yield strength, and increases the secant stiffness for lateral drifts over 1.9%. Also, this technique leads to a self-centering behavior minimizing the seismic damage. Hybridization with the combination ratio  $r_h \geq 0.2$  provides strength and maintains the stability of the wall. Increasing the hybridization ratio higher than  $r_h = 0.3$  only results in an increase in the strength with no residual displacement change. For walls with a low rebar hybridization ratio, the cyclic strain-displacement curves are asymmetric, but the behavior becomes symmetric and the maximum steel strain is reduced by 50% by increasing the ratio. The expansion in the steel strain cycles is insignificant for low hybridization ratios. However, it becomes more apparent with the increase of composite rebars. The effective straining height of the steel in the basic model is equal to half the length of the shear wall, but with the addition of composite rebars, this height increases up to 80% of the wall length, which indicates the yield distribution of the steel in a wider area of the member when it is hybridized with composite.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 02 December 2022

**Revise Date:** 30 March 2023

**Accept Date:** 12 May 2023

### Keywords:

Concrete shear wall  
Steel-composite rebars  
Cyclic response  
Strain demand  
Boundary element  
Residual deformation  
Self-centering behavior

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.374168.2981>

\*Corresponding author: Erfan Shafei.

Email address: e.shafei@uut.ac.ir

## تقاضای کرنشی در اعضای مرزی دیوارهای برشی بتنی با میلگردهای ترکیبی فولادی -

### کامپوزیتی

عرفان شافعی<sup>\*۱</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

تحقیق حاضر به بررسی تقاضای کرنشی در عناصر مرزی دیوارهای برشی بتنی با میلگردهای فولادی-کامپوزیتی می‌پردازد. استفاده همزمان از فولاد و کامپوزیت می‌تواند منجر به کاهش تقاضای کرنشی و تغییر در توزیع آن تحت بارگذاری جانبی شود. در این راستا، ابتدا مدل المان محدود برای یک نمونه آزمایشگاهی با مقیاس کامل در نرم‌افزار VecTor-2.0 ارائه شده و صحت‌سنجی شده است. سپس مطالعات پارامتریک برای مقادیر مختلف نسبت ترکیب فولاد و کامپوزیت انجام شده و پاسخ چرخه‌ای، نیروی حداکثر، سختی سکانتی، انرژی تک‌چرخه، شاخص بازیابی تغییرمکان و توزیع کرنش میلگرد استخراج شده است. به این منظور از پارامتر نسبت ترکیب استفاده شده که به صورت نسبت مساحت میلگردهای کامپوزیتی به مساحت کل میلگردها تعریف شده است. نتایج نشان دادند که ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی باعث کاهش تغییرشکل پسماند، حفظ مقاومت پس از تسلیم عضو و افزایش سختی سکانتی در تغییرمکان‌های جانبی نسبی بیشتر از ۱/۹ درصد می‌شود. همچنین ترکیب فولاد و کامپوزیت منجر به رفتار مرکزگرایی دیوار شده و عضو قابلیت بازیابی تغییرمکان را بعد از قطع نیرو دارد. ترکیب مصالح با نسبت ترکیب بیشتر از ۰/۲ منجر به تأمین مقاومت و حفظ پایداری دیوار می‌شود. در مقابل افزایش نسبت ترکیب از حد ۰/۳ صرفاً مقاومت عضو را افزایش داده و تغییر چندانی در مقدار تغییرمکان پسماند ندارد. برای دیوارهای با نسبت ترکیب کمتر از ۰/۳، منحنی‌های چرخه‌ای کرنش - تغییرمکان نامتقارن بوده ولی با افزایش نسبت ترکیب، رفتار متقارن شده و حداکثر کرنش فولاد به ازای تغییرمکان برابر نصف می‌شود. ناحیه مؤثر کرنشی فولاد در مدل پایه برابر با نصف طول دیوار برشی بوده ولی با افزودن میلگردهای کامپوزیتی این ناحیه تا حد ۸۰ درصد طول دیوار افزایش می‌یابد که نشانگر توزیع تسلیم‌شدگی فولاد در ناحیه وسیعتری از عضو به شرط ترکیب با کامپوزیت است.

کلمات کلیدی: دیوار برشی بتنی، میلگردهای ترکیبی فولادی-کامپوزیتی، رفتار چرخه‌ای، تقاضای کرنشی، عضو مرزی، تغییرشکل پسماند، رفتار مرکزگرایی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.374168.2981">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.374168.2981</a>	۱۴۰۲/۱۱/۳۰	۱۴۰۲/۰۲/۲۲	۱۴۰۲/۰۲/۲۲	۱۴۰۲/۰۱/۱۰	۱۴۰۱/۰۹/۱۱
عرفان شافعی e.shafei@uut.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

دیوارهای برشی بتنی جز سیستم‌های مقاوم جانبی بوده که در برابر نیروهای ناشی از باد و زلزله طراحی می‌شوند و نیز ثابت شده است که این عناصر دارای مقاومت جانبی کافی و هزینه ساخت مقرون به صرفه در سازه‌های مدرن هستند [۷-۱۱]. زینوف و سمردوف [۸] معتقدند که رفتار دینامیکی دیوارهای برشی وابسته به میرایی آنها بوده و لذا با استفاده از توزیع‌های متفاوت برای میلگردها سعی در افزایش سطح شکل‌پذیری دیوارها داشته‌اند. محققان دیگری نیز با استفاده از ظرفیت تسلیم میلگردهای فولادی در عناصر مرزی، باعث تشکیل بهتر مکانیزم‌های شکل‌پذیر و افزایش انرژی استهلاکی شدند [۹-۱۱]. با این حال، استفاده از میلگردهای فولادی با تنش تسلیم پایین ممکن است منجر به افزایش بیش از اندازه کرنش در عناصر مرزی شده و در نتیجه برخی میلگردها دچار پارگی شده و دیوار دیگر قادر به بازگشت به حالت اولیه خود نباشد. بنابراین تغییر شکل‌های جانبی بزرگی در دیوارهای برشی باقی‌مانده که باعث فروپاشی آنها بعد از زلزله می‌شود. همچنین با وقوع پس‌لرزه‌ها ممکن است بر مقدار این تغییر شکل‌ها افزوده شده و سازه ناپایدار شود. علاوه بر این، تغییر مکان‌های پسماند نیز هزینه‌های قابل توجهی را برای تعمیر این ساختمان‌های آسیب دیده به دنبال داشته و حتی برخی از دیوارها به دلیل خرابی‌های شدید مجبور به تخریب می‌شوند [۱۲]. در نتیجه، کاهش محدوده کرنش در عناصر مرزی دیوارها حین زلزله از نظر حفظ پایداری و قابلیت بهره‌برداری آنها بسیار مهم است [۱۳، ۱۴]. یکی از موضوعات مهم در طراحی لرزه‌ای کاهش تقاضای کرنشی<sup>۱</sup> در عناصر مرزی دیوارها و فراهم کردن رفتاری مرکزگرا<sup>۲</sup> پس از تغییر مکان‌های جانبی بزرگ است.

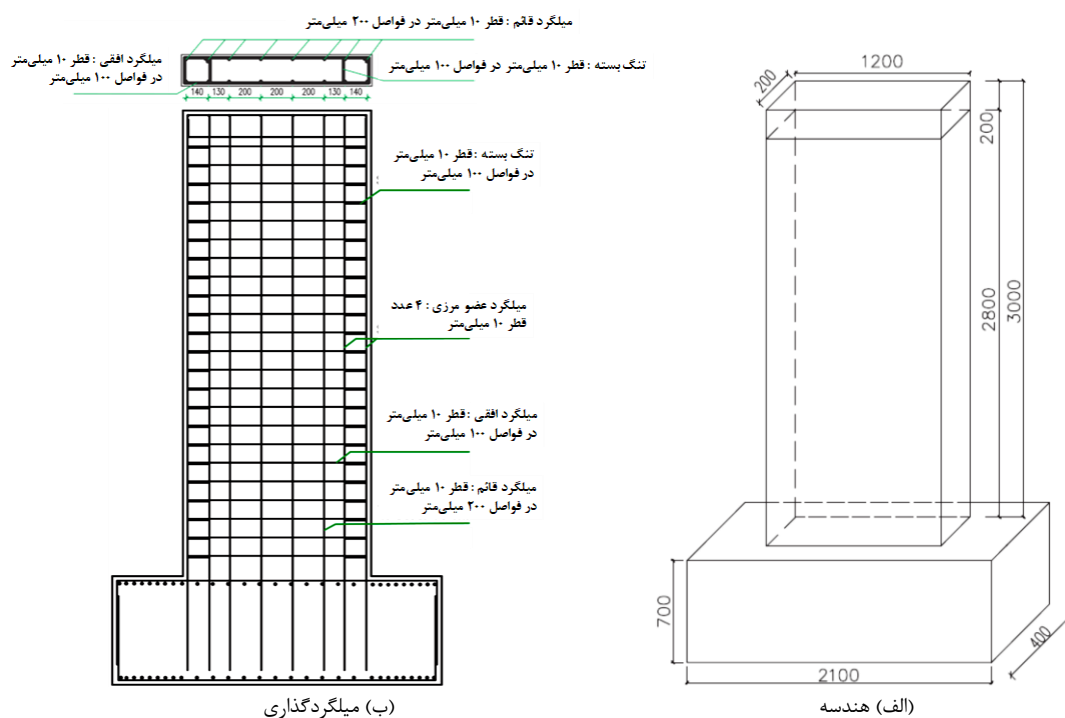
پلیمرهای مسلح با الیاف<sup>۳</sup> (FRP) به دلیل نسبت مقاومت به وزن بسیار بالا غالباً در صنایع هوافضا کاربرد داشته و امروزه برای ترمیم و تقویت سازه‌های آسیب دیده نیز استفاده می‌شوند. تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از میلگردهای FRP به عنوان تقویت‌کننده خمشی برای کاهش تغییر مکان‌های پسماند انجام شده است. حسن‌پور و همکاران [۲] و علی‌اصغرمقانی و خالو [۳] به ترتیب به بررسی اثر میلگردهای کامپوزیتی شیشه در سختی مؤثر تیرها و قاب‌های پرتال پرداختند. طبق نتایج بدست آمده، میلگردهای کامپوزیتی باعث اصلاح عمق بلوک فشاری بتن و افزایش ظرفیت خمشی عضو قبل از پکیدگی نهایی بتن شده‌اند. همچنین افزایش سطح میلگردهای کامپوزیتی منجر به افزایش سختی مؤثر جانبی قاب‌ها، کاهش تغییر مکان جانبی نسبی به ازای سطح عملکرد ایمنی جانی و همچنین کاهش محسوس شکل‌پذیری آنها می‌شود. ژائو و همکاران [۱۴] تعداد سه دیوار بتنی با نسبت میلگرد FRP متغیر تحت بارهای محوری ثابت و بارگذاری جانبی چرخه‌ای آزمایش کردند. مطالعات آنها نشان داد سختی غیرالاستیک دیوار بهبود یافته و تغییر مکان‌های پسماند به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. در مقابل، افزایش نسبت میلگرد فولادی به سختی غیرالاستیک کمک چندانی نکرده است. قاضی زاده و کرو نوگز [۱۵، ۱۶] رفتار چرخه‌ای دیوار برشی بتنی با الیاف فولادی<sup>۴</sup> (SFRC) تقویت شده با میلگردهای FRP را با دیوار برشی بتنی معمولی مقایسه کردند. طبق نتایج بدست آمده، دیوار جدید قابلیت مرکزگرایی قابل توجهی داشته و تغییر مکان‌های پسماند به شدت کاهش یافت. حسینی و همکاران [۲۱] نیز اثر میلگردهای عرضی مارپیچ را بر عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی دارای میلگردهای کامپوزیتی بررسی کرده و توانستند قابلیت برگشت پذیری جابجایی و توزیع کرنش‌ها را به طور چشمگیری بهبود دهند.

میلگردهای کامپوزیتی به دلیل رفتار الاستیک کامل و مقاومت کششی بالا می‌توانند کمک شایانی به کاهش کرنش در عناصر مرزی کرده و کرنش‌های پسماند را نیز کنترل کنند. در این راستا، در تحقیق حاضر از میلگردهای کامپوزیتی در ترکیب با میلگردهای فولادی به عنوان آرماتورهای طولی اعضای مرزی استفاده شده است. هدف اصلی این تحقیق علاوه بر مطالعه رفتار چرخه‌ای، سختی غیرالاستیک و اتلاف انرژی، بررسی تأثیر میلگردهای فولادی-کامپوزیتی بر تقاضاهای کرنشی کششی و فشاری عناصر مرزی در دیوارهای برشی بتنی است. در این راستا، کرنش میلگردهای فولادی-کامپوزیتی در عناصر مرزی توسط مدل المان محدود ارائه شده براساس فرضیات طراحی برآورد شده و همچنین شاخص بازیابی تغییر مکان و توزیع کرنش میلگردهای فولادی و کامپوزیتی در عناصر مرزی برای ارزیابی رفتار تحلیل شده‌اند.

<sup>1</sup> strain demand<sup>2</sup> self-centering response<sup>3</sup> fiber-reinforced polymer<sup>4</sup> steel fiber-reinforced concrete

## ۲- توصیف آزمایش مرجع

نتایج آزمایشگاهی مرجع مدنظر جهت صحت‌سنجی مدل المان محدود حاضر برگرفته از تحقیق ژائو و همکاران [۱۴] بوده که شامل آزمایش استاتیکی دیوار برشی بتنی تحت بارگذاری چرخه‌ای تا آستانه شکست و فروپاشی عضو است. نسبت ابعاد دیوار برشی برابر با  $2/33$  بوده و نماینده دیواری با ارتفاع متوسط است. ارتفاع، عرض و ضخامت عضو به ترتیب برابر با ۲۸۰۰، ۱۲۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر است. شکل ۱ نمایانگر هندسه و میلگردگذاری نمونه دیوار مرجع است. دیوار شامل میلگردهای فولادی در جهت عمودی به میزان  $0/52$  درصد و در جهت افقی به میزان  $0/79$  درصد بوده که بیشتر از حداقل تعیین شده در آئین‌نامه طراحی ACI 318 [۱۷] است. بتن مورد استفاده جهت ساخت دیوار از دسته C45 بوده و دارای مقاومت فشاری  $43/47$  مگاپاسکال، مقاومت کششی  $3/4$  مگاپاسکال و مدول الاستیک  $31/2$  گیگاپاسکال است. همچنین خواص مکانیکی میلگردهای فولادی به صورت مقاومت تسلیم ۴۲۴ مگاپاسکال، مقاومت پارگی ۶۵۸ مگاپاسکال، کرنش پارگی ۹ درصد و مدول الاستیک ۲۲۴ گیگاپاسکال گزارش شده است. دیوار تحت دو بارگذاری استاتیکی ثابت محوری معادل با ۱۰ درصد ظرفیت محوری (۱۰۸۰ کیلونیوتن) و جانبی چرخه‌ای به صورت کنترل تغییرمکان رفت و برگشتی تا حدی که ۸۵ درصد از مقاومت جانبی نهایی پس از شکست رخ دهد قرار گرفته است. بارگذاری چرخه‌ای شامل ۱۶ مرحله بارگذاری افزایشی بوده که هر مرحله شامل ۳ چرخه با اعمال تغییرمکان جانبی نسبی  $0/1$ <sup>۵</sup> درصد بوده است. لذا در پایان بارگذاری چرخه‌ای، تغییرمکان جانبی نسبی برابر با  $1/6$  درصد به دیوار اعمال شده است.



شکل ۱: ابعاد هندسی و جزئیات میلگردگذاری نمونه دیوار آزمایشگاهی مرجع [۱۴].

## ۳- مدل‌سازی المان محدود و صحت‌سنجی

به منظور شبیه‌سازی ریاضی رفتار غیرخطی دیوار برشی بتنی، از نرم‌افزار تحلیل غیرخطی المان محدود VecTor-2.0 [۱۸] استفاده شده است. از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به مدل‌های پلاستیسیته گسترده، اندرکنش میلگرد و بتن، مدل‌های بتن محصورشده و همچنین بیان پدیده محلی‌سازی کرنش<sup>۶</sup> در بتن براساس تئوری مکانیک شکست<sup>۷</sup> اشاره کرد. محیط بتن ترک‌خورده در نرم‌افزار به

<sup>5</sup> drift

<sup>6</sup> strain localization

<sup>7</sup> fracture mechanics

صورت یک محیط ارتوتروپیک با ترک‌های پخش<sup>۸</sup> و غیرمتعامد چرخنده<sup>۹</sup> بیان می‌شود. این برنامه از یک الگوریتم بارافزون و محاسبه سختی و تری به صورت سعی و خطایی<sup>۱۰</sup> برای تحلیل غیرخطی استفاده می‌کند. مدل ریاضی مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر به صورت زیر بیان شده است.

### ۳-۱- مدل رفتاری بتن

رفتار فشاری بتن در نرم‌افزار در سه مرحله قبل از شکست<sup>۱۱</sup>، پس از شکست<sup>۱۲</sup> و نرم‌شوندگی<sup>۱۳</sup> بیان می‌شود. مدل متداول در بیان رفتار قبل از شکست براساس مدل سهموی هونگنستاد<sup>۱۴</sup> براساس رابطه  $f_c = -f'_c \left( 2 \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} - \left( \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right)^2 \right)$  بوده که در رابطه  $f'_c$  مقاومت فشاری بتن،  $\varepsilon_p = 0.002$  کرنش شکست بتن و  $\varepsilon_{ci}$  کرنش فشاری است. برای بیان رفتار پس از شکست بتن فشاری از مدل پارک-کنت اصلاح‌شده<sup>۱۵</sup> استفاده شده که مطابق رابطه  $f_c = -f'_c (1 - Z(\varepsilon_{ci} - \varepsilon_p))$  است. در این رابطه  $Z$  ضریب اثر محصورشدگی بتن فشاری بوده که مطابق مطابق رابطه  $Z = 0.5 \left/ \left( \frac{3 + 0.3 f'_c}{145 f'_c - 1000} \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_p} \right) + \left( \frac{f_{lat}}{170} \right)^{0.9} + \varepsilon_p \right) \right.$  استفاده می‌شود. مقادیر موجود در رابطه ضریب  $Z$  شامل  $\varepsilon_{cu} = 0.01$  کرنش فروپاشی بتن غیرمحصور و  $f_{lat}$  مجموع تنش‌های سه محوره است. رفتار نرم‌شوندگی بتن براساس مدل غیرخطی وکیو<sup>۱۶</sup> مطابق رابطه  $f_c = -f'_c / \left( 1 + 0.35 \left( \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_{cu}} \right)^{0.28} \right)$  محاسبه می‌شود. رفتار کششی بتن نیز براساس رابطه تنش سطح ترک برحسب مقدار عرض ترک استوار بوده و از یک مدل دوخطی تبعیت می‌کند. ویژگی این مدل استقلال از اندازه المان‌بندی محیط بتن بوده و حساسیت توزیع ترک‌خوردگی به اندازه المان را منتفی می‌کند. رفتار کششی براساس مدل CEB-FIP [۱۹] بوده که مطابق رابطه (۱) است.

$$f_t = \begin{cases} f'_t \left( 1 - 0.85 \frac{w}{w_1} \right) & 0 < w < w_1 \\ \frac{0.15 f'_t}{w_c - w_1} (w_c - w) & w_1 < w < w_c \end{cases} \quad (1)$$

در این مدل  $f'_t$  مقاومت کششی بتن،  $w_1 = \frac{2G_f}{f'_t} - 0.15w_c$  عرض ترک بحرانی،  $w_c = 3.6 \frac{G_f}{f'_t}$  عرض ترک شکست،  $w$  عرض ترک بازشونده و  $G_f$  انرژی شکست بتن است. رفتار محصورشدگی<sup>۱۷</sup> بتن براساس مدل کوپفر و ریچارت<sup>۱۸</sup> بوده که مقاومت بتن محصورشده تحت تنش سه محوره مطابق رابطه  $f_c^{co} = f'_c \left\{ 1 + 0.92 \frac{f_{cn}}{f'_c} - 0.76 \left( \frac{f_{cn}}{f'_c} \right)^2 + 4.1 \frac{f_{cl}}{f'_c} \right\}$  اصلاح می‌شود. پارامترهای موجود در این رابطه  $f_{cn}$  اختلاف تنش‌های محوری و  $f_{cl}$  تنش جانبی محصورکننده است. مقادیر عددی پارامترهای فوق در بخش مدل‌سازی در ادامه بیان می‌شود.

### ۳-۲- مدل رفتاری میلگرد فولادی و کامپوزیتی

رفتار میلگرد فولادی براساس مدل سچکین با اثر باوشینگر<sup>۱۹</sup> مطابق مدل رمبرگ-اسگود<sup>۲۰</sup> است.  $E_m$  مدول غیرالاستیک،  $E_s$  مدول الاستیک،  $f_y$  مقاومت تسلیم و  $\varepsilon_{su}$  کرنش پارگی است. رفتار میلگرد کامپوزیتی براساس مدل الاستیک-شکست به صورت متقارن در کشش و فشار بوده که براساس  $E_f$  مدول الاستیک و  $\varepsilon_{fu}$  کرنش پارگی کنترل می‌شود. به علاوه از مدل خرابی هشین<sup>۲۱</sup> نیز برای

<sup>8</sup> smeared cracks

<sup>9</sup> rotating non-orthogonal cracks

<sup>10</sup> iterative secant stiffness

<sup>11</sup> compression pre-peak response

<sup>12</sup> compression post-peak response

<sup>13</sup> compression softening

<sup>14</sup> Hognestad parabola

<sup>15</sup> modified Park-Kent

<sup>16</sup> Vecchio 1992-A

<sup>17</sup> Confinement

<sup>18</sup> Kupfer & Richart

<sup>19</sup> Seckin model with Bauschinger effect

<sup>20</sup> Ramberg-Osgood

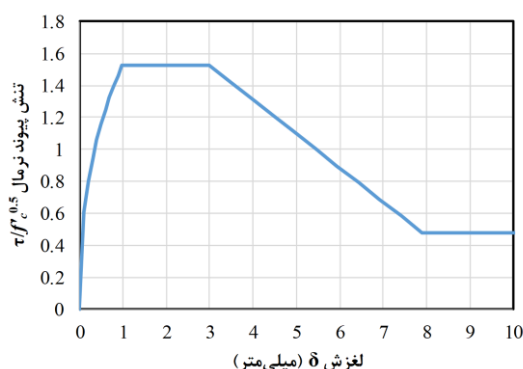
<sup>21</sup> Hashin Damage

مدل سازی رفتار پارگی مصالح کامپوزیت نیز بهره گرفته شده که در سایر نرم افزارهای المان محدود موجود است. ولی از آنجایی که میلگردهای کامپوزیتی در دیوارهای برشی صرفاً تحت تنش محوری قرار دارند لذا مدل الاستیک-شکست رفتار یکسانی با مدل خرابی هشین ارائه کرده که در مطالعات مرجع نیز اشاره شده است [۱۸، ۱۹]. شایان ذکر است که مدل مفروض قابلیت حذف سختی و مقاومت میلگرد کامپوزیتی را پس از گسیختگی به شرط تجاوز کرنش آن از حد  $\epsilon_{fu}$  نیز دارد.

#### ۴-۳- مدل رفتاری لغزش میلگرد

برای میلگردهای مدفون در داخل بتن، مدل پیوند<sup>۲۲</sup> رابطه تنش و لغزش را در ناحیه مهار بتن به فولاد تعیین کرده و مکانیزم لغزش را در اثر ترک خوردگی بیان می کند. رابطه تنش و لغزش مطابق مدل الیگهاوزن و همکاران [۲۰] براساس رابطه ۱ پیشنهاد شده است. رابطه تنش و لغزش شامل یک شاخه غیرخطی صعودی، یک سطح تنش ثابت، یک شاخه نزولی و یک سطح تنش پسماند مطابق شکل ۲ بیان می شود.

$$\tau = \begin{cases} \tau_m \left(\frac{\delta}{\delta_1}\right)^{0.4} & 0 \leq \delta < \delta_1 \\ \tau_m & \delta_1 \leq \delta < \delta_2 \\ \tau_m - \left(\frac{\delta - \delta_2}{\delta_3 - \delta_2}\right)(\tau_m - \tau_f) & \delta_2 \leq \delta < \delta_3 \\ \tau_f & \delta_3 \leq \delta \end{cases} \quad \begin{cases} \tau_m = 0.748 \sqrt{\frac{c f_c'}{d_b}} & \tau_p = (20 - \frac{d_b}{4}) \sqrt{\frac{f_c'}{30}} & \delta_2 = 3.0 \\ \tau_f = 0.234 \sqrt{\frac{c f_c'}{d_b}} & \delta_1 = \sqrt{\frac{f_c'}{30}} e^{0.25 \ln \frac{\tau_m}{\tau_p}} & \delta_3 = 7.9 \end{cases} \quad (2)$$



شکل ۲: رابطه تنش پیوند و لغزش در ناحیه اتصال میلگرد و بتن.

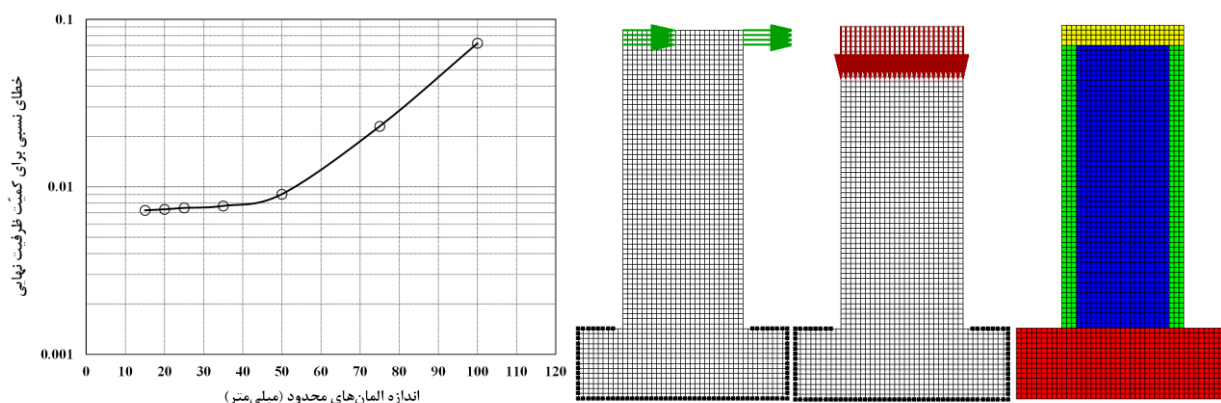
در این رابطه حداکثر تنش پیوند،  $\tau_m$  حداکثر تنش پیوند پس از لغزش،  $c$  فاصله پوشش بتن تا میلگرد،  $d_b$  قطر میلگرد،  $\delta_1$  لغزش حد الاستیک،  $\delta_2$  لغزش شکست و  $\delta_3$  لغزش متناظر با مقاومت پسماند است. اندرکنش بین میلگرد و بتن در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن رابطه تنش و لغزش فوق بیان شده است. لذا سازگاری کرنش پیش از شکست پیوند در سطح بتن و میلگرد فراهم بوده ولی پس از شکست پیوند، استحکام آن کاهش یافته و سازگاری کرنش از بین می رود.

#### ۵-۳- مدل سازی المان محدود

محیط دیوار برشی توسط المان های سه بعدی آجری ۸ گره ای با انتگرال گیری گاوسی کامل مدل شده است. جهت افزایش سرعت محاسبات، قرارگیری میلگردهای فولادی و همچنین رفتار لغزشی آنها به صورت گسترده در داخل محیط دیوار مدل شده اند. قسمت پی دیوار نیز در تمامی جهات مقید شده است. فشار محوری دیوار به صورت استاتیکی در جهت قائم به صورت گسترده و یکنوا با زمان برابر با ۴/۳۵ مگاپاسکال وارد شده است. همچنین بارگذاری چرخه ای به صورت اعمال تغییر مکان ۲/۸ میلی متری و به صورت تکراری (۳ بار هر

<sup>22</sup> bond

دامنه) و افزایشی انجام شده که در نهایت تغییرمکان جانبی ۴۴/۸ میلی‌متر به دیوار وارد شده است. المان‌بندی و بارگذاری دیوار در شکل ۳-الف) نشان داده شده است. خواص مکانیکی مدنظر جهت تعریف مصالح بتن و میلگرد فولادی در مدل عددی مطابق جدول ۱ بیان شده است. مقادیر ذکر شده براساس اطلاعات آزمایشگاهی و روابط ذکر شده در آئین‌نامه مدل‌سازی CEB-FIP [۱۹] محاسبه شده است. تحلیل حساسیت اندازه المان‌بندی بر حسب خطای نسبی کمیّت ظرفیت نهایی برحسب اندازه المان‌ها انجام شده که نتیجه آن مطابق شکل ۳-د) بیان شده است. ظرفیت‌های نهایی نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود با اندازه المان ۵۰ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۳۳۰ و ۳۲۷ کیلونیوتن بدست آمده که خطای نسبی برابر با ۰/۹ درصد را برآورد می‌کند. با ریزترکردن شبکه المان‌بندی مقدار خطای نسبی ثابت باقی‌مانده که همگرایی مطلوبی را بیان می‌کند. در نتیجه مدل بهینه شامل ۸۴۰۸ المان و ۱۱۱۰۰ گره در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: المان‌بندی، بارگذاری و همگرایی دقت تحلیل برای مدل المان محدود دیوار برشی مرجع. (الف) المان‌بندی دیوار مرجع (ب) بارگذاری محوری ثابت (ج) بارگذاری جانبی چرخه‌ای (د) همگرایی دقت تحلیل المان محدود

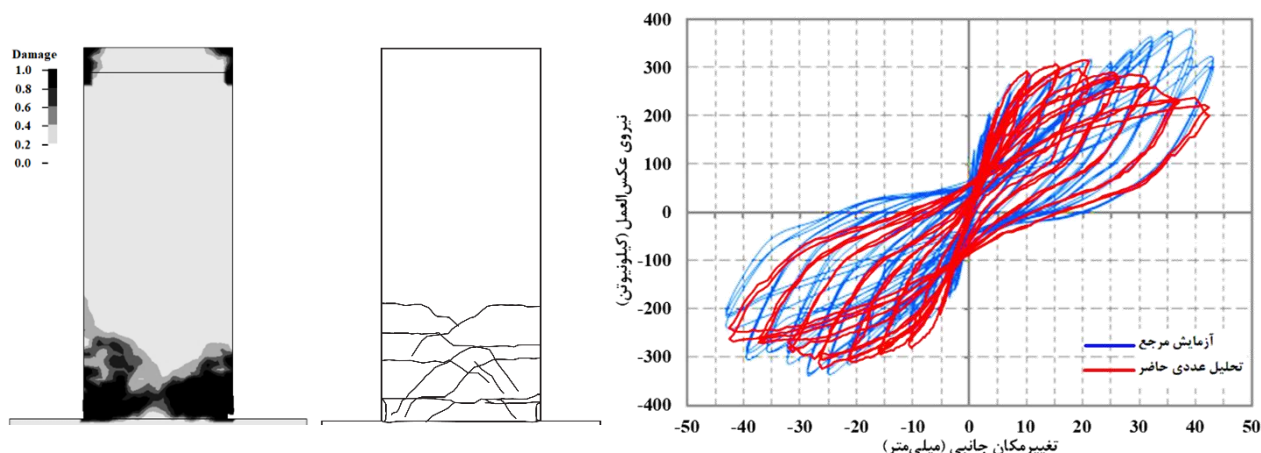
جدول ۱: خواص مکانیکی به کار رفته در مدل المان محدود جهت صحت‌سنجی

کمیّت	نماد ریاضی	مقدار	واحد	کمیّت	نماد ریاضی	مقدار	واحد
مقاومت فشاری بتن	$f'_c$	۴۳/۴۷	مگاپاسکال	مدول غیرالاستیک فولاد	$E_m$	۲/۶	گیگاپاسکال
انرژی شکست بتن	$G_f$	۰/۰۷۳	نیوتن بر میلی‌متر	مقاومت تسلیم فولاد	$f_y$	۴۲۴	مگاپاسکال
عرض ترک شکست بتن	$w_c$	۰/۰۶	میلی‌متر	کرنش پارگی فولاد	$\epsilon_{su}$	۰/۰۹	-
مدول الاستیک بتن	$E_c$	۳۱/۲	گیگاپاسکال	کرنش فروپاشی بتن	$\epsilon_{cu}$	۰/۰۱	-
مدول الاستیک فولاد	$E_s$	۲۲۴	گیگاپاسکال				

پاسخ چرخه‌ای مدل المان محدود حاضر به همراه پاسخ متناظر آزمایشگاهی مرجع در شکل ۴-الف) نشان داده شده است. براساس نتایج عددی، میلگردهای فولادی طولی در عناصر مرزی به ازای تغییرمکان جانبی نسبی ۰/۱۷ درصد تسلیم شده‌اند. ناپایداری عضو به ازای تغییرمکان جانبی نسبی ۱/۴ درصد رخ داده و عملاً مقاومت دیوار به حد ۲۶۴ کیلونیوتن کاهش پیدا کرده است. انرژی استهلاکی متناظر با پاسخ غیرخطی دیوار در مدل برابر با ۹۰/۶۵ کیلونیوتن‌متر محاسبه شده است. اختلافی بین مقاومت دیوار در نمونه آزمایش و تحلیل المان محدود بعد از تغییرمکان جانبی نسبی ۱/۴ رخ داده که ناشی از ناشاغولی بودن نیروی محوری و تغییر امتداد آن همراه با اعمال تغییرمکان جانبی در نمونه آزمایش است. از آنجایی که ثبات امتداد نیروی محوری در مدل به صورت صحیح بیان می‌شود لذا تقارن چرخه‌های بارگذاری و باربرداری به وضوح دیده می‌شود. پدیده دوکی‌شکل‌شدن<sup>۲۳</sup> رفتار چرخه‌ای ناشی از لغزش میلگرد و ترک‌خوردگی متوالی بتن نیز قابل مشاهده است. الگوی خرابی در نمونه آزمایشگاهی به صورت توزیع ترک‌خوردگی و در مدل المان محدود به صورت کانتور شاخص خرابی<sup>۲۴</sup> به ترتیب در اشکال ۴-ب) و ۴-ج) ترسیم شده است. محدوده عددی شاخص خرابی بین صفر (بتن سالم) و یک (بتن تخریب شده) است. براساس مقایسه بین توزیع ترک‌خوردگی آزمایشگاهی و کانتور شاخص خرابی عددی می‌توان الگوی مشابهی برای پکیدگی بتن به ازای تغییرمکان جانبی نسبی ۱/۶ درصد مشاهده کرد.

<sup>23</sup> pinching

<sup>24</sup> damage index



شکل ۴: مقایسه رفتار غیرخطی نمونه آزمایشگاهی مرجع [۱۴] و مدل المان محدود حاضر.  
 (الف) پاسخ چرخه‌ای آزمایشگاهی و عددی  
 (ب) الگوی خرابی در آزمایش مرجع [۱۴]  
 (ج) الگوی خرابی در مدل عددی

#### ۴- ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی

استفاده از ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی در عناصر مرزی که دارای بیشترین تقاضای کرنشی نیز هستند می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر در کاهش سطح کرنش و جلوگیری از پارگی این عناصر حین بارگذاری چرخه‌ای مطرح شود. میلگردگذاری فولادی به عنوان مدل پایه، ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی به عنوان مدل‌های میانی و میلگردگذاری کامپوزیتی به عنوان مدل نهایی خواهد بود. هدف از این کار بررسی عملکرد هر کدام یک از مدل‌ها در تأمین مقاومت، سختی سکانتی، بازیابی تغییرمکان و کنترل تقاضای کرنشی در عناصر مرزی تعریف می‌شود. انتظار می‌رود ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی بتواند افت مقاومت ناشی از کاهش بلوک فشاری بتن و افزایش کرنش فولاد را جبران کرده و محدوده کرنش میلگردها را در عناصر مرزی کاهش دهد. در این راستا تغییراتی در میلگردگذاری مدل پایه با هدف ثابت نگه‌داشتن ظرفیت کششی عضو مرزی مطابق رابطه ۲ انجام شده است. با توجه به اینکه مقدار میلگرد فولادی متناسب با مکانیزم تسلیم آن طراحی شده است، با افزودن میلگرد کامپوزیتی از میزان میلگرد فولادی کاسته شده تا اینکه شرایط تسلیم‌شدن آن را با وجود کاهش تقاضای کرنشی حفظ شود. در این رابطه  $\rho_f$  نسبت مساحت میلگرد کامپوزیتی،  $\rho_s$  نسبت مساحت میلگرد فولادی،  $f_{fu}$  تنش پارگی میلگرد کامپوزیتی و  $f_y$  تنش تسلیم میلگرد فولادی است. با فرض اینکه مقاومت پارگی میلگرد کامپوزیتی کربن (CFRP) برابر با ۳۰۸۹ مگاپاسکال و مدول الاستیک آن نیز برابر با ۱۹۱ گیگاپاسکال باشد، مقدار نسبت ترکیب میلگردها در جدول ۲ ذکر شده که بین صفر و یک با قدم‌های ۰/۱ متغیر است. مدل‌های M-0 و M-10 به ترتیب دیوارهای برشی با میلگردهای فولادی کامل (مدل پایه) و با میلگردهای کامپوزیتی (مدل نهایی) را نشان می‌دهند.

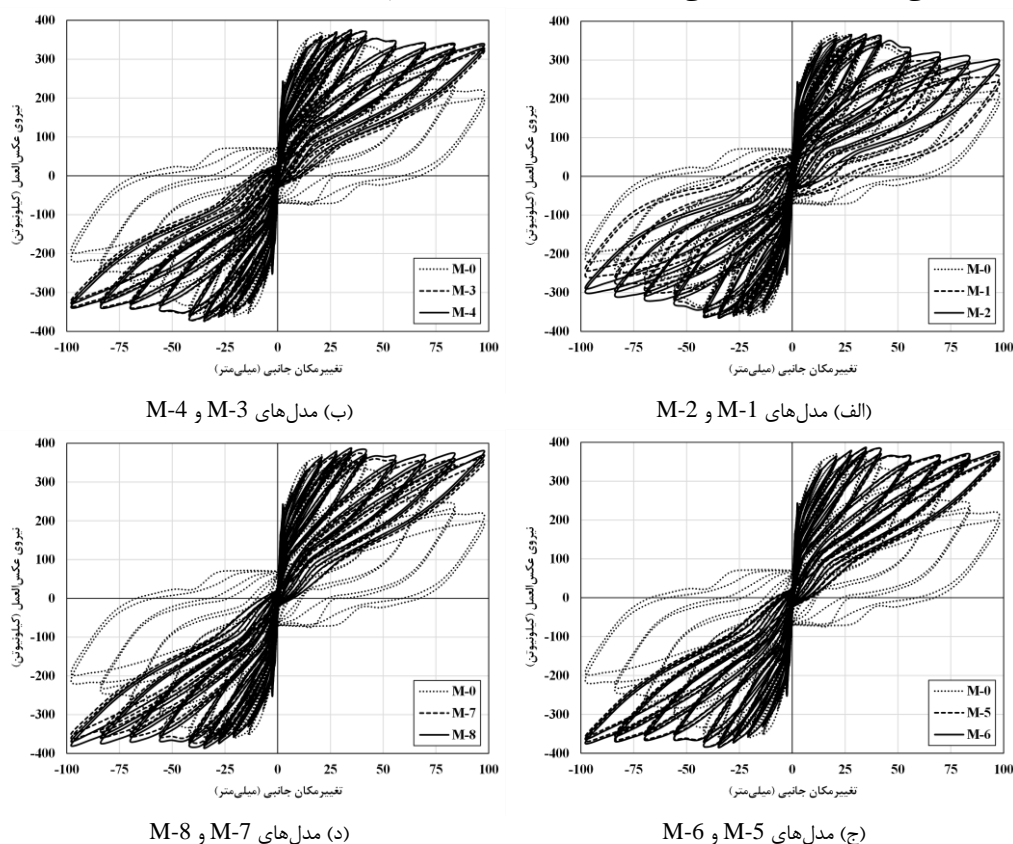
$$T_n = A_g (\rho_f f_{fu} + \rho_s f_y) \quad (2)$$

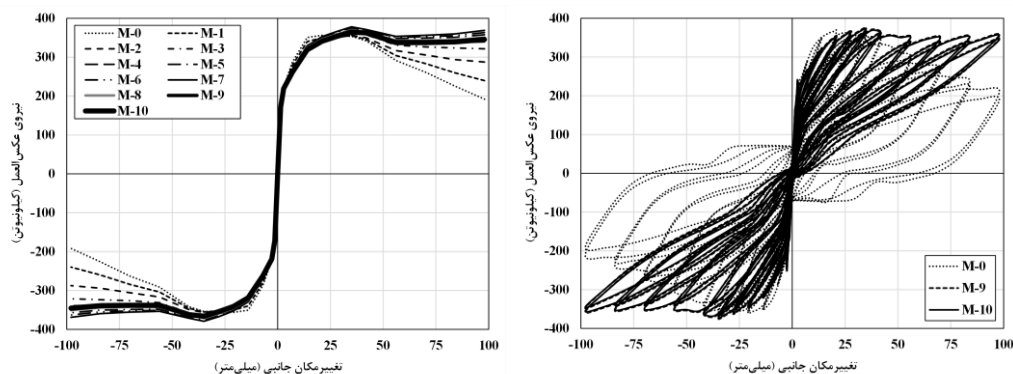


جدول ۲: ترکیب نسبت مساحت میلگردهای فولادی و کامپوزیتی در عناصر مرزی

نام مدل	$\rho_s$	$\rho_f$	نسبت ترکیب $r_h = \frac{\rho_f}{\rho_s + \rho_f}$	مساحت میلگرد فولادی (میلی متر مربع)	مساحت میلگرد کامپوزیتی (میلی متر مربع)
M-0	1.40%	0.0%	0.0	313.6	0.0
M-1	0.774%	0.086%	0.1	173.3	19.3
M-2	0.496%	0.124%	0.2	111.2	27.8
M-3	0.340%	0.146%	0.3	76.1	32.6
M-4	0.239%	0.159%	0.4	53.5	35.7
M-5	0.169%	0.169%	0.5	37.8	37.8
M-6	0.117%	0.176%	0.6	26.3	39.4
M-7	0.078%	0.181%	0.7	17.4	40.7
M-8	0.046%	0.186%	0.8	10.4	41.6
M-9	0.021%	0.189%	0.9	4.7	42.4
M-10	0.0%	0.192%	1.0	0.0	43.0

در ادامه تمامی حالات فوق که تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق مطالعه مرجع قرار دارند نیز مدل‌سازی شده‌اند. شکل ۵ پاسخ مدل‌ها را نشان داده که تا تغییر مکان جانبی مطلق ۹۸ میلی‌متر متناظر با تغییر مکان جانبی نسبی  $(\delta)$  ۳/۳ درصد بارگذاری شده است. جدول ۳ بیانگر مقادیر نیروی حداکثر  $(P)$ ، سختی سکانتی  $(K_s)$  و انرژی تک‌چرخه  $(E_{sc})$  مدل‌های تحلیلی برای تغییر مکان‌های جانبی نسبی ۰/۵ درصد (حد تسلیم ایده‌ال)، ۱/۹ درصد (سطح عملکرد ایمنی جانی<sup>۲۵</sup>) و ۳/۳ درصد (سطح عملکرد آستانه فروریزش<sup>۲۶</sup>) است. براساس نتایج، نیروی متناظر با حالت تسلیم ایده‌ال برای تمامی مدل‌ها تقریباً یکسان بوده ولی برای سطوح عملکرد انتخابی متفاوت است. ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی تغییر چشم‌گیری در رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی مدل شده داشته و اثر خود را به صورت کاهش تغییر شکل پسماند، حفظ مقاومت عضو بعد از سطح عملکرد ایمنی جانی و افزایش سختی سکانتی نشان می‌دهد. همچنین دیوارهای دارای میلگردگذاری ترکیبی دارای رفتار مرکزگرایی بوده [۲۱] که از نظر بازگشت‌پذیری تغییر شکل تحت زلزله مطلوب است.

<sup>25</sup> life safety<sup>26</sup> collapse prevention



(و) پوش منحنی‌های چرخه‌ای

(ه) مدل‌های M-9 و M-10

شکل ۵: رفتار چرخه‌ای نیرو - تغییر مکان مدل‌های پارامتریک با میلگردگذاری ترکیبی فولادی - کامپوزیتی.

سختی سکانتی متناظر با حالت تسلیم ایده‌آل برای تمامی مدل‌ها مشابه بوده و انرژی تک‌چرخه نیز ناچیز است. ولی با افزایش مقدار تغییر مکان جانبی نسبی تا حد ۱/۹ درصد، اختلاف رفتار بین دیوارهای دارای میلگرد فولادی تنها و میلگردگذاری ترکیبی نمایان می‌شود. در این حالت، حداکثر نیرو برابر با ۳۵۳/۳ کیلونیوتن برای مدل M-7 با نسبت ترکیب  $r_h = 0.7$  محاسبه شده که فراتر از نیروی مدل M-0 است. انرژی تک‌چرخه در ابتدا نیز با افزایش نسبت ترکیب کاهش یافته ولی برای نسبت‌های ترکیب بیشتر از ۰/۴ ثابت باقی مانده است. کاهش انرژی تک‌چرخه به عبارتی نشانگر کاهش سطح خرابی وارده به عضو بوده و در صورتی توجیه‌پذیر است که مقاومت عضو حفظ شود. بر این اساس، مدل‌های دارای نسبت ترکیب میلگردگذاری بین ۰/۴ و ۰/۷ دارای سطح خرابی کمتر در ازای حفظ مقاومت نسبت به مدل دارای میلگرد فولادی تنها هستند.

جدول ۳: نیروی حداکثر، سختی سکانتی و انرژی تک‌چرخه برای مدل‌های تحلیلی با میلگردگذاری ترکیبی

$\delta = 3.3\%$			$\delta = 1.9\%$			$\delta = 0.5\%$			$r_h$	مدل
$E_{sc}$ (kN.m)	$K_s$ ( $\frac{kN}{m}$ )	$P$ (kN)	$E_{sc}$ (kN.m)	$K_s$ ( $\frac{kN}{m}$ )	$P$ (kN)	$E_{sc}$ (kN.m)	$K_s$ ( $\frac{kN}{m}$ )	$P$ (kN)		
28.47	1958	191.9	15.49	5208	291.6	0.75	25038	350.5	0.0	M-0
22.44	2446	239.7	12.16	5432	304.2	0.66	24281	339.9	0.1	M-1
16.41	2934	287.5	8.82	5657	316.8	0.58	23524	329.3	0.2	M-2
14.08	3281	321.6	7.55	5913	331.1	0.55	23473	328.6	0.3	M-3
12.27	3443	337.4	6.56	6117	342.5	0.54	23192	324.7	0.4	M-4
12.14	3648	357.5	6.46	6220	348.3	0.53	23535	329.5	0.5	M-5
11.69	3706	363.2	6.24	6264	350.8	0.53	23523	329.3	0.6	M-6
11.24	3765	369.0	6.02	6308	353.3	0.52	23512	329.2	0.7	M-7
10.47	3576	350.4	5.68	6115	342.4	0.51	23147	324.1	0.8	M-8
9.69	3551	348.0	5.25	6070	339.9	0.50	22958	321.4	0.9	M-9
8.91	3527	345.6	4.83	6026	337.4	0.49	22769	318.8	1.0	M-10

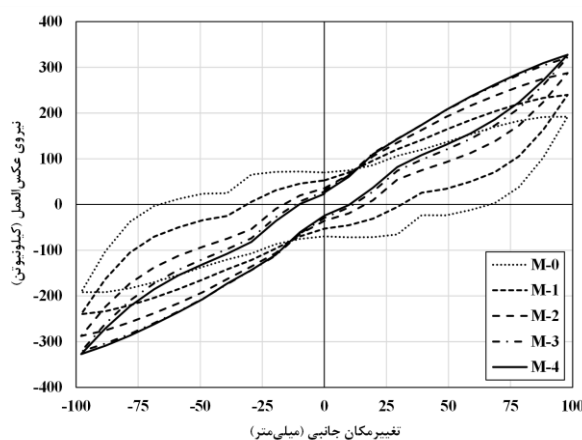
برای تغییر مکان جانبی نسبی ۳/۳ درصد رفتار مشابهی نیز دیده می‌شود. مقدار حداکثر نیرو برابر با ۳۶۹ کیلونیوتن برای مدل M-7 محاسبه شده که حتی فراتر از نیروی حد تسلیم تمامی مدل‌هاست. با وجود اینکه مدل M-0 در چنین مقدار تغییر مکانی کاملاً ناپایدار شده و فروریخته است، ترکیب میلگردگذاری منجر به تأمین مقاومت و حفظ پایداری دیوار شده است. همچنین مقدار انرژی تک‌چرخه نیز برای نسبت ترکیب ۰/۴ پایدار شده و سطح خرابی را حداقل کرده است. لذا استفاده از میلگردهای ترکیبی فولادی - کامپوزیتی در عناصر مرزی با حدود بدست آمده می‌تواند در راستای کاهش سطح خرابی، حفظ پایداری و تأمین قابلیت مرکزگرایی دیوارهای برشی مؤثر باشند.

۱-۴- بازیابی<sup>۲۷</sup> تغییر مکان

یکی از بارزترین اثرات ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی در رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی بتنی تأمین قابلیت برگشت پذیری یا بازیابی تغییر مکان در مسیر باربرداری بوده که امکان برگشت عضو را به وضعیت تغییر شکل نیافته فراهم می‌کند. برای محاسبه مقدار تغییر مکان پسماند عضو در تغییر مکان جانبی نسبی ۳/۳ درصد، نمودارهای تک‌چرخه نیرو - تغییر مکان در شکل ۶ ترسیم شده‌اند. شایان ذکر است به دلیل تطابق منحنی‌ها برای نسبت‌های ترکیب بیشتر از ۰/۴، باقی حالات رفتار یکسانی داشته و لذا رسم نشده‌اند. مقادیر مطلق  $(\Delta_{res})$  و نسبی  $(\delta_{res})$  تغییر مکان‌های پسماند برای نسبت‌های مختلف ترکیب در جدول ۴ آمده است. مقادیر مطلق و نسبی تغییر مکان پسماند برای مدل دیوار پایه به ترتیب برابر با ۶۸/۶ میلی‌متر ۲/۳ درصد است. ولی با افزایش نسبت ترکیب میلگرد به مقدار ۰/۱، مقادیر فوق به ۳۳/۴ میلی‌متر و ۱/۱ درصد کاهش می‌یابند. در ادامه برای نسبت ترکیب ۰/۲، مقادیر مطلق و نسبی تغییر مکان پسماند به ترتیب برابر با ۱۷/۶ میلی‌متر و ۰/۶ درصد شده و برای نسبت‌های ترکیب بیشتر از ۰/۳ این مقادیر در حد ۹/۸ میلی‌متر و ۰/۳ درصد ثابت باقی می‌مانند. بر این اساس، افزایش نسبت ترکیب از حد ۰/۳ فقط افزایش مقاومت عضو را در پی داشته و تغییر چندانی در تغییر مکان پسماند نخواهد داشت. لذا نسبت مطلوب بدست آمده برای نسبت ترکیب در محدوده بین ۰/۳ و ۰/۴ با لحاظ کردن همزمان معیارهای بازیابی تغییر مکان، مقاومت و انرژی خواهد بود.

جدول ۴: مقادیر مطلق و نسبی تغییر مکان پسماند برای تغییر مکان جانبی نسبی ۳/۳ درصد

1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	$r_h$
9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	17.6	33.4	68.6	$\Delta_{res}$
0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.6%	1.1%	2.3%	$\delta_{res}$

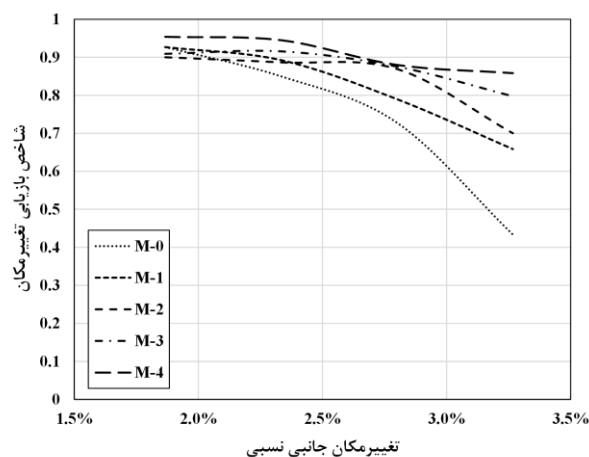


شکل ۶: رفتار تک‌چرخه مدل‌های پارامتریک در تغییر مکان جانبی نسبی ۳/۳ درصد

در ادامه می‌توان مقدار بازیابی تغییر مکان در هر چرخه را برای هر تغییر مکان جانبی نسبی محاسبه کرد. به این منظور از شاخص بازیابی به صورت  $1 - \delta_{res} / \delta_{max}$  استفاده شده که در این رابطه  $\delta_{max}$  مقدار تغییر مکان حداکثر در چرخه مدنظر است. بدیهی است که بالابودن این شاخص نشانگر قابلیت مدل در بازیابی تغییر مکان به ازای تغییر مکان‌های فراتر از سطح ایمنی جانی است. مقادیر شاخص بازیابی در شکل ۷ برای تغییر مکان‌های جانبی نسبی ۱/۹ درصد و بالاتر ترسیم شده است. با توجه به شکل، مدل پایه با نسبت ترکیب صفر و مدل M-5 با نسبت ترکیب ۰/۴ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین کاهش شاخص بازیابی همراه با افزایش تغییر مکان جانبی نسبی است. استفاده از میلگرد فولادی تنها در عضو مرزی منجر به کاهش نسبت بازیابی تا حد ۴۳ درصد می‌شود ولی با استفاده از میلگردهای فولادی و کامپوزیتی با نسبت ترکیب ۰/۴ باعث تأمین شاخص بازیابی تا حد ۸۶ درصد می‌شود. نکته قابل توجه تقریباً ثابت باقی ماندن شاخص

27 recovery

بازیابی برای نسبت‌های ترکیب بالاتر از مقدار ۰/۴ است. لذا می‌توان توجیه استفاده از میلگردگذاری ترکیبی فولادی - کامپوزیتی را به صورت ثابت نگذاشتن شاخص بازیابی برای سطوح عملکرد لرزه‌ای بالاتر ارائه داد که نشانگر کاهش سطح خرابی و انتقال سطح عملکرد ایمنی جانی به مقادیر بالای تغییرمکان جانبی نسبی است.



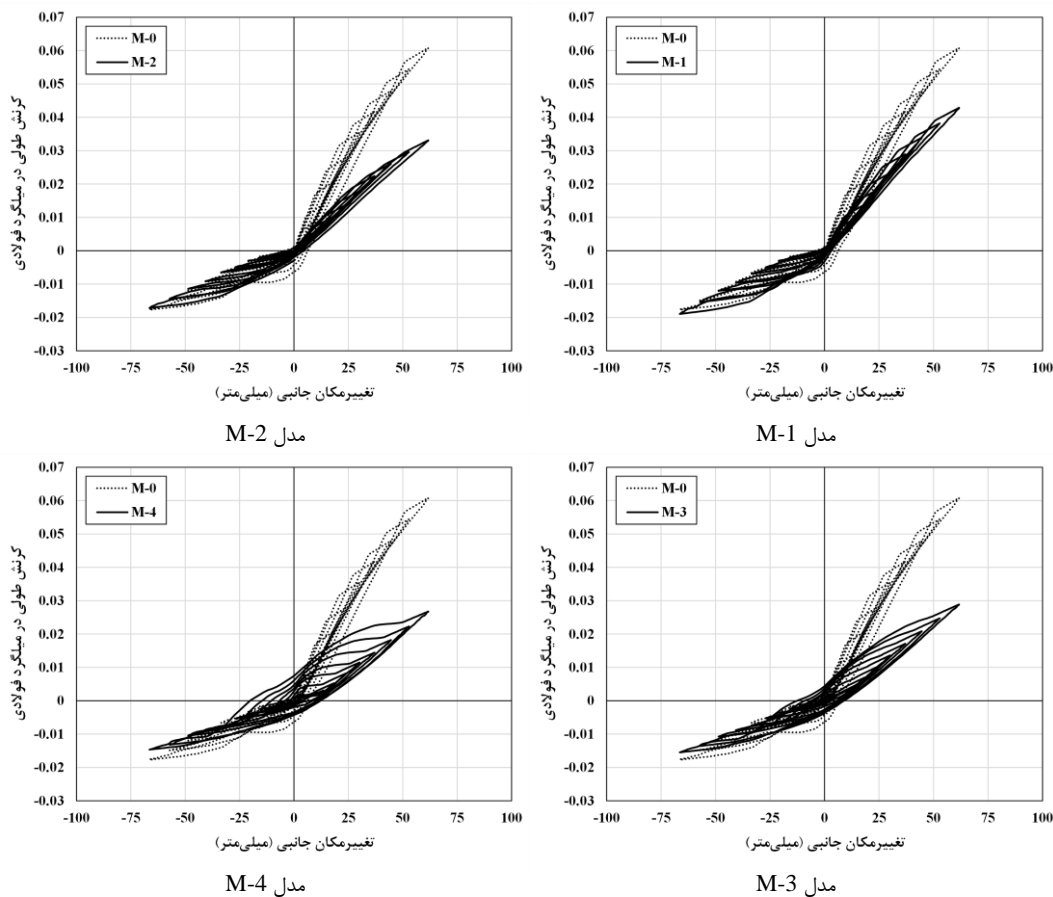
شکل ۷: تغییرات شاخص بازیابی تغییرمکان برای مدل‌های دارای میلگردگذاری ترکیبی

## ۲-۴- تقاضای کرنشی در عناصر مرزی

مهمترین معیار در سنجش عملکرد میلگردهای ترکیبی فولادی - کامپوزیتی، تغییر تقاضای کرنشی این مصالح در عناصر مرزی بوده که در بخش حاضر ارائه شده است. برای این هدف، تغییرات کرنش میلگردهای فولادی برحسب تغییرمکان جانبی دیوار برشی در شکل ۸ نشان داده شده است. کرنش میلگرد فولادی در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری از پای دیوار قرائت و به صورت متوسط در طول المان میلگرد محاسبه شده است. به توجه به اشکال، مشارکت بتن در فاز فشاری باعث کاهش کرنش در میلگرد شده ولی در فاز کششی به دلیل ترک خوردگی بتن عملاً مقادیر کرنش به شدت افزایش می‌یابند. ولی با اضافه کردن میلگردهای کامپوزیتی به عناصر مرزی، رفتار نامتقارن کرنشی در فازهای کششی و فشاری به صورت متقارن تبدیل شده و حداکثر کرنش فولاد محدود می‌شود. حداکثر کرنش کششی ( $\epsilon_t$ ) و کرنش فشاری ( $\epsilon_c$ ) در جدول ۵ ذکر شده است.

حداکثر کرنش در میلگرد فولادی برای مدل پایه برابر با ۶/۱ درصد بدست آمده که بسیار نزدیک به کرنش حد گسیختگی است. ولی با اضافه کردن میلگردهای کامپوزیتی، این کرنش حداکثر کاهش یافته در حد ۲/۶ درصد برای نسبت‌های ترکیب بیشتر از ۰/۴ پایدار می‌شود. شایان ذکر است که علیرغم اضافه شدن میلگردهای کامپوزیتی، میلگرد فولادی دچار تسلیم شده و می‌تواند شکل‌پذیری قابل قبولی برای عبور دیوار برشی تأمین کند. حداکثر کرنش فشاری میلگرد نیز ۱/۹- درصد بوده که فراتر از حد تسلیم و کمانش است. لذا میلگردهای فولادی تحت فشاری نیز به راحتی تسلیم شده و به دلیل فاصله کم خاموت‌های برشی دچار کمانش نمی‌شوند. ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی از سطح کرنش فشاری فولاد نیز کاسته و تسلیم آن را در کرنش‌های کمتری فراهم می‌کند. نکته قابل توجه وقوع بازشدگی یا انبساط در چرخ‌های کرنش میلگرد بوده که برای نسبت‌های ترکیب ۰/۳ و ۰/۴ رخ داده است. این پدیده نشانگر قابلیت میلگرد فولادی در تحمل کرنش و افزایش سطح کرنش پلاستیک آن تحت بارگذاری چرخه‌ای است و به عبارتی یکنواختی تغییرات زمانی کرنش را بیان می‌کند. این پدیده برای نسبت‌های ترکیب کم ناچیز بوده ولی با افزایش سطح مقطع میلگردهای کامپوزیتی بیشتر مشهود می‌شود. برای مثال در مدل M-0 با تبدیل تغییرمکان جانبی از فاز منفی به فاز مثبت، کرنش فولاد به صفر رسیده و دوباره از صفر شروع به افزایش می‌کند. ولی برای مدل M-4، کرنش فولاد حین تغییر علامت تغییرمکان در چرخه‌های آخر تقریباً ثابت باقی‌مانده و رشد ناچیزی دارد. میلگرد فولادی هنگام ترکیب با میلگرد کامپوزیتی می‌تواند رشد کرنش یکنواخت‌تری نسبت به حالت پایه داشته و مشارکت مطلوبی در مکانیزم باربری دیوار برشی داشته باشد. این یکنواخت‌سازی رشد زمانی کرنش همزمان با کاهش سطح کرنش فولاد رخ داده و

نشانگر قابلیت ترکیب فولاد و کامپوزیت در کنترل تقاضای کرنشی عناصر مرزی است. در ادامه می‌توان توزیع کرنش میلگردهای فولادی و کامپوزیتی در ارتفاع عضو مرزی برای حالات تحلیل شده مورد بررسی قرار داد. شکل ۹ توزیع کرنش در میلگردهای فولادی و کامپوزیتی را ارتفاع دیوار در تغییر مکان جانبی نسبی ۱/۹ درصد نشان می‌دهد.



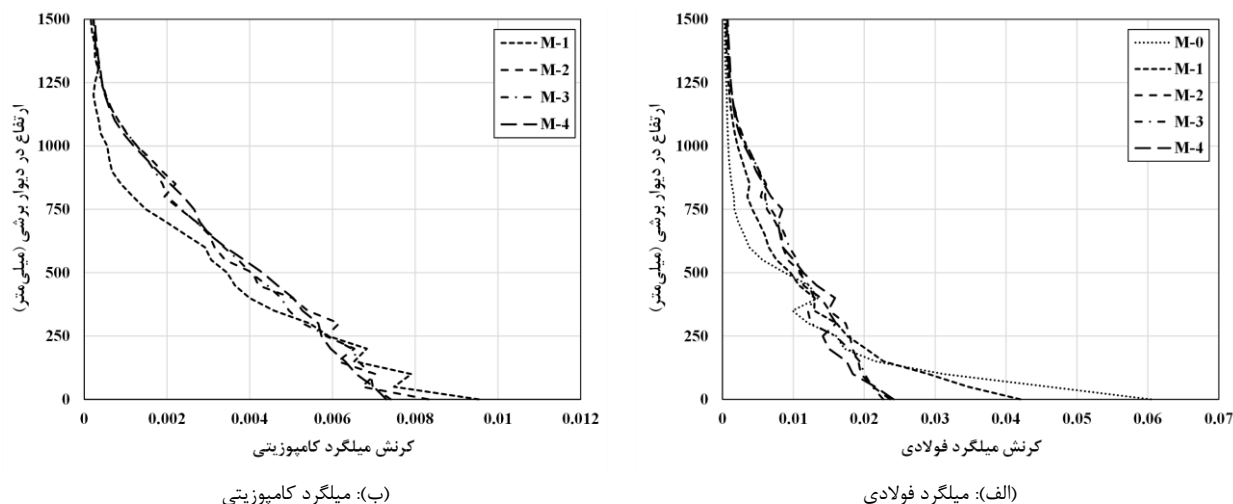
شکل ۸: کرنش طولی میلگرد فولادی در وجه خارجی عضو مرزی

جدول ۵: کرنش‌های کششی و فشاری حداکثر در میلگرد فولادی

$r_h$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\epsilon_t$	6.1%	4.3%	3.3%	2.9%	2.7%	2.6%	2.6%	2.6%	2.6%	2.6%	2.6%
$\epsilon_c$	-1.9%	-1.8%	-1.7%	-1.5%	-1.5%	-1.5%	-1.5%	-1.5%	-1.5%	-1.5%	-1.5%

مدل پایه دارای تمرکز کرنش در ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متری از پای دیوار بوده و نرخ تغییرات شدیدی در ارتفاع دیوار دارد. همچنین ناحیه مؤثر کرنشی فولاد در مدل پایه به ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر بوده که نصف طول دیوار برشی است. در مقابل با افزودن میلگردهای کامپوزیتی و ترکیب آنها با میلگردهای فولادی، حداکثر کرنش فولاد و نرخ تغییرات آن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. توزیع کرنش فولاد در ارتفاع دیوار برای نسبت‌های ترکیب بین ۰/۲ و ۰/۴ پایدار شده و تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین ناحیه مؤثر کرنشی فولاد تا حد ۱ متر (۸۰ درصد طول دیوار) افزایش می‌یابد که نشانگر توزیع تسلیم‌شدگی فولاد در ناحیه وسیع‌تری از عضو است. نرخ تغییرات کرنش فولاد برای بازه نسبت ترکیب ذکر شده خطی و فاقد تمرکز است. توزیع کرنش میلگرد کامپوزیتی نشانگر غیرخطی بودن آن برای نسبت ترکیب ۰/۲ و خطی بودن آن برای نسبت‌های ترکیب بین ۰/۳ الی ۰/۴ است. بر این اساس حاکمیت اثر غیرخطی میلگرد فولادی برای نسبت ترکیب کم نمایان بوده و با افزایش نسبت ترکیب از اثر آن به شدت کاسته می‌شود. محدوده کرنش حداکثر میلگرد کامپوزیتی بین ۰/۹ و

۰/۷ درصد بدست آمده است. لذا میلگرد کامپوزیتی حتی با حداقل نسبت ترکیب دچار پارگی نشده و پایداری خود را حفظ کرده است. ناحیه مؤثر کرنشی میلگرد کامپوزیتی به اندازه ۱/۲ متر از پای دیوار محاسبه شده است. دلیل اختلاف در نواحی مؤثر کرنشی، تفاوت در رفتار مقاومتی و اثر اندازه بتن بوده که به وضوح در توزیع کرنش میلگردها دیده می‌شود.



شکل ۹: توزیع کرنش در میلگرد برای مدل‌های دارای میلگردگذاری ترکیبی

## ۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

تحقیق حاضر به بررسی اثر ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی در کنترل تقاضای کرنشی اعضای مرزی دیوارهای برشی با استفاده از روش المان محدود پرداخته است. نخست مدل ریاضی یک مطالعه آزمایشگاهی مرجع ارائه شده و صحت‌سنجی شده است. سپس پارامتر نسبت ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی به صورت متغیر بین صفر و یک ارائه شده که مقدار صفر متناظر با میلگردگذاری فولادی و مقدار یک میلگردگذاری کامپوزیتی است. تحلیل‌های غیرخطی شبه‌استاتیکی چرخه‌ای تا حد تغییرمکان نسبی ۳/۳ درصد برای یازده مدل المان محدود انجام شده و مقادیر نیروی حداکثر، سختی سکانتی، انرژی تک‌چرخه، شاخص بازیابی تغییرمکان و کرنش میلگردها محاسبه شده‌اند. براساس تحلیل‌های انجام شده، نتایج زیر به صورت خلاصه ارائه شده‌اند:

۱. ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی را اصلاح کرده و اثراتی همچون کاهش تغییرشکل پسماند، حفظ مقاومت عضو بعد از تسلیم و افزایش سختی سکانتی در تغییرمکانهای جانبی بالا را دارد. دیوارهای دارای میلگردگذاری ترکیبی دارای رفتار مرکزگرایی بوده و قابلیت بازگشت تغییرمکان جانبی را بعد از قطع نیرو دارند.
۲. اگرچه دیوار پایه با میلگرد فولادی در تغییرمکان جانبی نسبی ۳/۳ درصد ناپایدار شده و فرومی‌ریزد، ترکیب میلگردگذاری با نسبت ترکیب بیشتر از ۰/۲ منجر به تأمین مقاومت و حفظ پایداری دیوار می‌شود. انرژی تک‌چرخه نیز برای نسبت ترکیب ۰/۴ پایدار شده و سطح خرابی را حداقل می‌کند.
۳. افزایش نسبت ترکیب از حد ۰/۳ صرفاً افزایش مقاومت عضو را در پی داشته و تغییر چندانی در تغییرمکان پسماند نخواهد داشت. بنابراین نسبت مطلوب بدست‌آمده برای نسبت ترکیب در محدوده ۰/۳ الی ۰/۴ با لحاظ کردن همزمان معیارهای بازیابی تغییرمکان، مقاومت و انرژی خواهد بود.
۴. برای دیوارهای با نسبت ترکیب میلگرد کم، منحنی‌های چرخه‌ای کرنش - تغییرمکان نامتقارن بوده ولی با اضافه‌کردن میلگردهای کامپوزیتی به عناصر مرزی، رفتار متقارن شده و حداکثر کرنش فولاد با نسبت کاهش ۴۴ درصدی محدود می‌شود. ترکیب میلگردهای فولادی و کامپوزیتی از سطح کرنش فشاری فولاد نیز کاسته و تسلیم آن را در کرنش‌های کمتری فراهم می‌کند.

۵. بازشدگی یا انبساطی در چرخه‌های کرنش میلگرد فولادی به وجود آمده که برای نسبت‌های ترکیب کم ناچیز بوده و با افزایش سطح مقطع میلگردهای کامپوزیتی بیشتر مشهود می‌شود. این پدیده قابلیت میلگرد فولادی را در تحمل کرنش و افزایش سطح کرنش پلاستیک به شرط استفاده همزمان آن با میلگرد کامپوزیتی را نشان می‌دهد.
۶. ناحیه مؤثر کرنشی فولاد در مدل پایه برابر با نصف طول دیوار برشی بوده ولی با افزودن میلگردهای کامپوزیتی این ناحیه تا حد ۸۰ درصد طول دیوار افزایش یافته که نشانگر توزیع تسلیم‌شدگی فولاد در ناحیه وسیعتری از عضو به شرط ترکیب آن با کامپوزیت است.

## مراجع

- [1] Mohamed, N. A. A. R. (2013). *Strength and drift capacity of GFRP-reinforced concrete shear walls* (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke).
- [2] Hassanpour, S., Khaloo, A., Aliasghar-Mamaghani, M., & Khaloo, H. (2022). Effect of Compressive Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars on Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 119(6).
- [3] Aliasghar-Mamaghani, M., & Khaloo, A. (2021). Effective flexural stiffness of beams reinforced with FRP bars in reinforced concrete moment frames. *Journal of Composites for Construction*, 25(1), 04020083.
- [4] Zhao, Q., Zhao, J., Dang, J. T., Chen, J. W., & Shen, F. Q. (2019). Experimental investigation of shear walls using carbon fiber reinforced polymer bars under cyclic lateral loading. *Engineering Structures*, 191, 82-91.
- [5] Cardenas, A. E., Hanson, J. M., Corley, W. G., & Hognestad, E. (1973). Design provisions for shear walls. *ACI Journal*, 70(3), 221-230.
- [6] Ren, F., Chen, J., Chen, G., Guo, Y., & Jiang, T. (2018). Seismic behavior of composite shear walls incorporating concrete-filled steel and FRP tubes as boundary elements. *Engineering Structures*, 168, 405-419.
- [7] Husain, M., Eisa, A. S., & Hegazy, M. M. (2019). Strengthening of reinforced concrete shear walls with openings using carbon fiber-reinforced polymers. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11(2), 129-150.
- [8] Zinov'ev, P. A., Smerdov, A. A., & Kulish, G. G. (2003). Experimental investigation of elasto-dissipative characteristics of carbon-fiber-reinforced plastics. *Mechanics of composite materials*, 39(5), 393-398.
- [9] Liang, X., Ma, K., Li, F., Deng, M., & Zhang, X. (2011). Experimental study on seismic behavior of SHSC structural walls. *Jianzhu Jiegou Xuebao (Journal of Building Structures)*, 32(6), 68-75.
- [10] Lan-hui, G. U. O., Xin-bo, M. A., & Su-mei, Z. H. A. N. G. (2012). Experimental research on steel plate shear wall with slits. *工程力学*, 29(3), 133-142.
- [11] Li, H. N., Tang, Y. C., Li, C., & Wang, L. M. (2019). Experimental and numerical investigations on seismic behavior of hybrid braced precast concrete shear walls. *Engineering Structures*, 198, 109560.
- [12] Ye, L. P., & Lu, X. Z. (2008). Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake. *J. Journal of Building Structures*, 29(4), 1-9.
- [13] Jun, Z., Qi, Z., Juntao, D., & Lingxin, Z. (2017). Experimental study of deformation behavior of shear wall reinforced with CFRP bar and steel bars. *Industrial Construction*, 01.
- [14] Zhao, Q., Zhao, J., Dang, J. T., Chen, J. W., & Shen, F. Q. (2019). Experimental investigation of shear walls using carbon fiber reinforced polymer bars under cyclic lateral loading. *Engineering Structures*, 191, 82-91.
- [15] Ghazizadeh, S., Cruz-Noguez, C. A., & Talaei, F. (2018). Analytical model for hybrid FRP-steel reinforced shear walls. *Engineering Structures*, 156, 556-566.
- [16] Ghazizadeh, S., & Cruz-Noguez, C. A. (2018). Damage-resistant reinforced concrete low-rise walls with hybrid GFRP-steel reinforcement and steel fibers. *Journal of Composites for Construction*, 22(2), 04018002.
- [17] American Concrete Institute (ACI). (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (318R-14). In *ACI 318-14/318R-14*. American Concrete Institute Farmington Hills, MI, USA.
- [18] Wong, P. S., Vecchio, F. J., & Trommels, H. (2013). Vector2 & Formworks user's manual second edition. *University of Toronto, Canada*.
- [19] Comité Euro-International du Béton. (1993). *CEB-FIP model code 1990: Design code*. Thomas Telford Publishing.
- [20] Eligehausen, R., Mallée, R., & Silva, J. F. (2006). *Anchorage in concrete construction* (Vol. 10). John Wiley & Sons.
- [21] Hosseini S.M., Yekrangnia M., Vatani Oskouei A., (2022), "Effect of spiral transverse bars on structural behavior of concrete shear walls reinforced with GFRP bars", *Journal of Building Engineering*, 55, 104706