

P. Sartaji*

Department of Civil
Engineering, Ardabil Branch,
Islamic Azad University,
Ardabil, Iran.

e-mail: p.sartaji@iauardabil.ac.ir

A. Sarvghad Moghadam

Structural Engineering
Research Centre, International
Institute of Earthquake
Engineering and Seismology,
Tehran.

e-mail: moghadam@iiees.as.ir

Large and Small-Scale Modeling of Squat Shear Walls to Simulate Cyclic Behavior

Reinforced concrete squat walls with an aspect ratio less than 2 are prevalent in low-rise construction and at lower levels of tall buildings or nuclear power plants. They show a significant amount of shear deformation as compared to bending deformation. Shear strength governs the design of such walls. Prediction of seismic behavior, and followed by the design of these systems need an efficient modeling method. this study calibrates the effective modeling parameters of squat shear walls in small and large scales based on the test results. The modeling to be accomplished initially with non-linear finite element software on small scale (Vector2) and then with software by large scaleability (OpenSees), and the results were calibrated with test results. The study results show nonlinear finite element software has high accuracy in squat shear wall modeling. However, if a large-scale squat shear wall modeling along with a three-dimensional structure is required, on condition of a suitable aspect ratio, this paper is recommended to use OpenSees software.

Keywords: squat shear wall, modeling in small scale, modeling in large scale, nonlinear finite element.

* Corresponding author

Received 04 January 2019, Revised 28 August 2019, Accepted 30 August 2019.

DOI: 10.22091/cer.2019.3946.1138

مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در دو مقیاس کوچک و بزرگ برای شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای آن‌ها

دیوارهای برشی بتنی مسلح کوتاه با نسبت ارتفاع به طول کوچک‌تر از ۲، در ساختمان‌های کوتاه یا در طبقات پایین ساختمان‌های بلند یا در نیروگاه‌های هسته‌ای رایج‌اند. دیوارها با این تناسب هندسی، تغییرشکل برشی زیادی در مقایسه با تغییرشکل خمشی دارند. لذا در طراحی این دیوارها معمولاً مقاومت برشی حاکم خواهد بود. به‌همین ترتیب، پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای و به دنبال آن، دستیابی به طراحی این سازه نیاز به یک مدل‌سازی صحیح، کارا و جامع دارد که بتواند رفتار مشابه با واقعیت را از خود نشان دهد. در این تحقیق، پارامترهای تأثیرگذار در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه تحت بارهای جانبی در دو مقیاس کوچک و بزرگ براساس نتایج آزمایشات، راستی‌آزمایی و معرفی شده است. ابتدا مدل‌سازی با استفاده از یک نرم‌افزار اجزای محدود غیرخطی در مقیاس کوچک (نرم‌افزار Vector2) و سپس مدل‌سازی با نرم‌افزار کاربردی دیگری با توانمندی مدل‌سازی با مقیاس بزرگ (اپنسیس) صورت گرفته است. در نهایت، نتایج حاصل از این دو نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شده است. نتایج حاصل از بررسی‌های این مقاله نشان می‌دهد که نرم‌افزار اجزای محدود غیرخطی Vector2 دارای دقت بالایی در مدل‌سازی پاسخ دیوارهای برشی کوتاه می‌باشد؛ ولی در صورتی که نیاز به مدل‌سازی دیوار برشی کوتاه در مقیاس بزرگ و در کنار یک سازه سه‌بعدی باشد، به شرط نسبت هندسی مناسب ارتفاع به طول دیوار، توصیه به استفاده از نرم‌افزار اپنسیس می‌شود.

واژگان کلیدی: دیوارهای برشی کوتاه، مدل‌سازی با مقیاس کوچک، مدل‌سازی با مقیاس بزرگ، اجزای محدود غیرخطی.

پریرسا سرتاجی*

استادیار، گروه عمران، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

پست الکترونیک:

p.sartaji@iauardabil.ac.ir

عبدالرضا سروقد مقدم

دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

پست الکترونیک:

moghadam@iiees.as.ir

۱- مقدمه

اخیر صورت گرفته روی دیوارهای برشی نشان می‌دهد که در پاسخ غیرخطی آنها عوامل مختلفی دخالت دارد [۱-۴]. تعدادی از این عوامل عبارت‌اند از ابعاد دیوار و نسبت ارتفاع به طول آن، سطح نیروی محوری اعمالی بر آن (اندرکنش نیروی محوری-خمشی)، میزان آرماتور دیوار و چسبندگی مابین بتن و آرماتور، نسبت ظرفیت خمشی دیوار به ظرفیت برشی آن، صلبیت پی و فصل مشترک دیوار و فونداسیون آن، حرکت گهواره‌ای دیوار به واسطه لغزش آرماتور قائم در پی (چرخش جسم صلب)، ابعاد و آرماتور اعضای مرزی دیوار در صورت وجود، اثر عضوهای

رفتار دیوارهای برشی تحت اثر ترکیب تغییرشکل‌های خمشی، برشی و محوری قرار دارد. دیوارهای با ارتفاع متوسط تا بلند اکثراً دارای رفتار خمشی می‌باشند، در حالی که دیوارهای کوتاه اکثراً بوسیله تغییرشکل‌های برشی کنترل می‌شوند. نتایج آزمایشات

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۴، بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۸.
(DOI): 10.22091/cer.2019.3946.1138 شناسه دیجیتال

دیوارهای برشی گاردن هتل^۴ در گوانگژو^۵ را به‌منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای و اصلاح عملکرد سازه‌های دارای دیوار برشی، تحت آزمایش بارگذاری چرخه‌ای کم قرار دادند. سپس به تحلیل عددی آزمایشات بار چرخه‌ای دیوارهای برشی با برنامه تحلیل غیرخطی دیوارهای برشی (SWNA^۶) که توسعه ثانویه‌ای در نرم‌افزار اپنسیس^۷ است، پرداختند. مقایسه نتایج عددی با آزمایشات، دقت این روش تحلیل را در نشان دادن رفتار غیرخطی دیوار برشی، مانند انتقال محورخشی، تغییرشکل برشی، فروریختگی موضعی و مکانیسم خرابی تأیید کرد [۷].

محمدی‌دارانی و سروقد مقدم، به نحوه مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در دو نرم‌افزار سپ^۸ و پرفورم تری دی^۹ پرداختند. برای این منظور از پنج نمونه آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی برای راستی‌آزمایی نرم‌افزارها استفاده کرده و نحوه مدل‌سازی و اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در این نرم‌افزارها را ارائه نمودند [۸].

محققان در تحقیقی به بررسی اثر آرایش میلگرد بر عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی کوتاه پرداختند. در این مقاله رفتار دیوارهای برشی کوتاه بتن آرمه، به کمک برنامه اجزای محدود غیرخطی ATENA 3D مورد بررسی قرار گرفته و ضمن ارزیابی نوع گسیختگی، مقاومت برشی نهایی و مقاومت پسماند، تأثیر پارامترهایی نظیر تمرکز میلگردهای طولی و عرضی در لبه دیوار، استفاده از میلگردهای قطری و تغییر فواصل میلگردهای افقی و قائم، بر روی رفتار دیوارهای برشی کوتاه مطالعه شده است. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که برخلاف دیوارهای بلند، تمرکز میلگردها در لبه دیوار راه حل مناسبی برای افزایش شکل‌پذیری نمی‌باشد [۹].

سازه‌های متصل به دیوار (مانند تیرهای هم‌بسته، قاب خمشی، و غیره). بنابراین، در مدل‌سازی دیوارهای برشی بتن مسلح به منظور شبیه‌سازی درست رفتار آن، باید اثر عوامل فوق، به‌ویژه اندرکنش نیروی محوری-خمشی و شرایط مرزی دیوار منظور گردد. مدل تحلیلی باید قادر به تخمین ظرفیت دیوار تحت بار جانبی یکنوا و رفتار آن تحت بارگذاری چرخه‌ای رفت و برگشتی باشد. مدل عددی ایده‌آل باید همچنین قادر باشد پدیده‌های دیگر نظیر ترک‌خوردگی بتن، سخت‌شدگی کششی، باز و بسته شدن ترک‌ها با اصلاح سختی، کاهش مقاومت در بارگذاری چرخه‌ای، اثر محصورشدگی در فشار و غیره را نشان دهد. اغلب یک یا چند مورد از این عوامل به منظور ساده‌سازی در مدل‌های تحلیلی، صرف‌نظر شده است. با این فرض که این عوامل اثر مهمی در افزایش دقت مدل در شبیه‌سازی رفتار متفاوت دیوارهای بتنی مسلح نخواهد داشت [۵]. پیش‌بینی رفتار این دیوارها تحت بارهای جانبی نیازمند ابزارهای عددی راستی‌آزمایی شده به وسیله آزمایشات تجربی می‌باشد. این ابزارها در محاسبات، باید اکثر پارامترهای مهم که می‌توانند در پاسخ دیوارهای بتن مسلح اثر بگذارند را در نظر بگیرند.

گولس و ویتاکر^۱، از نرم‌افزار اجزای محدود اباکوس^۲ و Vector2 برای مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه استفاده نمودند. این دو برنامه برای پیش‌بینی پاسخ یکنواخت و چرخه‌ای دیوارهای کوتاه مورد استفاده قرار گرفته است. هر برنامه دارای رویکرد متفاوتی در شبیه‌سازی رفتار بتن مسلح می‌باشد. در این تحقیق، روش‌های مدل‌سازی برای پیش‌بینی پاسخ بحرانی دیوارهای برشی کوتاه بررسی شده و پیشنهاداتی برای تحلیل‌های اجزای محدود ارائه شد [۶].

ایکسیاولی^۳ و همکاران، ۱۲ نمونه دیوار برشی با نسبت آرماتور متفاوت و مطابق با جزییات سازه‌ای

4- Garden Hotel

5- Guangzhou

6- Shear Wall Nonlinear Analysis

7- OpenSees

8- SAP 2000

9- PERFORM 3D

1- Gulec and Whittaker

2- Abaqus

3- Xiaolei

تهرانی‌زاده و عزیززاده، به معرفی روش‌های کاربردی مدل‌سازی غیرخطی دیوارهای برشی بتنی در نرم‌افزارهای پرفورم تری دی، سپ و ایتبس پرداختند. پژوهشگران با انجام تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی در حالت‌های مختلف مدل‌سازی، مقایسه‌ای بر روی نتایج حاصل انجام دادند. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که در نرم‌افزارهایی مانند سپ و ایتبس محدودیت‌هایی در مدل‌سازی غیرخطی دیوارها به‌ویژه در زمینه عملکرد دیوارهای متصل و عمود برهم و عملکرد دال و دیوار در سیستم‌های فاقد تیر و ستون وجود دارد. با توجه به پیچیده و زمان‌بر بودن مدل‌های دقیق اجزای محدود، استفاده از مدل‌های الیافی موجود در نرم‌افزار پرفورم تری دی نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی را پیشنهاد دادند [۱۳].

سقایان و ناطقی‌الهی، به بررسی دقت مدل‌های تحلیلی موجود در پیش‌بینی پاسخ غیرخطی دیوارها پرداختند. در این بررسی، مدل‌ها در ابتدا با نرم‌افزار غیرخطی اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شد و سپس با سه روش ستون معادل، معادل‌سازی با خرپا در نرم‌افزار سپ و استفاده از عضوهای الیافی در نرم‌افزار پرفورم تری دی مقایسه شد. نتایج نشان داد که در شبیه‌سازی نمودارهای برش پایه- تغییرمکان و برش پایه طبقات در تغییرمکان هدف، روش مدل‌سازی دیوار برشی با عضوهای الیافی در مقایسه با سایر روش‌ها، رفتار دیوار برشی را شبیه‌تر به روش اجزای محدود پیش‌بینی می‌کند. روش معادل‌سازی با خرپا در مقایسه با روش ستون معادل دقیق‌تر بود؛ زیرا در این روش عضو مهاربند، رفتار برشی دیوار را شبیه‌سازی می‌کند و نسبت به روش ستون معادل که در آن، رفتار برشی دیوار توسط عضو شبیه‌سازی نمی‌شود، دقیق‌تر است. روش ستون معادل تغییرمکان جانبی نسبی طبقات در تغییرمکان هدف را شبیه‌تر به روش اجزای محدود پیش‌بینی می‌کند. در هر سه روش

غنی‌زاده و همکاران، به بررسی تأثیر بار محوری و مشخصات مصالح بر عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی کوتاه پرداختند. در این مقاله، رفتار دیوار برشی کوتاه با کمک برنامه اجزای محدود ATENA 3D مورد تحلیل قرار گرفته و به بررسی نوع گسیختگی، مقاومت برشی نهایی، مقاومت پسماند و اثر عواملی چون بار محوری و مشخصات مصالح بر رفتار دیوارهای برشی کوتاه پرداخته شده است. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که بار محوری اثر قابل توجهی بر رفتار شکل‌پذیر دیوارهای برشی کوتاه و مد گسیختگی آن‌ها دارد [۱۰].

پژوهشگران، در تحقیقی به بررسی اثر بازشو بر رفتار دیوارهای برشی کوتاه پرداخته و با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود، تأثیر بازشو بر رفتار دیوار و تغییر حالت دیوار به قاب را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی از نرم‌افزار اجزای محدود VecTor2 برای مدل‌سازی استفاده شد. آن‌ها به‌منظور کنترل دقت نرم‌افزار، از نمونه دیوار SW13 که توسط لفاس^{۱۰} و همکاران در سال ۱۹۹۰ تحت آزمایش‌های استاتیکی افزایش یافته قرار گرفته بود، استفاده نمودند [۱۱].

گروهی دیگر از محققان، به شرح و مقایسه قابلیت‌های دو روش مدل‌سازی دیوارهای برشی سه‌بعدی شامل مدل‌های با مقیاس کوچک و مدل‌های با مقیاس بزرگ پرداختند. در بررسی قابلیت مدل‌سازی با مقیاس کوچک از نرم‌افزار آباکوس و مدل‌های با مقیاس بزرگ از نرم‌افزار اپنسیس استفاده شد. نتایج حاصل از بررسی نشان داد که در یک سری از دیوارها که نسبت ارتفاع به طول برابر ۰/۷ و رفتار دیوار به صورت برشی بوده است، مدل‌های الیافی^{۱۱} موجود در نرم‌افزار اپنسیس برای این نوع دیوارها دارای نقص بوده و نتایج مدل‌سازی اجزای محدود تطابق مناسبی با واقعیت داشته است [۱۲].

^{۱۰}- Lefas

^{۱۱}- Fiber

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی راستی‌آزمایی شده و پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی ارائه شده است.

۲- مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در مطالعه آزمایشگاهی

نمونه‌های مورد بررسی دو نمونه U1 و U1.5 از آزمایشات کونگ و هو می‌باشد [۲]. مشخصات و جزئیات نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

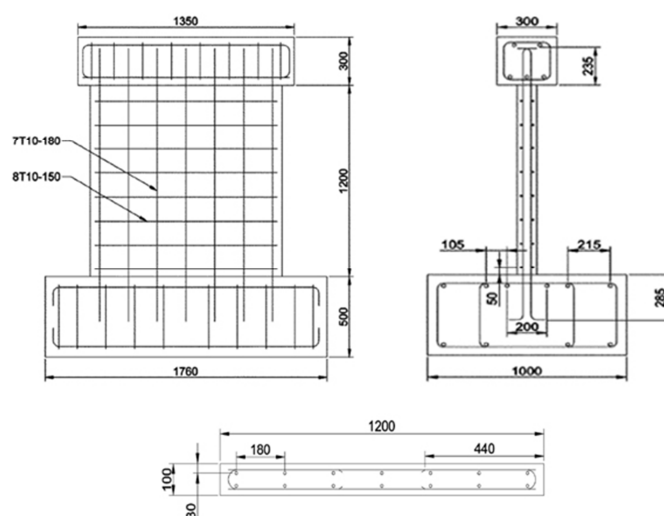
نمونه‌ها دارای سطح مقطع مستطیلی به ابعاد ۱۲۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. ارتفاع نمونه‌ها، در نمونه U1، ۱۲۰۰ و در نمونه U1.5، ۱۸۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در نتیجه، نمونه‌ها دارای نسبت ارتفاع به طول ۱ و ۱/۵ می‌باشند. مقاومت فشاری بتن در نمونه U1، ۳۰/۴، در نمونه U1.5، ۳۴/۹ و مقاومت تسلیم فولاد در تمام نمونه‌ها ۵۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. سطح مقطع، ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

معادل‌سازی محدوده خرابی درست پیش‌بینی شده است [۱۴].

در اکثر کارهای انجام یافته در مدل‌سازی دیوارهای برشی، مدل‌سازی اکثراً بر روی دیوارهای بلند صورت گرفته و به نحوه مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه که دارای رفتار برشی می‌باشند، کمتر توجه شده است. در این کار، ضمن استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود دقیق با توان مدل‌سازی در مقیاس کوچک، سعی شده است از نرم‌افزار دیگری با توانایی مدل‌سازی در مقیاس بزرگ که اندرکنش پاسخ‌های خمشی و برشی دیوارهای برشی کوتاه را لحاظ کند، پرداخته شود. به این منظور نرم‌افزار اپنسیس بکار برده شده و تلاش شده است تا پارامترهای کلیدی در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه با راستی‌آزمایی توسط نتایج آزمایشات ارائه شود. در نهایت، راهکارهای اساسی برای تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی دیوارهای برشی کوتاه ارائه گردد. برای این منظور، از نمونه‌های ارائه شده در آزمایشات کوانگ و هو استفاده شده است [۲]. مدل‌های تهیه شده در دو نرم‌افزار

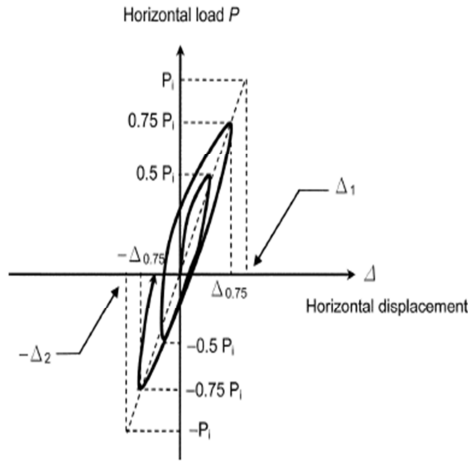
جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها [۲]

نمونه	نسبت ارتفاع به طول	محصورشدگی عضوهای مرزی	f'_c بتن (MPa)	آرماتور طولی (ρ_s %)	آرماتور عرضی (ρ_v %)
U1.0	۱	ندارد	۳۰/۴	۰/۹۲	۱/۰۵
U1.5	۱/۵	ندارد	۳۴/۹	۰/۹۲	۱/۰۵



شکل ۱- سطح مقطع، ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری نمونه U1 و U1.5 [۲]

همچنین، جابه‌جایی تسلیم، ضریب شکل‌پذیری جابه‌جایی و ظرفیت اتلاف انرژی نرمال شده نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- تاریخچه بارگذاری اعمالی [۲]

با توجه به جدول ۲، مشاهده می‌شود که در هر دو نمونه، حداکثر بار گسیختگی تجربی نمونه‌ها، P_{max} بسیار کمتر از مقاومت برشی تئوری V_u است و این نشان می‌دهد که در مقاومت نمونه‌ها، عموماً مود خمشی حاکم بوده است. در شکل ۳، حلقه‌های هیستریک حاصل از آزمایش نمونه‌های U1 و U1.5 نشان داده شده است.

در این آزمایش، نمونه‌ها بر روی کف صلب نصب شده‌اند. بار قائم در ابتدا بر تیر بالای دیوار به وسیله جک هیدرولیکی وارد می‌شود. بار جانبی به صورت رفت و برگشتی به وسیله یک محرک کمکی بر تیر بالای دیوار وارد شده است. یک چرخه بارگذاری افقی تا $\pm 0.5P_i$ و سپس تا $\pm 0.75P_i$ اعمال شده است، که بار P_i بار وارد شده در انتهای نمونه وقتی که نمونه دیوار به مقاومت نهایی خمشی M_u خود می‌رسد، بوده است. مقدار M_u براساس BS 8110 با استفاده از بلوک تنش مستطیلی برای بتن در حالت حدی نهایی بدون در نظر گرفتن ضرایب جزئی ایمنی تعیین شده است. شکل ۲ رابطه بار- تغییرمکان چرخه‌ای رفت و برگشتی عمومی اعضای بتن مسلح تحت آزمایش را نشان می‌دهد. جابه‌جایی تسلیم می‌تواند از رابطه (۱) تعیین شود:

$$\Delta_y = \frac{|\Delta_1| + |\Delta_2|}{2} \quad (1)$$

در این رابطه، Δ_1 و Δ_2 ، جابه‌جایی افقی متناظر با بار جانبی P_i و $-P_i$ است. در جدول ۲، نوع گسیختگی و مقاومت تئوری و ماکزیمم نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۲- نوع گسیختگی و مقاومت تئوری و آزمایشگاهی نمونه‌ها [۲]

نمونه	مقاومت تئوری		حداکثر بار آزمایش P_{max} (kN)	مود گسیختگی
	V_u (kN)	P_i (kN)		
U1.0	۷۳۷	۳۲۱	۳۶۰	تسلیم آرماتور و خردشدگی بتن
U1.5	۶۸۹	۲۴۶	۲۷۷	در نواحی مرزی دیوارها

جدول ۳- جابه‌جایی تسلیم، شکل‌پذیری، و ظرفیت جذب انرژی [۲]

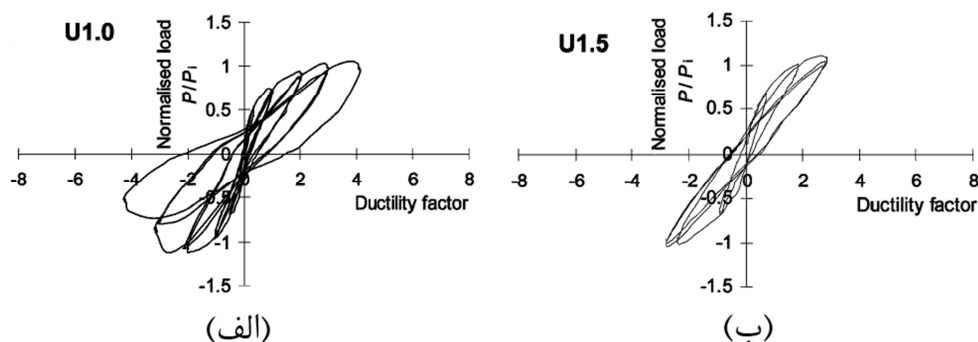
نمونه	جابه‌جایی تسلیم	ضریب شکل‌پذیری جابه‌جایی (μ)	اتلاف انرژی نرمال شده	
			En	مقادیر نسبی
U1.0	۳/۸	۳/۱	۱۰/۰	۱/۶۷
U1.5	۵/۰	۲/۸	۶/۰	۱/۰۰

دو رویکرد اصلی در مدل‌سازی اعضای بتنی مسلح، مدل‌سازی با مقیاس کوچک و مدل‌های با مقیاس بزرگ است. مدل‌سازی با مقیاس کوچک شامل تحلیل اجزای

۳- مدل‌های با مقیاس کوچک در مقابل مدل‌های با مقیاس بزرگ

به کار می‌رود. این رویکرد، پیچیده بوده و نیاز به توانایی پردازش عددی بالایی دارد؛ لذا، این روش برای سازه‌های بزرگ کاربردی نبوده و محدود به اجزای منفرد سازه‌ای مانند یک ستون، یا یک تیر یا یک دیوار است.

محدود یا تحلیل با به‌کارگیری اعضای مدل شده به روش الیافی براساس نشان دادن رفتار مصالح مختلف موجود در عضو بتن مسلح و اندرکنش بین آن‌ها است. در اینجا عضو به اجزای کوچکی تجزیه شده و اصول تعادل برای هر جزء



شکل ۳- حلقه هیستریک نمونه U1 و نمونه U1.5 [۲].

از سوی دیگر، مدل‌سازی با مقیاس بزرگ، براساس نشان دادن رفتار کلی عضو بتنی مسلح، مانند تغییرشکل، مقاومت و ظرفیت اتلاف انرژی است. رفتار کلی عضو بتنی مسلح با استفاده از مدل‌های با مقیاس بزرگ باید با استفاده از تأییدهای آزمایشگاهی صحت‌سنجی گردد تا پارامترهای مورد نیاز برای مدل به‌دست آیند. این رویکرد، ساده بوده و نیاز به محاسبات عددی فراوانی ندارد. از این‌رو، برای مدل‌سازی پاسخ سازه‌های بزرگ مناسب است. مدل‌های با مقیاس بزرگ برای دیوارهای برشی بتن مسلح شامل، عضو تیر-ستون دو مؤلفه‌ای^{۱۲}، عضو تیر-ستون تک مؤلفه‌ای^{۱۳}، مدل چند فنری^{۱۴}، مدل فنری چند محوره^{۱۵} (مدل MS)، مدل‌های خرپا^{۱۶} و مدل‌های ترکیبی^{۱۷} که آن نیز شامل، مدل عضو سه خطی قائم (TVLE^{۱۸}) و مدل عضو چند خطی قائم (MVLE^{۱۹}) است [۵].

نرم‌افزار Vector2 برای تحلیل سازه‌های بتن مسلح غشایی دوبعدی می‌باشد [۱۵]. این برنامه در دانشگاه تورنتو در سال ۱۹۹۰ تهیه شده است و تا به امروز با تغییرات اعمال شده کامل‌تر گردیده است. اساس تئوری برنامه Vector2 بر تئوری میدان فشار اصلاح شده (MCFT^{۲۰}) و مدل میدان تنش دگرگون شده (DSFM^{۲۱}) در شبیه‌سازی رفتار بتن مسلح می‌باشد. الگوریتم MCFT و DSFM در Vector2 با فرض تنش مسطح فرمول‌سازی شده است. این ابزارها دارای دقت بالایی در پیش‌بینی پاسخ دیوار کوتاه می‌باشند [۶].

نرم‌افزار VecTor2 لیستی از مدل‌های مشخصه برای نشان دادن رفتار بتن و آرماتور دارد. این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی پدیده‌هایی نظیر اثرات کششی-سخت‌شوندگی^{۲۲}، اثرات کششی-نرم‌شوندگی^{۲۳}، رفتار انبساطی^{۲۴}، ترک‌خوردگی بتن، کنترل عرض ترک بتن، کاهش مقاومت و سختی در بارگذاری چرخه‌ای، اثر محصورشدگی در فشار، رفتار هیستریک آرماتور، کرنش

۴- مدل‌سازی دیوار برشی در نرم‌افزار Vector2

12- Two-component beam-column element

13- One-component beam-column element

14- Multiple spring model

15- Multi-axial spring model

16- Truss models

17- Combined models

18- Three Vertical Line Element (TVLE) model

19- Multiple Vertical Line Element (MVLE) model

20- Modified Compression Field Theory

21- Disturbed Stress Field Model

22- Tension-Stiffening

23- Tension-Softening

24- Dilatational characteristics

صورت استفاده از المان چهار گرهی نیز باید اشاره نمود که امکان مش‌بندی مقطع مورد نظر در راستای ضخامت وجود ندارد.

از میان روش‌های مختلف مدل‌سازی دیوار برشی بتن مسلح در نرم‌افزار اپنسیس، عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان^{۲۷} و عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمشی و برش^{۲۸}، که رایج‌تر می‌باشند، برای بررسی و راستی‌آزمایی در این کار انتخاب شده‌اند و قطعاً عضوهای تازه ارائه شده در این نرم‌افزار، حالت‌های بیشتری را پوشش خواهند داد.

۵-۱- عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان

عمومی‌ترین روش برای معرفی اعضای دیوار برشی و اجزای قاب، در تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی، عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان است که توسط تاوسر^{۲۹} و همکاران توسعه یافته است [۱۷]. در این عضو، مقطع به تعدادی الیاف بتنی و فولادی تقسیم‌بندی می‌شود و قوانین تنش-کرنش تک‌محوری استفاده می‌شود تا پاسخ مواد را در امتداد طولی (موازی با محور عضو) به دست آورد. در این روش، تغییرشکل‌های برشی در مقطع قابل تعیین نبوده و اندرکنش پاسخ خمشی و برشی در فرمول‌بندی مقطع الیافی منظور نمی‌شود [۱۷].

در نرم‌افزار اپنسیس، مشخصه‌های رفتاری مختلفی برای بتن و فولاد وجود دارد. در مدل‌سازی دیوار برشی کوتاه با استفاده از عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، مشخصه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و با راستی‌آزمایی توسط نتایج آزمایشات، رفتار مشخصه

سخت‌شونده، اثر بوشینگر آرماتور فولادی و کمانش آرماتور می‌باشد. همچنین علاوه بر امکان مدل‌سازی آرماتور قائم، افقی و آرماتور انتظار، امکان مدل‌سازی آرماتور قطری در دو امتداد که در دیوارهای بتنی مسلح کوتاه عموماً استفاده می‌شود، در نرم‌افزار وجود دارد [۶].

۵- مدل‌سازی دیوار برشی در نرم‌افزار اپنسیس

روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی دیوار برشی در نرم‌افزار اپنسیس موجود است [۱۶]. از آن جمله می‌توان به انواع مختلف عضوهای تیر-ستون برای مدل‌سازی دیوارهای برشی بتن مسلح اشاره نمود. در مدل‌سازی با عضوهای تیر-ستون، دیوار برشی به صورت یک ستون معادل، با اختصاص مختصات گره ابتدا و انتها مدل‌سازی می‌شود. برای مقطع دیوار برشی، مقطع فایبر تعریف می‌شود که مش‌بندی مقطع فایبر با تعریف تعداد تقسیمات در دو امتداد (در زمان تعریف مقطع) صورت می‌گیرد و مش‌بندی در امتداد ارتفاع دیوار برشی با تعریف تعداد نقاط انتگرال‌گیری انجام می‌شود.

از دیگر روش‌های مدل‌سازی دیوار برشی می‌توان به پوسته^{۲۵} و عضو چهارگره‌ای^{۲۶} اشاره نمود. مدل‌سازی با پوسته و عضو چهارگره‌ای به صورت تعریف مختصات چهار نقطه اطراف دیوار برشی خواهد بود. در استفاده از پوسته، برای مدل‌سازی دیوار برشی، باید برای دیوار، مقطع تعریف نمود که می‌توان از فایبر به عنوان مقطع استفاده کرد. مش‌بندی در مقطع فایبر امکان‌پذیر است ولی برای مش‌بندی در ارتفاع، نقطه انتگرال‌گیری برای این عضو وجود ندارد و باید در طول دیوار برشی به تعداد بسیار زیاد از این عضو تعریف نمود و برای تک تک اعضا مختصات چهار نقطه اطراف دیوار را وارد کرد که مش‌بندی در ارتفاع را تشکیل می‌دهد. انجام این پروسه، زمان‌بر بوده و حجم محاسبات بالایی خواهد داشت. در

²⁷- Displacement Based Beam-Column Element

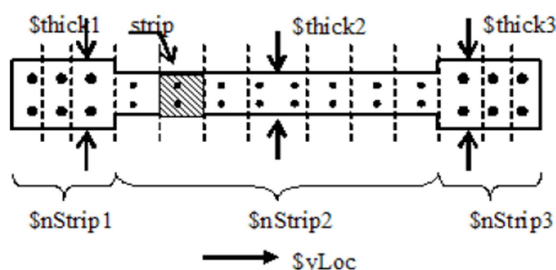
²⁸- Flexure shear interaction displacement based beam-column element

²⁹- Taucer

²⁵- Shell

²⁶- Quad

امکان‌پذیر نمی‌باشد. مقطع این عضو، فایبر اینت^{۳۴} نامیده می‌شود که از تعدادی لایه تشکیل شده است و شامل الیاف‌های قائم برای نشان دادن مصالح بتن و فولاد و الیاف‌های افقی برای نشان دادن آرماتور افقی، می‌باشد (شکل ۴) [۱۸].



شکل ۴- مدل‌سازی مقطع عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش-برش [۱۸]

در مدل‌سازی با این عضو از مدلی تحت عنوان Concrete 06 برای بتن استفاده می‌شود. این مدل، برای نشان دادن رفتار بتن در اعضای غشایی تهیه شده است. در این مدل، قوانین مشخصه مواد در فشار براساس منحنی ترنفلدت^{۳۵} که مشابه تعریف پوپوویکس^{۳۶} است، تعریف شده است. با بررسی مشخصه‌های رفتاری مختلف برای فولاد، در این عضو، Steel 02، برای تعریف رفتار آرماتور فولادی پیشنهاد می‌شود.

۶- مدل‌سازی نمونه UI

در ابتدا مدل‌سازی با نرم‌افزار اجزای محدود Vector2 انجام گرفته است. بار محوری به میزان ۱۱۵ کیلونیوتن و بار جانبی ابتدا به صورت استاتیکی یکنواخت تا مقدار ۳۲۱ کیلونیوتن و سپس به صورت چرخه‌ای براساس تاریخچه بارگذاری نشان داده شده در شکل ۲ بر نقطه انتهایی دیوار اعمال شده است. در ابتدا، مدل‌سازی براساس مدل‌های پیش‌فرض نرم‌افزار انجام گرفته است. به صورت پیش‌فرض، رفتار بتن در ناحیه قبل از پاسخ

بتن، Concrete 01 و رفتار فولاد، Steel 02 انتخاب شده است. بتن Concrete 01، دارای ناحیه فشاری براساس مدل اصلاح شده پارک و کنت^{۳۰} و مقاومت ناحیه کششی صفر می‌باشد. مدل Steel 02، براساس مدل تک محوری فولاد گیوفر-منقوتو-پینتو^{۳۱} می‌باشد که دارای ویژگی کرنش سخت‌شوندگی ایزوتوپیک^{۳۲} است.

۵-۲- عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش-برش

به منظور وارد کردن اندرکنش خمش-برش مشاهده شده در آزمایشات تجربی، اراکال^{۳۳} و همکاران یک مدل تحلیلی پیشنهاد کردند که رفتار پانل بتنی مسلح مبتنی بر رویکرد چرخش-دوران را با مدل عضو چندخطی قائم ترکیب می‌کند [۱۸]. مدل اندرکنش خمش-برش شامل اصلاح مدل MVLEM با قرار دادن یک فنر برشی برای هر عضو تک محوری است. پس از آن هر عضو تک محوری به عنوان یک عضو پانل بتنی مسلح، با عملکرد غشایی، با تنش‌های عمودی و برشی یکنواخت که در امتداد داخل صفحه وارد می‌شوند، رفتار می‌کند. به این ترتیب، اندرکنش مابین خمش و برش در سطح عضو تک محوری ترکیب می‌شود. این روش شامل اجرای روش اجزای محدود با یک مدل مشخصه بتن مسلح غشایی است [۱۸].

اگرچه مدل‌های مصالح می‌توانند دارای رفتار چرخه‌ای باشند، اما فرمول‌بندی این مدل، برای تحلیل‌های استاتیکی یکنواخت تکمیل و راستی‌آزمایی شده است. معادلات سازگاری مربوط به تغییرمکان‌های گرهی (۶ درجه آزادی) و کرنش‌های داخلی (کرنش محوری، انحنای و کرنش برشی) تنها در یک صفحه دوبعدی تعریف شده است. بنابراین تحلیل سه‌بعدی با این عضو

³⁴- FiberInt

³⁵- Thorenfeldt

³⁶- Popovics

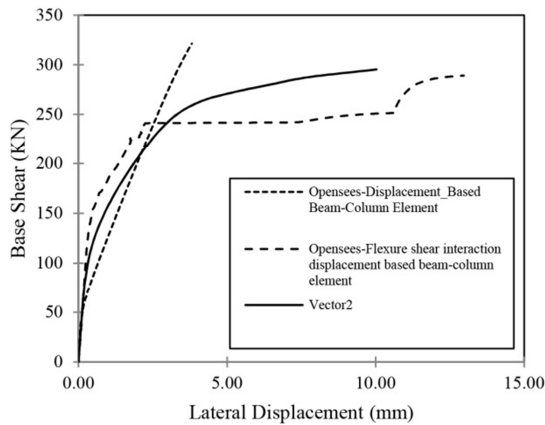
³⁰- Modified Kent & Park

³¹- Giuffer-Menegotto-Pinto

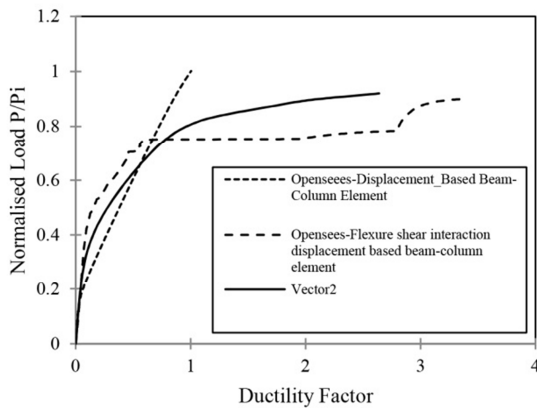
³²- Isotropic strain hardening

³³- Orakcal

داده شده است.



شکل ۵- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهایی دیوار



شکل ۶- نمودار برش پایه هم‌پایه شده P/P_i - ضریب

شکل‌پذیری Δ/Δ_y

میزان جابه‌جایی تسلیم در بارگذاری چرخه‌ای در نرم‌افزار اپنسیس و عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، با استفاده از رابطه (۱) به صورت زیر محاسب می‌گردد:

$$\text{میزان جابه‌جایی تسلیم} = (3/78 + 3/82) \div 2 = 3/8$$

در جدول ۳ مقدار این پارامتر در آزمایش نیز $3/8$ ارائه شده است.

در مدل‌سازی با استفاده از عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش، از آنجاکه این عضو فقط قابلیت تحلیل استاتیکی یکنواخت و تحلیل دوبعدی را دارا می‌باشد؛ امکان انجام تحلیل چرخه‌ای در این عضو وجود ندارد [۱۸].

حداکثر، براساس مدل هونگستاد (پارابولا) ^{۳۷} و در ناحیه پس از پاسخ حداکثر، مدل اصلاح شده پارک- کنت و پاسخ هیستریک آن، لینیر دلبیو/ پلاستیک افستس ^{۳۸} می‌باشد. پاسخ هیستریک فولاد با لحاظ اثر بوشینگر (سکین) ^{۳۹} و در مدل‌سازی از آرماتور فولادی شکل‌پذیر ^{۴۰} استفاده شده است.

در مدل‌سازی با نرم‌افزار اپنسیس از دو عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش استفاده شده است. در تمامی مدل‌ها دیوار برشی با تیر بالا و پایین (فونداسیون) مدل‌سازی شده است. همانند مدل‌سازی پیشین، بار محوری به میزان ۱۱۵ و بار جانبی ابتدا به صورت استاتیکی یکنواخت تا مقدار ۳۲۱ کیلونیوتن و سپس به صورت چرخه‌ای براساس تاریخچه بارگذاری نشان داده شده در شکل ۲ بر نقطه انتهایی دیوار اعمال شده است. منحنی‌های مختلف رفتاری برای بتن و فولاد مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت رفتار فولاد Steel 02 و رفتار بتن در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، Concrete 01 و در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش، Concrete 06 منظور شده است.

در شکل ۵، نمودار برش پایه در مقابل تغییرمکان انتهایی دیوار و در شکل ۶، برش پایه هم‌پایه شده در مقابل ضریب شکل‌پذیری برای دو نرم‌افزار رسم شده است.

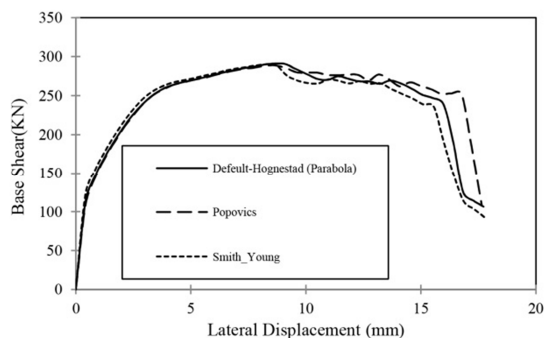
در مدل‌سازی با نرم‌افزار اپنسیس، میزان تغییرمکان جانبی، در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، در بار جانبی ۳۲۱ کیلونیوتن، $3/81$ میلیمتر به دست آمده است. در شکل ۷، نمودار برش پایه در مقابل تغییرمکان انتهایی دیوار برای بارگذاری چرخه‌ای نشان

³⁷- Hognestad (Parabola)

³⁸- Linear w/Plastic Offsets

³⁹- Bauschinger Effect (Seckin)

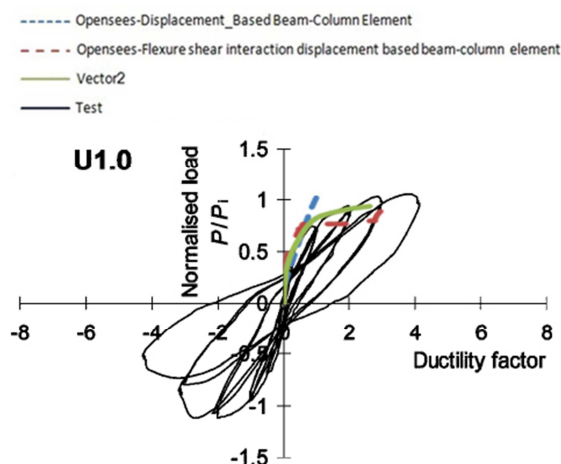
⁴⁰- Ductile steel Reinforcement



شکل ۹- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار، مقایسه پاسخ با تغییر رفتار بتن، برای سه مدل هوگنستاد، پوپویکس و اسمیت-یانگ

۱-۶- مقایسه نتایج حاصل از دو نرم‌افزار اپنسیس و Vector2 و آزمایش در نمونه U1

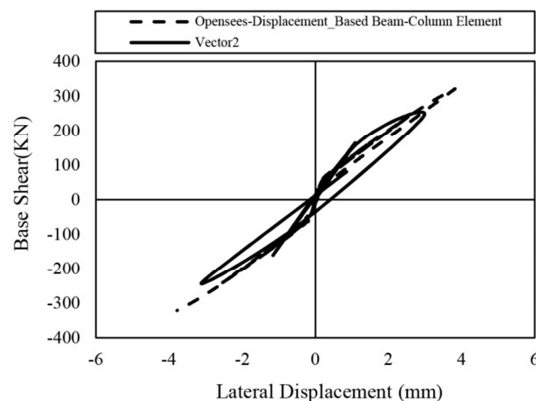
در این قسمت نتایج حاصل از نرم‌افزارهای اپنسیس و Vector2 با نتیجه آزمایش مقایسه شده است و در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰- نمودار برش پایه هم‌پایه شده P/P_1 - ضریب

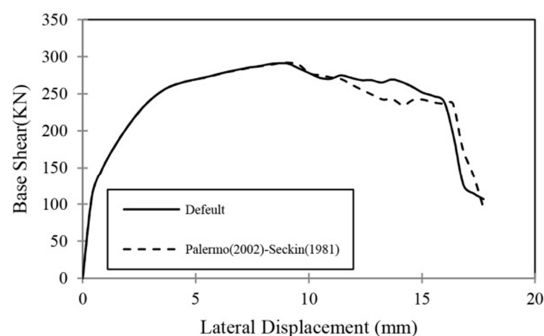
شکل‌پذیری Δ/Δ_y

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مدل تهیه شده با نرم‌افزار اجزای محدود Vector2 انطباق کاملی با نتیجه آزمایش دارد. در نرم‌افزار اپنسیس، در مدل‌سازی با عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، مقدار سختی کوچک‌تر و مقاومت بزرگ‌تری نسبت به نتیجه آزمایش تخمین زده شده است. در استفاده از عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش و برش، سختی بزرگ‌تر و مقاومت کوچک‌تری نسبت به نتیجه آزمایش



شکل ۷- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار بارگذاری چرخه‌ای

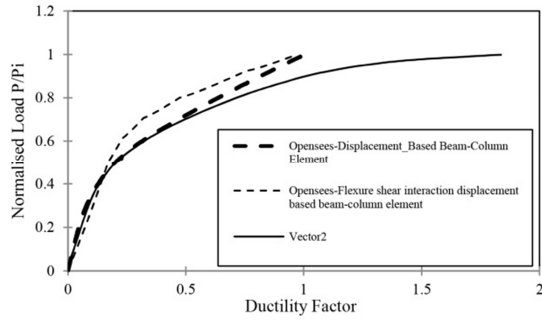
در مرحله بعد از مدل‌سازی، مدل‌های پیش‌فرض نرم‌افزار Vector2 برای رفتار هیستریک بتن (لینیر دبلو/ پلاستیک افسستس) و فولاد (بوشینگر افکت (سکین)) با مدل پالمو^{۴۱} (۲۰۰۲) برای بتن و سکین (۱۹۸۱) برای فولاد مقایسه و در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار، مقایسه پاسخ‌ها با تغییر رفتار هیستریک بتن و فولاد

همانطور که ذکر شد، به‌صورت پیش‌فرض رفتار بتن در ناحیه قبل از پاسخ، حداکثر هوگنستاد (پارابولا) لحاظ شده است. پیش‌فرض نرم‌افزار با دو مدل دیگر بتن یعنی پوپویکس (۱۹۷۳) و اسمیس- یانگ (۱۹۵۶) مقایسه و در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در دو نمودار ۸ و ۹ دیده می‌شود با تغییر رفتار بتن و فولاد در مدل‌های مقایسه شده، تنها تفاوت در ناحیه بعد از مقاومت حداکثر دیده شده است.

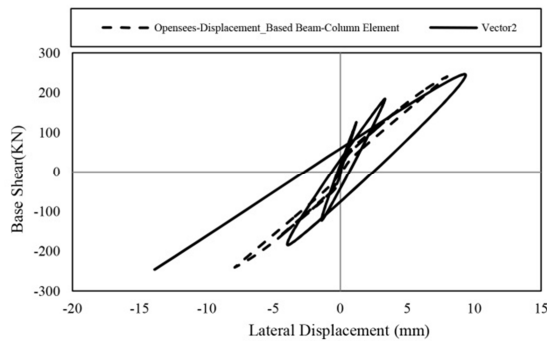
⁴¹- Palermo



شکل ۱۲- نمودار برش پایه هم‌پایه شده P/P_i -ضریب شکل‌پذیری Δ/Δ_y

در جدول ۳ مقدار این پارامتر در آزمایش نیز ۵/۰ ارائه شده است.

میزان جابه‌جایی در بار جانبی ۲۴۶ کیلو نیوتن، در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، ۵/۰۳ میلیمتر به‌دست آمده است. این جابه‌جایی، در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش، ۴/۸۶ میلیمتر به‌دست آمده است.



شکل ۱۳- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار، بارگذاری چرخه‌ای

۱-۷ مقایسه نتایج حاصل از دو نرم‌افزار اپنسیس و Vector2 و آزمایش در نمونه U1.5

در این قسمت، نتایج حاصل از نرم‌افزارهای اپنسیس و Vector2 و آزمایش با هم مقایسه شده و در شکل ۱۴ ارائه شده است.

در هر سه روش مدل‌سازی، شیب قسمت الاستیک خطی انطباق کامل با نتیجه آزمایش دارد. مانند نمونه قبل، مدل تهیه شده با نرم‌افزار اجزای محدود Vector2

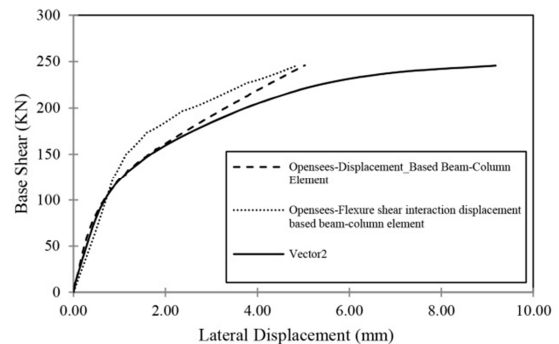
حاصل شده است. در کل، شکل کلی نمودار در عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش و برش، انطباق خوبی با نتیجه آزمایش دارد.

۷- مدل‌سازی نمونه U1.5

مانند نمونه قبل، ابتدا مدل‌سازی با نرم‌افزار اجزای محدود Vector2 انجام گرفته است. در مدل‌سازی با نرم‌افزار اپنسیس، از دو عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش- برش استفاده شده است. در شکل ۱۱، نمودار برش پایه در مقابل تغییرمکان انتهای دیوار و در شکل ۱۲ برش پایه هم‌پایه شده در مقابل ضریب شکل‌پذیری برای دو نرم‌افزار رسم شده است. در شکل ۱۳، نمودار برش پایه در مقابل تغییرمکان انتهای دیوار برای بارگذاری چرخه‌ای نشان داده شده است.

میزان جابه‌جایی تسلیم در بارگذاری چرخه‌ای در نرم‌افزار اپنسیس و عضو تیر- ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان، با توجه به رابطه (۱) برابر مقدار زیر می‌باشد:

$$\text{میزان جابه‌جایی تسلیم} = (5/03 + 5/03) \div 2 = 5/03$$



شکل ۱۱- نمودار برش پایه- تغییرمکان جانبی انتهای دیوار

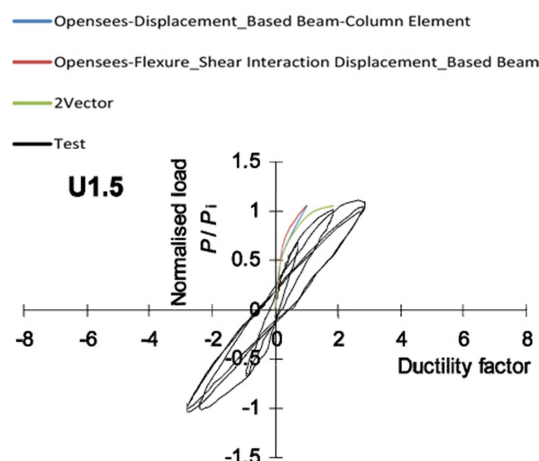
برشی کوتاه می‌باشد، مشاهده شد که مدل تهیه شده با این نرم‌افزار انطباق خوبی با نتایج آزمایشات دارد.

۲- در مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اپنسیس، با توجه به مسئله مش‌بندی در ارتفاع عضو پوسته، که نیاز به تعریف تعداد زیادی عضو در ارتفاع و حجم بالای محاسبات دارد؛ استفاده از عضو تیر-ستون (MVLEM و اصلاح شده) در مدل‌سازی دیوار برشی به پوسته ترجیح داده شده است.

۳- در مدل‌سازی با نرم‌افزار اپنسیس و عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش-برش (MVLEM اصلاح شده)، مشاهده شد که نتایج حاصل از مدل‌سازی، انطباق خوبی با نتایج آزمایش دارد. بنابراین، در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه که اندرکنش خمش و برش سهم قابل‌توجهی در محاسبات دارد، مناسب می‌باشد.

۴- با توجه به محدودیت موجود در عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان و لحاظ اندرکنش خمش-برش (MVLEM اصلاح شده)، که فقط قابلیت تحلیل‌های دوبعدی و استاتیکی یکنواخت را دارد، برای انجام تحلیل‌های سه‌بعدی و دینامیکی، عضو تیر-ستون با فرمول‌بندی براساس تغییرمکان (MVLEM)، مورد بررسی قرار گرفت. در فرمول‌بندی این عضو، اندرکنش پاسخ خمشی و برشی در مدل مقطع لحاظ نمی‌شود، ولی با توجه به قابلیت‌های این عضو در تحلیل‌های سه‌بعدی و انواع تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی، در بررسی نتایج حاصل از این عضو با نتیجه آزمایش مشاهده شد که این عضو نیز با تفاوت اندک دارای پاسخ مناسبی در مدل‌سازی پاسخ دیوارهای برشی کوتاه می‌باشد. همچنین، با

انطباق کاملی با نتیجه آزمایش دارد. هر دو عضو به‌کار رفته از نرم‌افزار اپنسیس، سختی و مقاومت بزرگ‌تری نسبت به نتیجه آزمایش را تخمین زده‌اند. با افزایش نسبت ارتفاع به طول دیوار در نمونه U1.5 نسبت به نمونه U1 پاسخ‌های به‌دست آمده برای دو عضو در نرم‌افزار اپنسیس به هم نزدیک‌تر شده‌اند.



شکل ۱۴- نمودار برش پایه هم‌پایه شده P/P_i ضریب شکل-پذیری Δ/Δ_y

با توجه به اینکه، نمونه U1 دارای نسبت ارتفاع به طول برابر یک و نمونه U1.5 دارای نسبت ارتفاع به طول برابر یک و نیم می‌باشند، به‌منظور بررسی نسبت ارتفاع به طول نمونه کوچک‌تر از ۰/۷، نمونه M3 از آزمایشات گریفن هاگن مورد بررسی قرار گرفت ولی هیچگونه نمودار مناسبی که قابل ارائه در مقاله باشد، حاصل نشد [۱].

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به‌منظور پیش‌بینی رفتار دیوارهای برشی کوتاه تحت بارهای جانبی، پارامترهای تأثیرگذار در مدل‌سازی دیوارهای برشی کوتاه در دو مقیاس کوچک و بزرگ براساس نتایج آزمایشات، راستی‌آزمایی و معرفی شده است. نتایج حاصل از بررسی نشان می‌دهد که:

- ۱- با توجه به دقت بالای نرم‌افزارهای اجزای محدود غیرخطی، نرم‌افزار 2Vector دارای دقت بالا در مدل‌سازی عوامل تأثیرگذار در پاسخ دیوارهای

۵- مدل اندرکنش خمشی و برش در شبیه‌سازی افزایش نسبت ارتفاع به طول دیوار در نمونه‌ها مشاهده شد که پاسخ به‌دست آمده برای دو عضو به‌کار رفته در نرم‌افزار اپنسیس به هم نزدیک‌تر می‌شوند.

پاسخ یکنواخت دیوارهای برشی کوتاه با نسبت ارتفاع به طول بزرگ‌تر از ۰/۷ مناسب است.

مراجع

- [1] Greifenhagen, C. (2006), "Seismic behaviour of lightly reinforced concrete squat shear walls", Doctoral dissertation, Technische Universitat Dresden, Dresden.
- [2] Kuang J. S., & Ho, Y. B. (2008), "Seismic behavior and ductility of squat reinforced concrete shear walls with nonseismic detailing", *ACI Structural Journal*, 105(2), 225-231.
- [3] Dabbagh, H. & Foster, S. J. (2009), "Behavior of High-strength concrete squat shear walls subjected to reversed cyclic loading-an experimental study", 8th International congress on civil engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran, May 11-13.
- [4] Choi, C.S. (2006), "Improvement of earthquake-resistant performance of squat shear walls under reversed cyclic loads", *Key engineering materials*, 324-325, 535-538.
- [5] Galal, K. & EL-Sokkary, H. (2008), "Advancement in modeling of RC shear walls". The 14th World Conference on earthquake engineering, Beijing, China, October 12-17.
- [6] Gulec, C.K., & Whittaker, A.S. (2009), "Performance-Based Assessment and Design of squat reinforced concrete shear walls", Technical Report MCEER-09-0010.
- [7] Xiaolei, H., Xuwei, C., Cheang, J., Guiniu, M., & Peifeng, W. (2008), "Numerical analysis of cyclic loading test of shear walls based on OpenSEES", The 14th World Conference on earthquake engineering, Beijing, China.
- [8] Mohamadi Darani, F., & Sarvghad Moghadam, A. (2013), "Finite Element Analysis of Squat Concrete Shear Walls with Rectangular Section under Static Monotonic Loading", *Modares Civil Engineering journal*, 13(3), 113-123.
- [9] Ghanizadeh, M., Sarvghad Moghadam, A., & Farzam, M. (2016), "Effect of the reinforcement patterns on the seismic performance of the short shear walls", *Journal of Modeling in Engineering*, 14(45), 79-92.
- [10] Ghanizadeh, M., Sarvghad Moghadam, A., & Farzam, M. (2017), "Effect of the axial force and material strength on the seismic behavior of the short shear walls", *Journal of Modeling in Engineering*, 15(48), 125-137.
- [11] Moghadam, H., & Baradaran shoraka, M. (2006), "Seismic analysis of squat shear walls with openings", 7th International Congress on Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- [12] Motamedi, B., & Behnamfar, B. (2011), "Investigation of 3D Modeling Methods of RC Shear Walls", 3rd National Conference of Concrete, Tehran, Iran.
- [13] Tehranizadeh, M., Azizzadeh, Sh. (2009), "Comparison of Some Different Modeling Methods of Concrete Shear Wall Structures for Nonlinear Static and Dynamic Analysis", 8th International Congress on Civil Engineering, Shiraz, Iran.
- [14] Saghaeian, A., & Nateghi Elahi, F. (2011), "Comparison of different modeling methods in predicting nonlinear behavior of shear walls", *Research Bulletin of Seismology and Earthquake Engineering*, 14(3), 11-26.
- [15] Vecchio, F. J., & Wong, P. S. (2002). "Vector2 & Frameworks user's manual", <http://www.civ.utoronto.ca/vector/software.html>
- [16] Mazzoni, S. (2006). "Opensees Command Language Manual", <http://Opensees.Berkeley.edu>.
- [17] Taucer F.F., Spacone E., Filippou F.C. (1991), "A Fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures", Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, Report UCB/EERC-91/17.
- [18] Orakcal, K., Massone, L.M., Wallace, J.W. (2006), "Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Predicting Flexural and Coupled-Shear-Flexural Responses", Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Los Angeles, Report PEER 2006/07.