

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

مقایسه مدل ساده شده چند المان محوری با مدل فایبر در مدلسازی غیرخطی دیوار برشی بتنی

پریسا اسماعیل تبار نشلی^۱، جواد واثقی امیری^۲، حر خسروی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۳- استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

چکیده

پیش‌بینی رفتار غیرخطی دیوارهای برشی تحت نیروهای جانبی نیاز به مدل‌های تحلیلی ساده و دقیقی دارد که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی رفتارهای غیرخطی دیوارهای برشی را به خوبی نشان دهند. در دهه‌های اخیر مدل‌های تحلیلی متنوعی توسط محققین، به منظور پیش‌بینی رفتار غیرخطی دیوارهای برشی بتن آرمه ارائه شده است تا بتواند مهم‌ترین خصوصیات رفتاری دیوار را در نظر بگیرد. مدلی که برای تحلیل و طراحی دیوار به کار می‌رود باید از سادگی برخوردار بوده و دارای دقت کافی برای پیش‌بینی رفتار هیسترتیک دیوارهای سازه‌ای بتن مسلح باشد. استفاده از روش المان‌های رشته‌ای (fiber) می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های دقیق در مدلسازی دیوار محسوب شود ولی با توجه به پیچیدگی مدلسازی و همچنین بالا بودن مدت زمان تحلیل، استفاده از روش‌های دیگر پیشنهاد می‌شود. همچنین با توجه به پیشرفت‌های اخیر که در مدلسازی رفتار غیرخطی مصالح جهت ارائه رفتار دقیق‌تر در برابر بارهای سیکلیک و لرزه‌ای انجام شده است، می‌توان از این مدل‌های رفتاری بطور مستقیم در مدلسازی سیستم‌های سازه‌ای استفاده نمود. در این تحقیق جهت مدلسازی رفتار غیرخطی دیوار برشی بتنی در برابر بارهای لرزه‌ای، علاوه بر استفاده از روش فایبر، از روشی که مبتنی بر المان‌های محوری می‌باشد نیز استفاده شده است که با استفاده از ایده رفتار فنر معادل و استفاده از مدل‌های پیشرفته ارائه شده برای مصالح در نرم افزار *OpenSees* قابل پیاده سازی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از این روش ساده شده نسبت به روش فایبر، علاوه بر اینکه هزینه محاسبات را هم از نظر مدلسازی و هم از نظر مدت زمان تحلیل کاهش می‌دهد، دقت مورد نظر را نیز برآورده می‌کند.

کلمات کلیدی: دیوار برشی بتنی، مدل فایبر، مدل MVLEM، المان محوری، پاسخ دینامیکی غیرخطی، *OpenSees*.

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

شناسه دیجیتال	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2018.135310.1580					
doi: 10.22065/JSCE.2018.135310.1580	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۹/۰۱/۱۵	۱۳۹۷/۰۹/۰۹	۱۳۹۷/۰۷/۱۱	۱۳۹۷/۰۳/۲۱

*نویسنده مسئول: حر خسروی

پست الکترونیکی: hor.khosravi@gmail.com

Comparison of simplified MVLEM model with Fiber model in nonlinear modeling of RC shear wall

Parisa Esmaeiltabar Nesheli¹, Javad Vaseghi Amiri², Horr Khosravi^{*3}

¹ Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

² Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of technology, Babol, Iran

³ Professor Assistant/ Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

The prediction of nonlinear behavior of shear walls under lateral loads requires simple and precise analytical models representing the nonlinear behavior of the shear walls as well as the experimental results. In recent decades, various analytical models have been proposed by researchers to predict the nonlinear behavior of reinforced concrete shear walls in order to consider the most important behavioral properties of the wall. The model used for analysis and design of the wall should be simple and accurate enough to predict the hysterical behavior. Using the method of fiber section elements can be considered as one of the most accurate methods in wall modeling. But due to the complexity of the modeling and high duration of the analysis, the use of other methods is suggested. Considering the recent progress in modeling nonlinear behavior of materials to provide more accurate behavior against cyclic and seismic loads, these material models can be directly used in modeling of structural systems. In this study, in addition to using the fiber section model, a method based on axial elements is also used. It is implemented by the concept of equivalent spring's behavior and using the advanced material models in the platform of OpenSees. The results show that the use of this simplified model compared to the fiber method, in addition to reducing the computational cost in both aspects of the duration of modeling and analysis, also satisfies the desired accuracy.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 June 2018

Revise Date: 03 October 2018

Accept Date: 30 November 2018

Keywords:

Rc shear wall, Fiber section, MVLEM, Axial element, Nonlinear dynamic response, OpenSees

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.135310.1580

*Corresponding author: Horr Khosravi
Email address: hor.khosravi@gmail.com

۱- مقدمه

در میان روش‌های متعدد برای ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها، تحلیل دینامیکی غیرخطی مدل سازه‌ای دارای جزئیات قابل اعتمادترین روش تحلیل است، ولی با توجه به وجود صدها درجه آزادی نیاز به هزینه محاسباتی بیشتر بوده و تفسیر نتایج نیز پیچیده تر می باشد. از اینرو محققان به مدل‌های ساده شده تری روی آورده اند که هم در حوزه مهندسی و هم در حوزه تحقیقاتی قابل استفاده باشند. در مدل‌های ساده شده چند درجه آزادی امکان مدیریت بهتر داده‌ها، هزینه محاسباتی پایین تر و قابلیت درک بهتر نتایج وجود دارد. بنابراین رویکرد، امکان آنالیز دینامیکی غیرخطی دامنه گسترده‌ای از سازه‌ها فراهم می‌شود. مدل‌های مختلفی برای ساده‌سازی سیستم‌های چند درجه آزادی قاب خمشی وجود دارد که از آن جمله می توان به مدل استخوان ماهی اشاره نمود که توسط ناکاشیما مطرح و بعدها توسط خسروی و خالو اصلاح شده است [۱ و ۲]. در دهه‌های اخیر مدل‌های تحلیلی متنوعی توسط محققین، به منظور پیش‌بینی رفتار غیرخطی دیوارهای سازه‌ای بتن مسلح ارائه شده است تا بتواند اندرکنش دیوار با سایر اعضای سازه‌ای و مهم‌ترین مشخصه‌های رفتار غیرخطی دیوارهای برشی شامل تنزل سختی و مقاومت، رفتار باریک‌شوندگی، تغییرشکل‌های غیرخطی برشی و لغزش میلگرد را در نظر بگیرد. جهت مدلسازی دیوار برشی بتن‌آرمه می‌توان از روش‌های با مقیاس کوچک (میکرو) و یا از روش‌های با مقیاس بزرگ (ماکرو) استفاده نمود. اگرچه روش‌های میکرو جزئیات بیشتری را مد نظر قرار می‌دهد، ولی به تلاش و زمان زیادی برای مدلسازی و محاسبات عددی نیاز دارد [۳-۶]. در صورتی که روش‌های ماکروسکوپی با استفاده از فرض‌های ساده‌ای کاربردی و موثر هستند. لذا استفاده از روش‌های ساده شده‌تر یا ماکرو که با دقت کافی باشند هم در حوزه مهندسی و هم در حوزه تحقیقاتی همواره مورد توجه بوده اند. در حال حاضر با توجه به کارایی مدل‌های ماکرو، نرم افزارهای آنالیز سازه‌ای از جمله Drain-2dx و Performe 3d, OpenSees از آن برای آنالیز غیرخطی دیوار برشی استفاده می‌کنند [۷-۹].

در روش مدلسازی با استفاده از المان‌های فایبر که براساس روابط تنش-کرنش مصالح می‌باشند، در کل طول المان رفتار پلاستیسیته گسترده در نظر گرفته می‌شود [۱۰-۱۲]. سایر مدل‌های ماکرو که متداول هستند براساس فرض‌های ساده‌کننده‌ای می‌باشند. اولین مدل ساده شده مدل تک مولفه‌ای تیر-ستون معادل می‌باشد که دیوار را بصورت یک ستون معادل در محور مرکزی دیوار در نظر می‌گیرد. در این مدل با توجه به اینکه دوران دیوار حول محور مرکزی آن صورت می‌گیرد تغییر جایگاه تار خنثی در مقطع عرضی دیوار در حین بارگذاری و باربرداری لحاظ نمی‌شود. لذا این مدل اندرکنش دیوار با المان‌های محیطی را در نظر نمی‌گیرد [۱۳ و ۱۴]. از سال ۱۹۸۳ به بعد با ارائه مدل سه المان محوری قائم (TVLEM¹) که توسط کابایساوا پیشنهاد شد [۱۵]، مدل‌هایی که مبتنی بر المان‌های محوری قائم می‌باشند ارائه شدند که ضعف‌های مدل تیر-ستون معادل را نداشتند و همچنان در حال توسعه می‌باشند. این مدل در سال‌های ۱۹۸۷ و ۱۹۸۸ توسط ولکانو اصلاح گردید و تحت عنوان مدل چند المان محوری قائم (MVLEM²) نامگذاری شد. مدل‌های MVLEM ارائه شده رفتارهای خمشی دیوار را به خوبی مدلسازی می‌کنند [۱۶ و ۱۷]. در سال‌های اخیر اصلاحات زیادی جهت بسط و توسعه این مدل صورت گرفته است. از جمله می‌توان به بررسی‌های ماسون و والاس اشاره نمود که این مدل را برای در نظر گرفتن اندرکنش برش و نیروی محوری اصلاح نمودند [۱۸]. اراکال و والاس مدل MVLEM را به طور مستقیم بر اساس روابط ساختاری مصالح تحت بارگذاری سیکلیک ارائه نمودند [۱۹]. کلوزواری و والاس مدل MVLEM را که اندرکنش خمش و برش را در نظر گرفته و به طور مستقیم بر مبنای رفتار ساختاری مصالح باشد پیشنهاد نموده و در برنامه OpenSees نیز پیاده سازی نمودند [۲۰-۲۳]. کیم در سال ۲۰۱۶ به منظور در نظر گرفتن پاسخ برشی-خمشی از المان‌های محوری و قطری در مدل MVLEM استفاده نموده است [۲۴]. همچنین از جنبه کاربردی، محققان زیادی جهت رسیدن به اهداف تحقیقاتی خود از این مدل برای مدلسازی دیوار برشی بتنی استفاده نموده اند که از آن جمله می‌توان به تحقیق صورت گرفته توسط باو و کناس اشاره نمود که از این روش مدلسازی دیوار در آنالیز خرابی پیشرونده سازه دارای قاب و دیوار برشی استفاده نمودند [۲۵]. در تحقیقی که توسط فیشینگر صورت گرفته است جهت به حساب آوردن قفل و بست سنگدانه و مقاومت افقی میلگرد، فنر برشی اضافی به فنرهای قائم متصل شده است [۲۶].

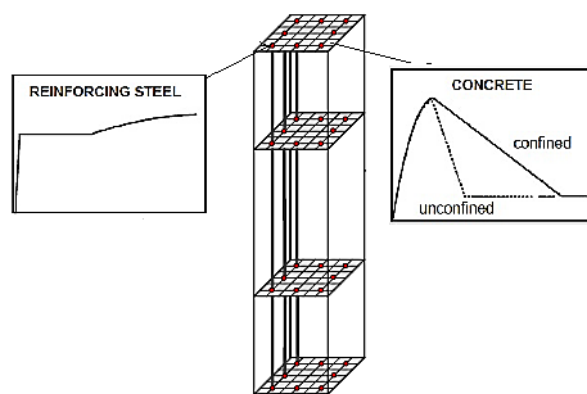
¹ Three Vertical Line Element Model

² Multi Vertical Line Element Model

با توجه به مبانی ساده و دامنه کاربرد مدل MVLEM در مدلسازی غیرخطی دیوار برشی، استفاده از این روش مدلسازی بسیار کارا می باشد. ولی در این میان آنچه می تواند به کارایی این مدل بیفزاید ساده سازی در پیاده سازی آن می باشد. کاناس جهت پیاده سازی المان های محوری از المان های TRUSS با مقطع فایبر استفاده نموده است که نیاز است از مبانی روش فایبر برای هر المان محوری استفاده شود [۲۷]. کلوتی برای پیاده سازی المان های محوری از فنرهای معادل برای مصالح فولاد و بتن استفاده نموده است ولی مدل های رفتاری استفاده شده توسط او فقط محدود به رفتار منوتونیک مصالح بوده است [۲۸]. با توجه به اینکه خصوصیات رفتاری مصالح می تواند بطور مستقیم در رفتار غیرخطی دیوار برشی تاثیرگذار باشد لذا نیاز است از مدل های رفتاری دقیق تری برای مصالح استفاده شود. لذا در این تحقیق به منظور پیاده سازی مدل MVLEM مشابه روش کلوتی از فنرهای معادل استفاده شده است، با این تفاوت که از مدل های رفتاری پیشرفته تر برای مصالح استفاده می شود که قابلیت در نظر گرفتن رفتار سیکلیک را می باشند. پاسخ های بدست آمده از این روش مدلسازی با پاسخ های مدل فایبر که به عنوان روش مدلسازی دقیق می باشد، مقایسه می گردد.

۲- مدل های تحلیلی دیوار برشی بتن آرمه

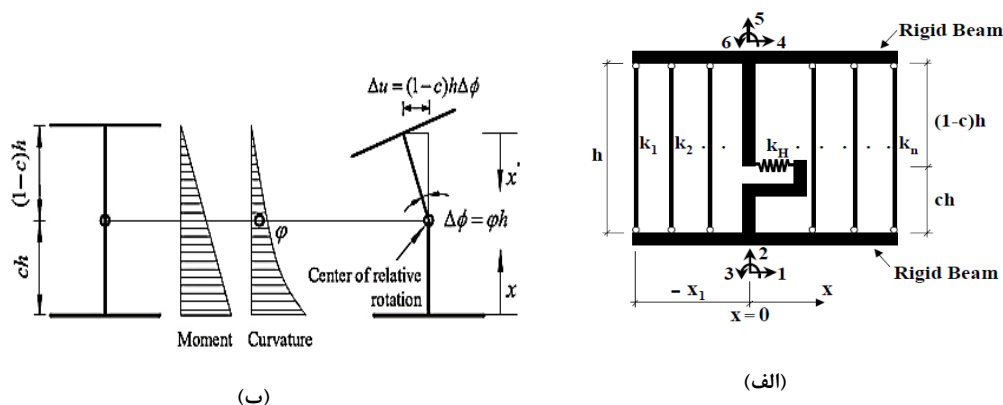
در این تحقیق از روش های مدلسازی ماکرو، فایبر و MVLEM برای مدلسازی دیوار برشی بتن آرمه استفاده شده است. مطابق شکل (۱) در مدل فایبر هر مقطع به تارها یا لایه های بتنی و فولادی تقسیم شده که برای توصیف رفتار تارهای (لایه های) بتنی و فولادی در جهت طولی عضو از روابط تنش- کرنش تک محوری استفاده می شود. این مدل توزیع خمش در طول عضو و اندرکنش خمش- نیروی محوری را به حساب می آورد [۱۰]. اگرچه مدل فایبر می تواند به عنوان مدلی دقیق محسوب شود ولی با توجه به اینکه نیاز است کل مقطع دیوار تقسیم بندی شده و به هر لایه رفتار مورد نظر اختصاص داده شود، هزینه محاسبات هم از لحاظ پیچیدگی مدلسازی و هم از لحاظ مدت زمان انجام آنالیز بالاتر می باشد.



شکل ۱: مدل با مقطع فایبر [۱۰].

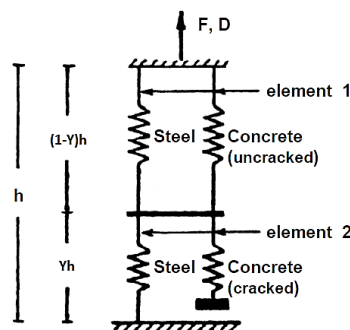
مدل چند المان محوری قائم، MVLEM، در سال ۱۹۸۸ توسط ولکانو، برترو و کلتی مطرح شده است [۱۷]. در این مدل مطابق شکل (۲الف) پاسخ خمشی دیوار با المان های تک محوری به صورت موازی و تیرهای با صلبیت بی نهایت در بالا و پایین تراز طبقه مدل می شود که مشخصات سختی و رابطه نیرو- تغییر مکان فنرهای محوری به روابط ساختاری تنش- کرنش بتن و فولاد و سطح نسبت داده شده به هر المان بستگی دارد. پاسخ غیرخطی برشی دیوار توسط فنر افقی با سختی K_H مدل می شود. چرخش نسبی المان دیوار نیز حول نقطه ای به ارتفاع ch روی محور مرکزی دیوار اتفاق می افتد. ولکانو و برترو با مطالعات پارامتریک نشان دادند که مقدار $c=0.4$ بهترین تطبیق را بین

پاسخ‌های پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده نتیجه می‌دهد [۱۶]. ماسون و والاس نیز با اطلاعات آزمایشگاهی به چنین نتیجه‌ای رسیدند [۱۸]. انتخاب پارامتر c بستگی به توزیع خمش و انحنای دیوار دارد و برای انحنای ساده بین صفر و یک متغیر است (شکل ۲ب).



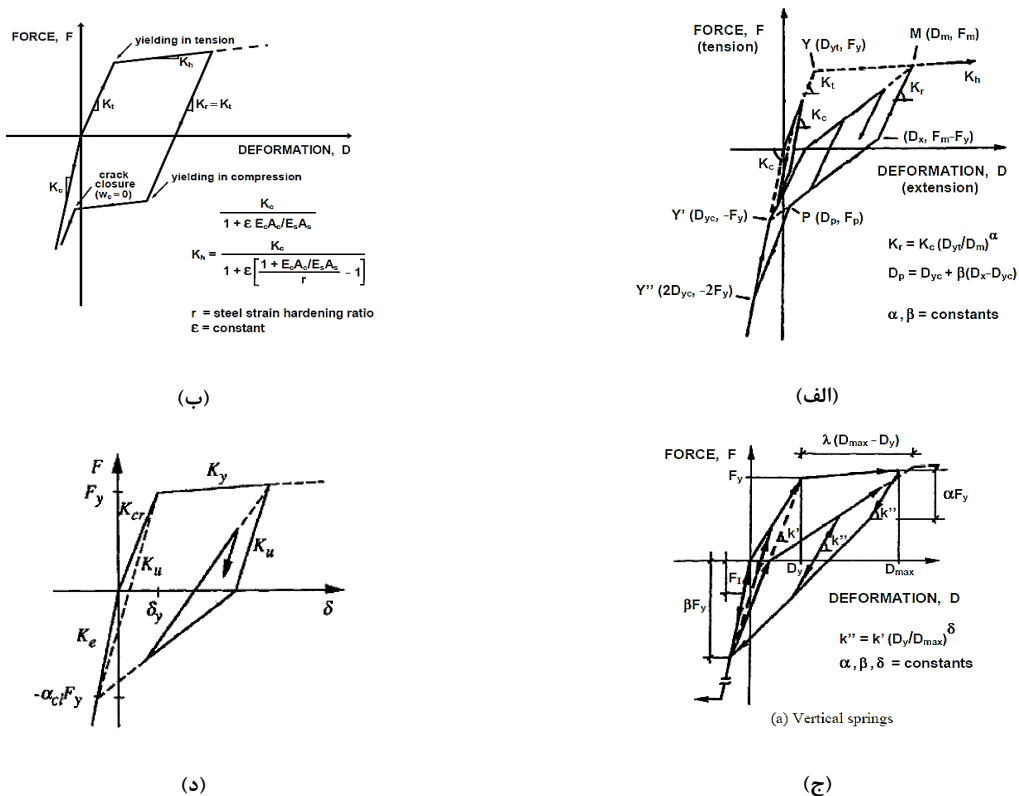
شکل ۲: الف) مدل MVLEM، ب) دوران نسبی و جابجایی خمشی در مدل MVLEM.

متابقی شکل (۳) در مدل MVLEM پیشنهاد شده توسط ولکانو، مدل هیستریزس فنرهای محوری با دو المان محوری که بطور سری بهم متصل شدند مدلسازی می‌شود که نمایانگر بخش‌های ترک‌خورده و ترک‌نخورده هستند. پارامتر بدون بعد γ جهت تعیین طول نسبی این دو بخش بکار می‌رود که اثر $tension stiffening$ را لحاظ می‌کند. قابل توجه است که اثر $tension stiffening$ سهم بتن ترک خورده را در مقاومت کششی اعضای بتن‌آرمه لحاظ می‌کند. بدین معنا که بتن چسبیده به میلگرد در ترک، در مقاومت کششی اعضا سهمی دارد. محققین مختلفی بررسی کرده‌اند که این اثر نقش مهمی در سختی، کاهش تغییرشکل‌ها، ظرفیت تسلیم و رفتار برشی سازه بتن‌آرمه بعد از ترک دارد [۳۰ و ۲۹].



شکل ۳: مدل المان محوری در مدل MVLEM [۱۷].

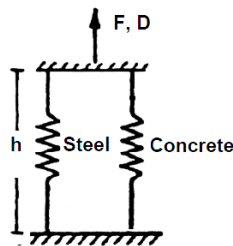
با توجه به شکل‌های (۴) مدل‌های هیستریزس مختلفی برای تعریف رفتار فنرهای محوری ارائه شده است. قابل توجه هست که هر یک از محققین پارامترهای مختلفی را برای تعیین رفتار فنرها در نظر گرفته‌اند که در انتخاب بعضی از آنها نیاز به قضاوت مهندسی می‌باشد [۱۶ و ۱۵، ۳۳-۳۱]. لذا نیاز به مدل‌های ساده‌تر برای ارائه و پیاده‌سازی این فنرهای غیرخطی می‌باشد.



شکل ۴: مدل های هیستریزس پیشنهاد شده توسط محققین مختلف برای المان های محوری مدل MVLEM

الف) مدل هیستریزس المان محوری پیشنهادی توسط کاباساوا [۱۵]، ب) مدل هیستریزس المان محوری پیشنهادی توسط ولکانو [۱۷]، ج) مدل هیستریزس المان محوری پیشنهادی توسط فیشینگر [۳۱]، د) مدل هیستریزس المان محوری پیشنهادی توسط لیند [۳۳].

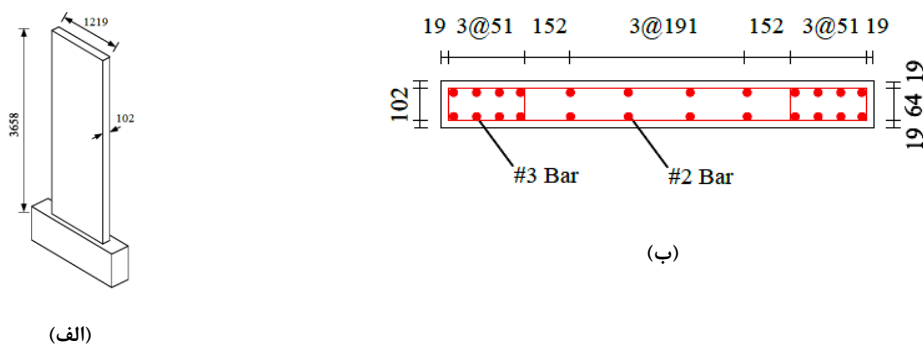
کلوتی بجای مدل پیشنهادی ولکانو مدل دو فنر معادل را ارائه نموده است که می توان به طور مستقیم رفتار تنش-کرنش مصالح فولاد و بتن را به آن اختصاص داد، شکل (۵). در این مدل می توان با در نظر گرفتن مدل های رفتاری دقیق تر برای مصالح، به پاسخ های دقیق تری برای دیوار برشی دست یافت.



شکل ۵: مدل المان محوری پیشنهاد شده توسط کلوتی [۲۸]

۳- نمونه مورد مطالعه

در این تحقیق جهت بررسی رفتار غیرخطی دیوار برشی بتن آرمه از یک نمونه دیواری که توسط والاس و تامسون در سال ۱۹۹۵ مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آزمایشگاهی آن موجود می باشد، استفاده شده است [۳۴]. مشخصات دیوار در شکل (۶) نشان داده شده اند. مشخصات مصالح که توسط اراکال کالیبره شده اند در جدول (۱) نشان داده شده اند [۱۹].



جدول ۱: مشخصات مصالح کالیبره شده [۱۹].

Material	Parameters	Boundary (confined)	Web (unconfined)
Concrete in Compression	f'_c, MPa	47.6	42.8
	ϵ'_c	0.0033	0.0021
	E_c, GPa	31.03	31.03
	ϵ_{cr}	0.0037	0.0022
Reinforcing in Tension	σ_y, MPa	395	336
	E_s, GPa	200	200

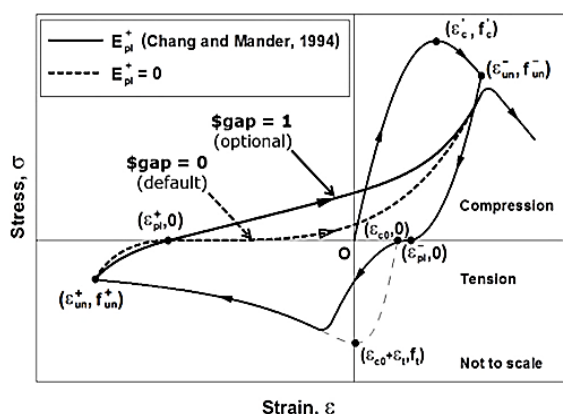
شکل ۶: ابعاد نمونه دیوار مورد آزمایش [۲۷]، (ب) مقطع عرضی دیوار [۳۴].

۳-۱ نحوه مدلسازی دیوار

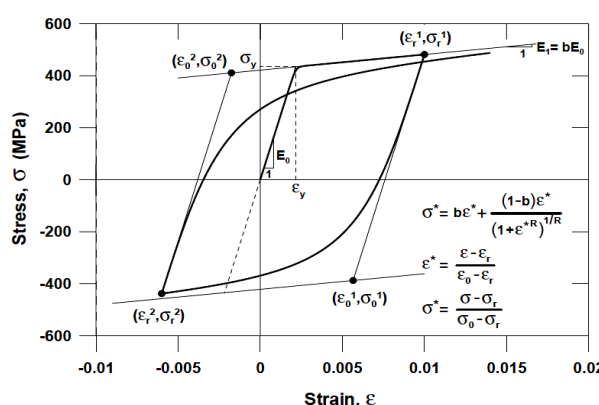
در این تحقیق جهت مدلسازی دیواربرشی از نرم افزار OpenSees استفاده شده است که یک نرم افزار قدرتمند در زمینه تحلیل و بررسی لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. برای مدلسازی به روش فایبر از المان غیرخطی تیر-ستون برحسب جابجایی استفاده شده است. جهت بررسی و پیاده‌سازی المان‌های محوری در روش MVLEM، از مدل فایبر به عنوان مدل مرجع استفاده شده است. بدین منظور در مدل فایبر، رفتار نیرو-جابجایی محوری در المان‌های مرزی در پای دیوار، با انتگرال‌گیری از تنش و کرنش در سطح مورد نظر و با استفاده از برنامه MATLAB تعیین شدند. ابتدا به منظور پیاده‌سازی المان‌های محوری مدل MVLEM از فنرهای محوری مدل ولکانو مطابق شکل (۳) استفاده شده است که به هر فنر رفتار مصالح فولاد و بتن اختصاص داده شده و بخش ترک نیز با المانی تحت عنوان gap مدلسازی شدند. پس از بررسی‌های انجام شده مقدار پارامتر Y که نشان دهنده اثر tension stiffening می‌باشد، برابر با واحد در نظر گرفته شده است، لذا نیازی به تفکیک نمودن بخش ترک‌خورده و ترک‌نخورده نمی‌باشد. همچنین با توجه به نوع رفتار مصالح بتن تعریف شده در برنامه OpenSees، در صورت لحاظ نمودن اثر بسته شدن تدریجی ترک، نیازی به در نظر گرفتن المان gap نیز نمی‌باشد. بنابراین مطابق شکل (۵) مدلی همانند مدل کلوتی حاصل می‌شود. قابل ذکر است که این فنرهای محوری در نرم افزار OpenSees با المان‌های محوری Truss پیاده‌سازی شدند که رفتار مصالح مربوطه به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. در هر دو روش مدلسازی، تعداد ۱۰ المان در طول ارتفاع دیوار در نظر گرفته شده است.

۲-۳) مدل رفتاری مصالح مورد استفاده برای مدل سازی ها

دقت مدل سازی علاوه بر نوع روش مدل سازی به مدل های رفتاری مصالح نیز بستگی دارند. با توجه با امکانات برنامه OpenSees از دستورات Steel02 و ConcreteCM به ترتیب برای مدل سازی رفتار فولاد و بتن استفاده شده است، شکل (۷). مدل رفتاری Steel02 با ایجاد رفتار دوخطی برای معرفی مصالح فولاد قابل استفاده است که اثر بوشینگر را در نظر می گیرد [۳۵]. ConcreteCM برای ایجاد مدل رفتاری بتن بر مبنای مطالعات کلوزواری و همکاران در سال ۲۰۱۵ است [۲۲]. با استفاده از این دستور می توان رفتار چرخه ای بتن محصور نشده و محصور شده را در دو ناحیه فشاری و کششی مدل سازی کرد. در این مدل با تنظیم پارامترها می توان شیب باربرداری را که اثر مستقیم بر باریک شدن^۳ منحنی چرخه ای رفتار نیرو-جابجایی جانبی دیوار برشی دارد تنظیم نمود.



(ب)



(الف)

شکل ۷: الف) مدل رفتاری مصالح فولاد Steel02. ب) مدل رفتاری مصالح بتن ConcreteCM. [۲۲]

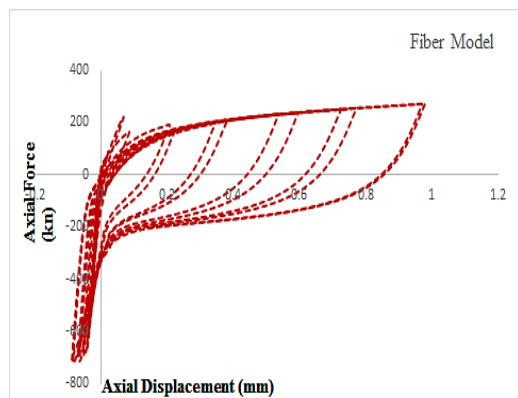
۴- تحلیل استاتیکی غیر خطی

جهت انجام تحلیل ها با توجه به الگوی بارگذاری آزمایشگاه، مدل های دیوار مورد نظر تحت بارگذاری چرخه ای قرارداد شده اند. ابتدا نتایج نیرو-جابجایی جانبی حاصل از مدل تحلیلی فایبر با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. سپس با تعیین رفتار نیرو-تغییر مکان محوری المان های مرزی دیوار در پای دیوار، مدل مناسب برای المان های محوری مدل MVLEM بدست آمده و این مدل نیز پیاده سازی شده است.

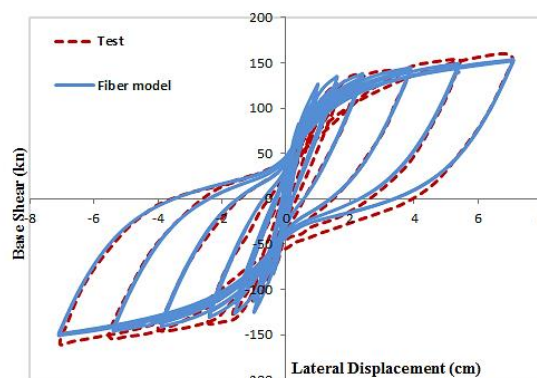
۴-۱) صحت سنجی مدل فایبر با نتیجه مدل آزمایشگاهی

شکل (۸الف) پاسخ نیرو-جابجایی جانبی دیوار با مدل فایبر را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می کند. ملاحظه می شود که پاسخ مدل فایبر تطبیق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. یکی از علت های این تطبیق مناسب را می توان تعریف درست رفتار مصالح فولاد و بتن دانست. زیرا که شکل کلی منحنی رفتار چرخه ای دیوار به مدل فولاد بستگی داشته و میزان باریک شدن این منحنی به مدل تعریف شده برای بتن بستگی دارد. همچنین در شکل (۸ب) رفتار نیرو-تغییر مکان محوری المان مرزی دیوار نشان داده شده است. ملاحظه می شود که این رفتار مشابه مدل های هیستریزس نشان داده شده در شکل های (۴) بوده ولی با هیچ یک از آنها تطبیق کامل ندارد که می توان علت آن را ضعف مدل های ارائه شده و عدم در نظر گرفتن پارامترهای اصلی در مدل سازی دیوار دانست. از طرف دیگر پیاده سازی این مدل های هیستریزس به دلیل پیچیدگی ها سخت بوده اند.

³ Pinching



(ب)

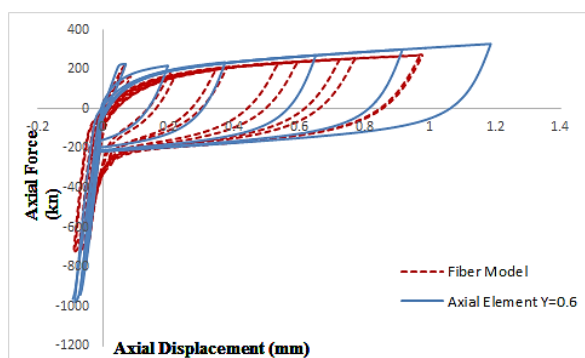


(الف)

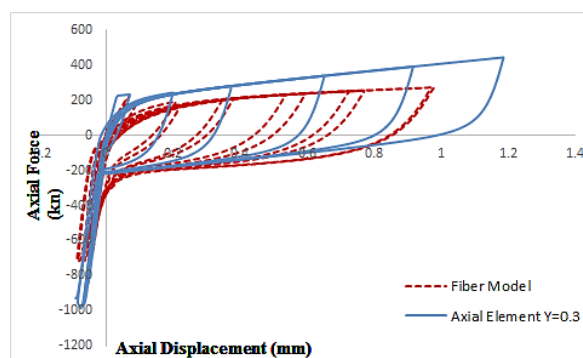
شکل ۸: الف) مقایسه پاسخ نیرو-جابجایی جانبی بدست آمده از مدل فایبر با نتیجه آزمایشگاهی، ب) پاسخ نیرو-جابجایی محوری المان مرزی پای دیوار در مدل فایبر.

۲-۴ مدل MVLEM

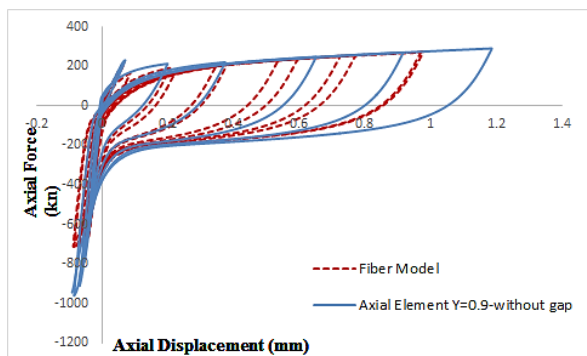
شکل‌های (۹) رفتار یک المان محوری را که نماینده المان مرزی پای دیوار است و همانند المان محوری معرفی شده توسط ولکانو (شکل ۳) مدلسازی شده است را نشان می‌دهد که با رفتار محوری المان مرزی مربوطه در مدل فایبر مقایسه شده اند. ملاحظه می‌شود که با افزایش پارامتر Y رفتار المان محوری به مدل فایبر نزدیکتر شده و در نهایت با در نظر گرفتن $Y=0.9$ رفتار مناسب‌تری حاصل می‌شود. از طرف دیگر با توجه به شکل (۵۹) ملاحظه می‌شود که اگر المان gap که در اینجا برای نشان دادن باز و بسته شدن تدریجی ترک بکار می‌رود از مدل حذف شود، بخش بسته شدن ترک در موقع باربرداری به درستی مدلسازی می‌شود. در مدل ولکانو، علت در نظر گرفتن پارامتر Y و المان gap به ترتیب برای نشان دادن اثر tension stiffening و باز و بسته شدن تدریجی ترک می‌باشد که هیچ‌یک از این عوامل در مدل رفتاری مصالح لحاظ نمی‌شدند ولی با توجه به اینکه مدل رفتاری بتن ConcreteCM این دو ویژگی را شامل می‌شود، نیازی نیست این دو شرایط بطور مستقیم در مدلسازی المان‌های محوری اعمال شوند بلکه در مدل رفتاری بتن مورد نظر به طور مستقیم لحاظ شده اند. بنابراین با در نظر گرفتن مدل رفتاری دقیق‌تر برای مصالح، می‌توان از مدل کلوتی که مدل مناسب‌تری نسبت به مدل ولکانو است برای مدلسازی المان‌های محوری مدل MVLEM برای دیوار برشی بتنی استفاده نمود.



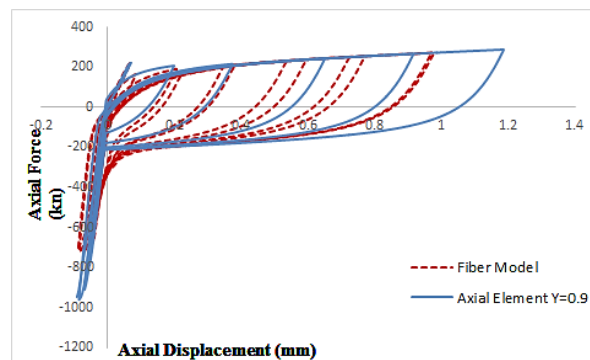
(ب)



(الف)



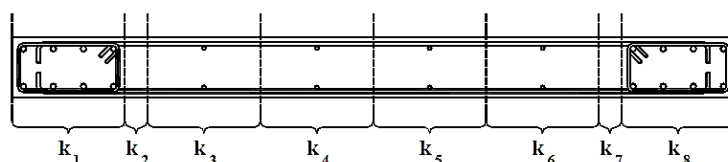
(د)



(ج)

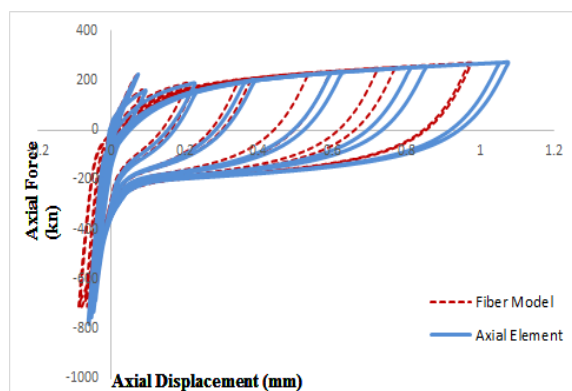
شکل ۹: الف) مقایسه پاسخ نیرو-جابجایی مدل با المان محوری و $Y=0.3$ با پاسخ بدست آمده از مدل فایبر، ب) مقایسه پاسخ نیرو-جابجایی مدل با المان محوری و $Y=0.6$ با پاسخ بدست آمده از مدل فایبر، ج) مقایسه پاسخ نیرو-جابجایی مدل با المان محوری و $Y=0.9$ با پاسخ بدست آمده از مدل فایبر، د) مقایسه پاسخ نیرو-جابجایی مدل با المان محوری و $Y=0.9$ بدون gap با پاسخ بدست آمده از مدل فایبر.

با توجه به شکل (۱۰) مقطع دیوار به هشت قسمت تقسیم شده است و برای هر بخش با توجه به سطح مقطع و مصالح اختصاص شده، المان محوری (شکل (۵)) در نظر گرفته شده است.

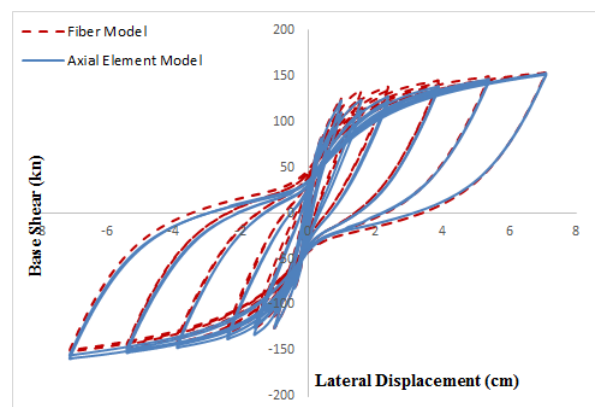


شکل ۱۰: تقسیم بندی مقطع عرضی دیوار و اختصاص المان محوری به هر بخش.

شکل های (۱۱) نتایج حاصل از پاسخ کلی دیوار و رفتار محوری المان مرزی پای دیوار را نشان می‌دهد که تطبیق بسیار خوبی با نتایج حاصل از مدل فایبر داشته‌اند.



(ب)



(الف)

شکل ۱۱: الف) مقایسه پاسخ نیرو-جابجایی جانبی بدست آمده از مدل فایبر و مدل MVLEM با المان محوری پیشنهادی، ب) مقایسه پاسخ نیرو-جابجایی محوری المان مرزی پای دیوار بدست آمده از مدل فایبر و مدل MVLEM با المان محوری پیشنهادی

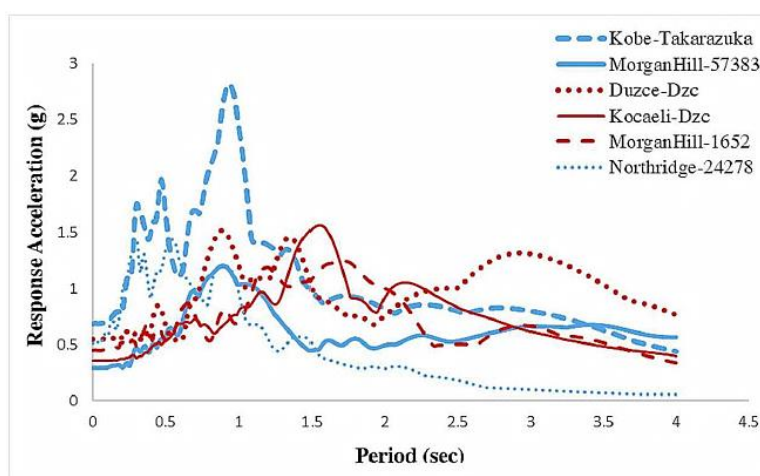
با توجه به پاسخ های نیرو-تغییر مکان کلی سازه حاصل از دو روش مدلسازی برای حالت بارگذاری سیکلیک، مشاهده می گردد که نتایج تطبیق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. علاوه بر این مدل MVLEM با المان محوری تطبیق خوبی با پاسخ بدست آمده از مدل فایبر دارد.

۵- تحلیل دینامیکی غیر خطی

تحلیل لرزه ای سازه ها می تواند پاسخ واقع بینانه تری از رفتار لرزه ای سازه را نتیجه دهد. بنابراین در این تحقیق جهت بررسی قابلیت روش های مدلسازی بکار برده شده، مدل ها تحت شش رکورد زلزله که از پایگاه اطلاعاتی FEMA-440 گرفته شده اند مورد بررسی قرار گرفته اند. مشخصات و طیف پاسخ رکوردها که شامل رکوردهای حوزه دور و نزدیک هستند به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۱۲) نشان داده شده اند.

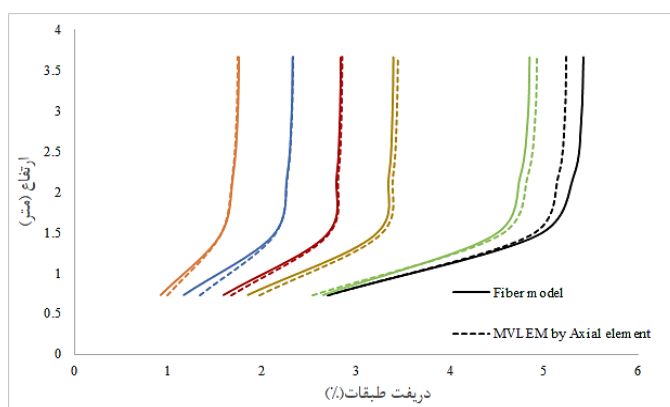
جدول ۲: مشخصات رکوردهای زلزله.

Earthquake Name	Station Name	Near/Far fault	Magnitude (Ms)	PGA (g)	Duration (sec)
Kobe- Takarazuka (R1)	Takarazuka	Near-fault	6.9	0.68	40
Morgan Hill-1652 (R2)	Anderson Dam	Near-fault	6.1	0.45	28
Kocaeli- DZC (R3)	DZC	Near-fault	7.8	0.38	27
Morgan Hill-57383 (R4)	Cilroy, Caviion College Phys Sci Bloy	Far-fault	6.1	0.29	30
Duzce- DZC (R5)	DZC	Near-fault	7.8	0.54	26
Northridge-24278 (R6)	Castaic, Old Ridge Route	Far-fault	6.8	0.51	40



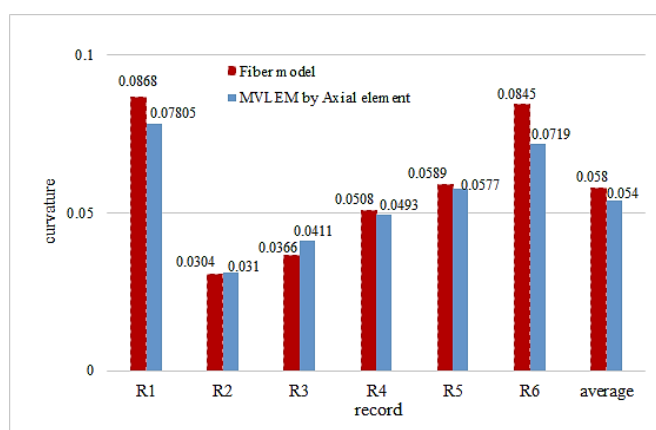
شکل ۱۲: طیف پاسخ رکوردهای زلزله انتخابی.

پریود اولیه دیوار در مدل فایبر برابر با $0/239$ ثانیه و در مدل MVLEM برابر با $0/240$ بدست آمده‌اند. ملاحظه می‌شود که پریود مدل MVLEM ایجاد شده $0/42$ درصد با پریود مدل فایبر فرق دارد که تفاوت بسیار اندکی می‌باشد. در شکل (۱۳) حداکثر جابجایی نسبی برای پنج تراز ارتفاعی که جرم به آن اختصاص داده شده است برای دو مدل فایبر و MVLEM به ازای رکوردهای مختلف نشان داده شده است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که مقدار دررفت طبقات در زلزله های انتخابی دامنه وسیعی از حدود 0.1 تا 0.5 ٪ را پوشش می‌دهد که نشان از رفتار دیوار در سطوح مختلف غیرخطی دارد. ملاحظه می‌شود که در کلیه ۶ رکورد انتخابی، مدل MVLEM تقریب خوبی از میزان دررفت طبقات ارائه می‌دهد.



شکل ۱۳: حداکثر جابجایی نسبی در ارتفاع دیوار برای رکوردهای مختلف

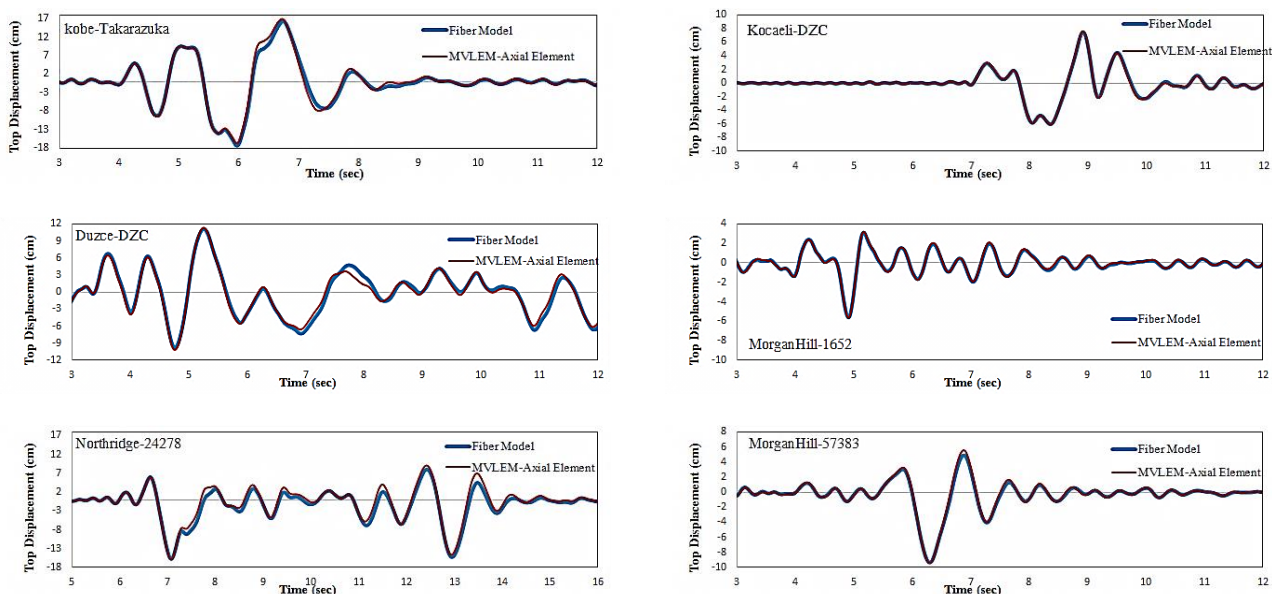
در شکل (۱۴) حداکثر انحنا در پای دیوار که مربوط به حوزه رفتار غیرخطی می‌باشد، تحت رکوردهای مختلف نشان داده شده است. میزان خطا در مقدار متوسط حداکثر انحنا برای مدل MVLEM نسبت به مدل فایبر $6/89$ درصد می‌باشد.



شکل ۱۴: مقدار حداکثر انحنا در پای دیوار برای رکوردهای مختلف

در شکل‌های (۱۵) پاسخ تاریخچه زمانی جابجایی بالای دیوار برای مدل‌های فایبر و MVLEM تحت شش رکورد حوزه دور و نزدیک مقایسه شده‌اند. پاسخ‌ها در بازه زمانی که حداکثر جابجایی اتفاق می‌افتد ارائه شده‌اند. پاسخ‌های لرزه ای بدست آمده نشان می‌دهند که هر دو مدل تحت همه رکوردهای حوزه دور و حوزه نزدیک تطبیق کامل با هم ندارند. حداکثر جابجایی بالای دیوار برای دو مدل در جدول (۳) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که حداکثر تفاوت جابجایی‌های در دو مدل فایبر و MVLEM کمتر از $2/5$

درصد می باشد. همچنین مدت زمان انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی مدل فایبر تقریباً چهار برابر مدت زمان لازم برای مدل MVLEM می باشد.



شکل ۱۵: پاسخ تاریخیچه زمانی جابجایی جانبی دیوار تحت رکوردهای مختلف.

جدول ۳: تفاوت حداکثر جابجایی بالای دیوار در دو مدل برای رکوردهای مختلف

رکورد زلزله	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Fiber model	۱۷/۳۶	۵/۵۹	۷/۴۵	۹/۳۱	۱۱/۱۰	۱۵/۶۹
MVLEM by Axial element	۱۶/۹۴	۵/۶۲	۷/۵۹	۹/۴۱	۱۱/۳۴	۱۵/۸۵
درصد تفاوت دو مدل	-۲/۴۲	۰/۵۴	۱/۸۸	۱/۰۷	۲/۱۲	۱/۰۲

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق پاسخ غیرخطی دیوار برشی بتنی با استفاده از روش‌های ماکرو ارزیابی شده‌اند. از مدل فایبر به عنوان مدل دقیق و مدل MVLEM به عنوان مدل ساده‌شده استفاده شده است. در مدل MVLEM جهت سادگی از دو فنر موازی برای فولاد و بتن استفاده شده است. مدل‌های رفتاری مصالح برای این فنرها، قابلیت در نظر گرفتن باز و بسته شدن تدریجی ترک و سخت شوندهگی کششی را نیز دارا می باشند. ارزیابی مدل ساده شده بر اساس نتایج تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی نشان می دهد که مدل ساده شده از دقت بالایی برخوردار است در حالی که زمان تحلیل را نسبت به مدل فایبر در حدود یک چهارم کاهش می دهد.

مراجع

- [1] Nakashima, M., Ogawa, K., & Inoue, K. (2002). Generic frame model for simulation of earthquake responses of steel moment frames. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3), 671-692.
- [2] Khaloo, A. R., & Khosravi, H. (2013). Modified fish-bone model: A simplified MDOF model for simulation of seismic responses of moment resisting frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55, 195-210.
- [3] Palermo, D., & Vecchio, F. J. (2007). Simulation of cyclically loaded concrete structures based on the finite-element method. *Journal of Structural Engineering*, 133(5), 728-738.
- [4] Mansour, M., & Hsu, T. T. (2005). Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. I: Experiments. *Journal of Structural Engineering*, 131(1), 44-53.
- [5] Mansour, M., & Hsu, T. T. (2005). Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. II: Theoretical model. *Journal of Structural Engineering*, 131(1), 54-65.
- [6] Park, H. G., & Klingner, R. E. (1997). Nonlinear analysis of RC members using plasticity with multiple failure criteria. *Journal of Structural Engineering*, 123(5), 643-651.
- [7] PERFORM C (2006) 3D: Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures. Computers and Structures, Inc., Berkeley, California
- [8] Prakash V, Powell GH, Campbell S (1993) DRAIN- 2DX Base Program Description and User Guide-Version 1.10. Report No. UCB/SEMM-93/17, Proceedings, Structural Engineering Mechanics and Materials, University of California, Berkeley, CA.
- [9] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) (2001) Open system for earthquake engineering simulation. Berkeley, CA: University of California at Berkeley.
- [10] Taucer, F., Spacone, E., & Filippou, F. C. (1991). A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures (Vol. 91, No. 17). Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.
- [11] Petrangeli, M., Pinto, P. E., & Ciampi, V. (1999). Fiber element for cyclic bending and shear of RC structures. I: Theory. *Journal of Engineering Mechanics*, 125(9), 994-1001.
- [12] Petrangeli, M. (1999). Fiber element for cyclic bending and shear of RC structures. II: Verification. *Journal of engineering mechanics*, 125(9), 1002-1009.
- [13] Corley, W. G., Derecho, A., & Takayanagi, T. (1979). Analysis of inelastic shear deformation effects in reinforced concrete structural wall systems. Portland Cement Association.
- [14] Prestandard, F. E. M. A. (2000). Commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356). Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7.
- [15] Kabeyasawa, T., Shiohara, H., Otani, S., & Aoyama, H. (1983). Analysis of the full-scale seven-story reinforced concrete test structure. *Journal of the Faculty of Engineering*, 37(2), 431-478.
- [16] Vulcano, A., & Bertero, V. V. (1987). Analytical models for predicting the lateral response of RC shear walls: Evaluation of their reliability (p. 92). Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.
- [17] Vulcano, A., Bertero, V. V., & Colotti, V. (1988). Analytical modeling of RC structural walls. In Proceedings of 9th world conference on earthquake engineering (Vol. 6, pp. 41-46).

- [18] Massone, L. M., & Wallace, J. W. (2004). Load-deformation responses of slender reinforced concrete walls. *Structural Journal*, 101(1), 103-113.
- [19] Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2004). Nonlinear modeling and analysis of slender reinforced concrete walls. *ACI Structural Journal*, (5), 688-698.
- [20] Kolozvari, K., Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2014). Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. i: Theory. *Journal of Structural Engineering*, 141(5), 04014135.
- [21] Kolozvari, K., Tran, T. A., Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2014). Modeling of cyclic shear-flexure interaction in reinforced concrete structural walls. II: Experimental validation. *Journal of Structural Engineering*, 141(5), 04014136.
- [22] Kolozvari, K., Orakcal, K., & Wallace, J. W. (2015). Shear-Flexure Interaction Modeling of reinforced Concrete Structural Walls and Columns under Reversed Cyclic Loading. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, PEER Report, (2015/12).
- [23] Kolozvari, K., & Wallace, J. W. (2016). Practical nonlinear modeling of reinforced concrete structural walls. *Journal of Structural Engineering*, 142(12), G4016001.
- [24] Kim, D. K. (2016). Seismic response analysis of reinforced concrete wall structure using macro model. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(1), 99.
- [25] Bao, Y., & Kunnath, S. K. (2010). Simplified progressive collapse simulation of RC frame-wall structures. *Engineering Structures*, 32(10), 3153-3162.
- [26] Fischinger, M., Rejec, K., & Isaković, T. (2012, September). Modeling inelastic shear response of RC walls. In *Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering (Vol. 2120)*.
- [27] Magna, C. E., & Kunnath, S. K. (2012). Simulation of Nonlinear Seismic Response of Reinforced Concrete Structural Walls. In *15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [28] Colotti, V. (1993). Shear behavior of RC structural walls. *Journal of Structural Engineering*, 119(3), 728-746.
- [29] Belarbi, A., & Hsu, T. T. (1994). Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete. *Structural Journal*, 91(4), 465-474.
- [30] Pang, X. B. D., & Hsu, T. T. (1995). Behavior of reinforced concrete membrane elements in shear. *Structural Journal*, 92(6), 665-679.
- [31] Fischinger, M., Vidic, T., Selih, J., Fajfar, P., Zhang, H. Y., & Damjanic, F. B. (1990). Validation of a macroscopic model for cyclic response prediction of RC walls. *Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures*, 2, 1131-1142.
- [32] Fischinger, M. A. T. E. J., Vidic, T. O. M. A. Ž., & Fajfar, P. (1992). Nonlinear Seismic Analysis of Structural Walls Using the Multiple-Vertical-Line-Element Model'. *Nonlinear Seismic Analysis of RC Buildings*, H. Krawinkler and P. Fajfar (eds.), Elsevier Science Publishers Ltd, London and New York, 191-202.
- [33] Linde, P., & Bachmann, H. (1994). Dynamic modelling and design of earthquake-resistant walls. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 23(12), 1331-1350.
- [34] Thomsen, J. H., & Wallace, J. W. (1995). Displacement-based design of RC structural walls: an experimental investigation of walls with rectangular and T-shaped cross-sections. Clarkson University, Department of Civil Engineering.
- [35] Filippou, F. C., Bertero, V. V., & Popov, E. P. (1983). Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints.