

A Simplified Model for Dual Wall-Frame System*

Research Article

Parisa Esmaeiltabar¹ Horr Khosravi²
Javad Vaseghi³

1. Introduction

The use of fiber modeling method for nonlinear modeling of reinforced concrete shear wall is widespread. In this method, by using fiber elements that are based upon the stress-strain relationships of materials, extensive plasticity behavior is explored along the entire length of the element. In order to model shear wall details, the fiber model is commonly used. Among the simplified models presented for shear wall, the multi vertical line element model, called MVLEM, is used as an efficient simplified model to model the nonlinear behavior of reinforced concrete shear wall. In this model, the wall is modeled with uniaxial elements with stiffness k_1 to k_n in parallel, a rigid axial element in the center of the wall and rigid beams above and below the floor level. The stiffness characteristics and force-displacement relationship of axial elements depend on the structural stress-strain relationships of concrete and steel and the surface attributed to each element. Among the simplified models for concrete resisting frames, the substitute frame model is suitable, which concentrates on the stiffness and strength of the elements of an n-frame to a single frame. Due to the importance of studying the behavior of the dual wall-frame system, there is a necessity for a simplified model that can analyze the seismic behavior of the system with less time and maximum accuracy. Therefore, in this research, a simplified model for this system is proposed.

2. The proposed Simplified Model

In this research, a model for a regular dual system in plan with the same span is proposed, which is a combination of simplified models of shear wall and moment resisting frame (Figure 1). For simplified modeling of shear wall, MVLEM is used to substitute frame for moment resisting frame. These two sections are connected to each other by connection beams. These interface beams represent the beams between the frame and the wall in the original model. The important difference between the wall-frame model proposed in this simplified model is the interface element between the frame and the wall, which has been previously used as rigid elements.

3. Modeling Method

To evaluate the proposed simplified wall-frame model, a

regular ten-storey building that is symmetrical in two directions was designed. This model is the main model or reference model and the proposed simplified model is compared with it. Due to the symmetry of the structure in two directions, the model with details includes three frames that are connected as a rigid floor (see Figure 2).

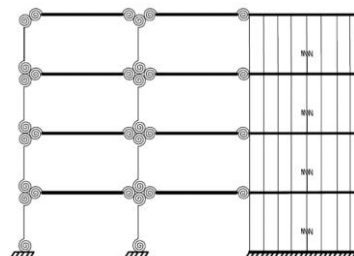


Figure 1. Simplified model proposed for dual system of bending frame and shear wall

The detailed model was modeled as a reference model or main model in OpenSees software. In this model, two beam-column elements with fiber cross section in each floor were employed to model the shear wall. The beams and columns of the frame are also modeled in the form of concentrated plasticity, i.e., an elastic element with two concentrated springs at both ends of the element which illustrate the non-linearity of the member.

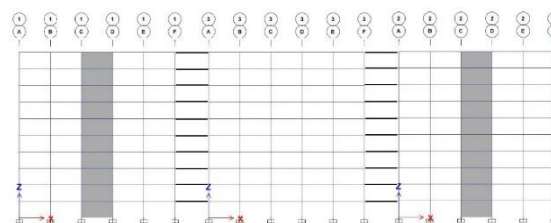


Figure 2. The model with dual frame-wall system details

In the simplified model, one frame is used as a substitute for nine frames of the main system and one wall is used as a replacement for two walls in the main system. The interface beam between the wall and the frame in the simplified system also replaces the four interface beams in the main system. For modeling the wall, in the simplified model, two MVLEM elements are placed in each floor and the number of axial elements in the cross section of the wall is six elements, i.e., two axial elements for the border columns of the wall and four axial elements that form the wall existence. In defining the parameters of the end springs of frame beams and interface beams, the stiffness and anchor parameters in the spring are equivalent to simplified models equal to the sum of the corresponding

* Manuscript received: December, 10, 2021, Revised, February, 08, 2022, Accepted, February, 27, 2022.

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

² Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Email: khosravi@nit.ac.ir

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

parameters in the original model (parallel to the total springs). Other parameters are averaged.

4. The Evaluation of the Proposed Simple Model

To evaluate the simple model and compare it with the reference model, cyclic nonlinear static analysis and nonlinear dynamic analysis were used. Table 1 presents the modal period of the first three structural modes for both the main and simplified models. The main period of the structure in the two models shows a slight difference of 0.142%, which can indicate that the proposed simplified model correctly models the initial stiffness of the structure and delivers an accurate estimation of the main rotation time of the structure.

Table 1. Modal Period of the first three modes of the structure

Modal Period	Original Model	Simplified Model
T ₁	0.6335	0.6326
T ₂	0.1317	0.1308
T ₃	0.0506	0.0497

In order to better understand the overall nonlinear behavior of the structure, Figure 3 shows the cyclic pushover curves for the whole structural system, which shows that the behavior of the two models during loading and unloading is well matched and shows almost the same yield capacity (see Figure 3).

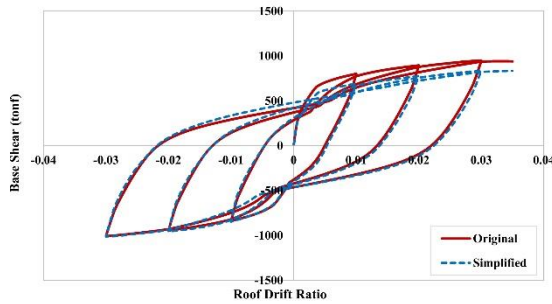


Figure 3. Cyclic pushover curve

For more accurate evaluation of the structural response by two main and simplified models, two categories of near-fault and far-fault records were used. One of the important parameters that are considered in the evaluation of seismic behavior and structural damage in earthquake engineering is the relative displacement of floors or drift. In this research, this parameter was used to investigate the structural responses with two main and simplified models. Figure 4 shows the drift in the height of the building. Each gray color curve shows the drift in the original model for each earthquake record. In addition, the average drift of all records for both the main and simplified models are shown. As shown, the drift of the upper floors is higher than that of the lower floors. In other words, the drift of the floors is affected by the function of the wall. Moreover, due to the average drift, the response obtained from the two main and simplified models under near fault records show less difference.

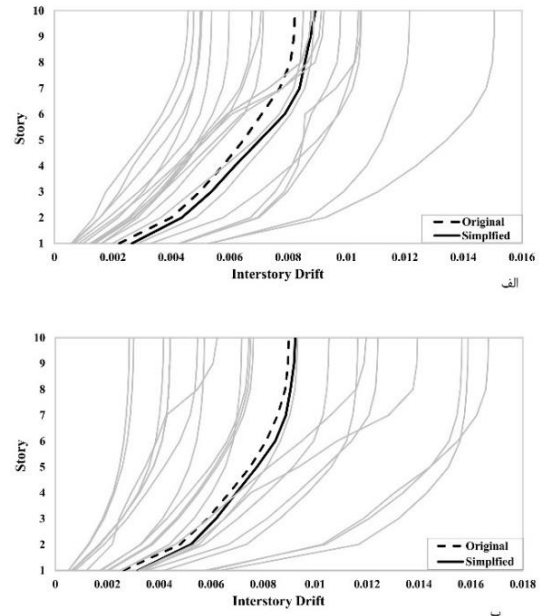


Figure 4. distribution of drift under (a) far-field records and (b) near-field records

Figures 5 show the examples of time history response of the roof displacement ratio for the original and simplified models, under far-field records and near-field records. As can be seen, the changing procedure of response during the time is similar for both far and near field record groups in the two main and simplified models, but there are differences in maximum displacements and permanent deformation for some earthquake records.

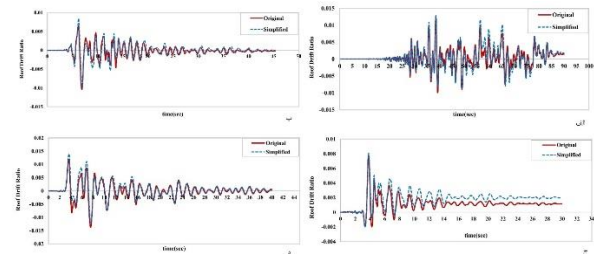


Figure 5. Time history of roof displacement under records (a) far feiuld record FEMA695ChiChiCHY101, (b) far feiuld record HectorMineHector, (c) near feiuld record Morgan Hill, and (d) near feiuld record Northridge-01

5. Conclusion

The results of nonlinear analysis for 40 near-fault and far-fault earthquake records show that the simplified model predicts drifts with an error of less than 20%. Furthermore, the time required to analyze a simplified model is about 30 times less than the time required to analyze a detailed model.

یک مدل ساده شده برای سیستم دوگانه قاب خمشی - دیوار برشی*

مقاله پژوهشی

پریسا اسماعیل تبار نشلی^(۱) حر خسروی^(۲) جواد وائقی امیری^(۳)

چکیده در آنالیزهای حجیم دینامیکی هزینه محاسباتی و زمان تحلیل بالا است، لذا نیاز به مدل‌های ساده شده‌ای می‌باشد که در مقایسه با مدل دارای جزئیات با دقت مناسب و قابل قبول، زمان فرآیند تحلیل را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. در این تحقیق مدل ساده شده چند درجه آزادی برای سیستم دوگانه قاب خمشی - دیوار برشی با پلان منظم پیشنهاد شده است. برای دیوار برشی از مدل MVLEM و برای قاب خمشی از مدل قاب جایگزین بهره گرفته شده است. مدل MVLEM از المان‌های محوری تشکیل شده است که رفتار خمشی دیوار برشی را به خوبی مدل‌سازی می‌کنند و مدل قاب جایگزین نیز مدل قاب یک‌دهانه‌ای است که جایگزین قاب‌های خمشی بتنی چنددهانه مدل می‌شود. در انتها دقت و سرعت مدل ساده شده نسبت به مدل اصلی دارای جزئیات بررسی گردید. نتایج آنالیزها نشان می‌دهد که مدل ساده شده پاسخ‌های لرزه‌ای را با خطای کمتر از ۲۰ درصد و با زمان آنالیز کمتر از ۳۰ برابر نسبت به مدل دارای جزئیات ارائه می‌دهند.

واژه‌های کلیدی مدل‌های ساده شده، سیستم دوگانه قاب خمشی - دیوار برشی، مدل MVLEM، مدل قاب جایگزین، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

مقدمه

به‌طور مستقیم بر مبنای رفتار ساختاری مصالح می‌باشد پیشنهاد کردند و در برنامه OpenSees نیز پیاده‌سازی نمودند. در سال ۲۰۱۹ اسماعیل تبار و همکاران [۱۴] با استفاده از مدل MVLEM در برنامه OpenSees مقایسه‌ای را میان مدل‌های تحلیلی و مدل‌های رفتاری مختلف مصالح به منظور بررسی رفتار غیرخطی دیوار برشی ارائه کرده‌اند [13].

از میان مدل‌های ساده شده‌ای که برای قاب خمشی ارائه شده است می‌توان به مدل استخوان ماهی که اولین بار توسط ناکاشیما و همکاران [15] پیشنهاد شده است اشاره کرد. مدل استخوان ماهی شامل یک ستون می‌باشد که معادل تمامی ستون-های یک طبقه است و تمامی تیرهای یک طبقه به دو نیم‌تیر که از دو طرف ستون معادل گسترش یافته‌اند و در انتها بر روی تکیه‌گاه غلتکی قرار می‌گیرند، تبدیل می‌شوند. این مدل توسط خسروی و خالو [16,17] برای قاب‌های فولادی اصلاح گردید و توسط سلیمانی و خسروی برای قاب‌های بتنی توسعه داده شده است که یکی از مدل‌های ارائه شده برای قاب بتنی مدل قاب جایگزین می‌باشد. در سال‌های اخیر محققان زیادی از خانواده مدل‌های استخوان ماهی به عنوان مدل ساده شده قاب خمشی،

استفاده از روش مدل‌سازی فایبر جهت مدل‌سازی غیرخطی دیوار برشی بتن‌آرمه بسیار متداول می‌باشد. در این روش با استفاده از المان‌های فایبر که بر اساس روابط تنش- کرنش مصالح می‌باشند، در کل طول المان رفتار پلاستیسیتیته گسترده در نظر گرفته می‌شود [1-3]. از سال ۱۹۸۳ به بعد با ارائه مدل سه‌المان محوری قائم (Three Vertical Line Element Model) که توسط کابایاساوا و همکاران [4] پیشنهاد شده است، مدل‌هایی که مبتنی بر المان‌های محوری قائم می‌باشند ارائه شدند که هم‌چنان در حال توسعه می‌باشند. این مدل در سال‌های ۱۹۸۷ و ۱۹۸۸ توسط ولکانو و همکاران [5] اصلاح گردید و تحت عنوان مدل چندالمان محوری قائم (Multi Vertical Line Element Model) نام‌گذاری شد که رفتارهای خمشی دیوار را به خوبی مدل‌سازی می‌کند [6]. ماسون و والاس [7] این مدل را برای در نظر گرفتن اندرکنش برش و نیروی محوری اصلاح کردند. اراکال و والاس [8] مدل MVLEM را به‌طور مستقیم بر اساس روابط ساختاری مصالح تحت بارگذاری سیکلیک ارائه کردند. کلوزواری و والاس [9-12] مدل MVLEM را که اندرکنش خمش و برش را در نظر می‌گیرد و

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۹/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۲/۸ می‌باشد.

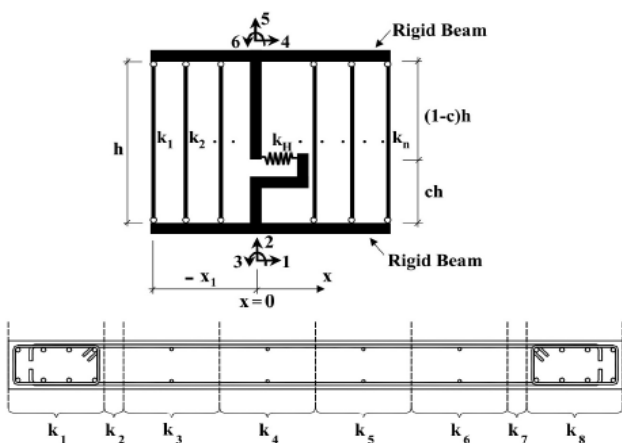
(۱) دانش آموخته دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

(۳) استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

و سطح نسبت داده‌شده به هر المان بستگی دارد. چرخش نسبی المان دیوار حول نقطه‌ای به ارتفاع ch روی محور مرکزی دیوار اتفاق می‌افتد که بیانگر تغییر جایگاه تار خنثی در مقطع دیوار می‌باشد. انتخاب پارامتر c بستگی به توزیع خمش در ارتفاع دیوار دارد که برای انحنای ساده بین صفر و یک متغیر است. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که مقدار $c=0.4$ می‌تواند بهترین نقطه برای مرکز دوران باشد [7]. پاسخ غیرخطی برشی دیوار توسط فنر افقی با سختی k_H در نظر گرفته می‌شود که در ارتفاع ch قرار داده می‌شود. باتوجه به این که در این تحقیق تمرکز بر روی پاسخ‌های خمشی سیستم دوگانه می‌باشد برای فنر برشی یک سختی الاستیک با مقدار زیاد در نظر گرفته شده است.

برای مدل ساده‌شده قاب خمشی، از مدل قاب جایگزین پیشنهادشده توسط سلیمانی و همکاران مطابق شکل (۲) استفاده شده است [17]. در این مدل باتوجه به این که چرخش گره‌های یک طبقه تقریباً یکسان است می‌توان سختی تیرها و ستون‌ها را به صورت سختی‌های موازی در نظر گرفت و قابل جمع شدن می‌باشند و بنابراین می‌توان قاب چنددهانه را با قاب یک‌دهانه جایگزین کرد. به طور خلاصه مدل قاب جایگزین سختی و مقاومت المان‌های یک قاب n دهانه را به یک قاب یک‌دهانه متمرکز می‌کند. رفتار و تغییرشکل‌های تیر اصلی و حتی انحنای ساده تیر می‌تواند با استفاده از یک تیر با طول کامل که اجازه حرکت خط تأثیر را می‌دهد شبیه‌سازی شود. علاوه بر این تغییرشکل‌های خمشی قاب اصلی می‌تواند با کشیدگی و انقباض ستون‌های قاب جایگزین به دست آید.



شکل ۱ مدل MVLEM برای دیوار برشی [8]

به خصوص در آنالیزهای حجیم بهره گرفته‌اند [18-27]. به منظور بررسی رفتار غیرخطی سیستم‌های دوگانه مطالعاتی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مدل تیر پیوسته اشاره کرد که اولین بار توسط خان و ابارونیز به منظور بررسی اندرکنش قاب خمشی و دیوار برشی ارائه شد [28]. در این روش سازه با دیوار برشی با سختی یک‌نواخت، می‌تواند به عنوان یک سیستم پیوسته معادل که شامل ترکیبی از طره خمشی و طره برشی می‌باشد مدل‌سازی شود. هم‌چنین در تحقیقی که توسط هوآنگ و کوآنگ [29] صورت گرفته است از این تکنیک پیوسته برای تخمین پاسخ لرزه‌ای سازه‌های با دیوار برشی با سختی یک‌نواخت در ساختمان‌های بلند استفاده شده است. مدل‌های ساده‌شده دیگری نیز برای سیستم دوگانه قاب خمشی - دیوار برشی ارائه شده است که از مدل‌های ساده‌شده MVLEM برای مدل‌سازی دیوار برشی استفاده شده است [30-34]. در اکثر این مدل‌ها اندرکنش بین قاب و دیوار با المان صلب لحاظ شده است. باتوجه به تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است و باتوجه به اهمیت بررسی رفتار سیستم دوگانه قاب-دیوار برشی، نیاز به مدل ساده‌شده‌ای می‌باشد که بتوان رفتار لرزه‌ای سیستم را با صرف زمان کمتر و با حداکثر دقت آنالیز و بررسی کرد؛ لذا در این تحقیق باتوجه به مدل‌های ساده‌شده‌ای که برای هر یک از سیستم‌های قاب خمشی و دیوار برشی به طور جداگانه ارائه شده است مدل ساده‌شده‌ای برای سیستم دوگانه پیشنهاد شده است.

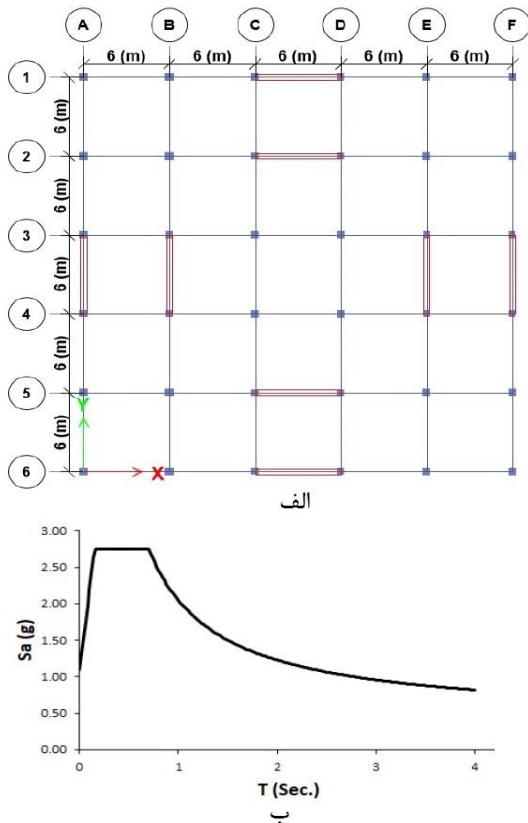
پیشنهاد یک مدل ساده‌شده

به طور معمول از مدل فایبر برای مدل‌سازی با جزئیات دیوار برشی استفاده می‌شود. از میان مدل‌های ساده‌شده‌ای که برای دیوار برشی ارائه شده است مدل چندالمان محوری خطی تحت عنوان مدل MVLEM به عنوان مدل ساده‌شده کارا برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی دیوار برشی بتن‌آرمه استفاده می‌شود. این مدل بر پایه مدل ارائه‌شده توسط ولکانو و همکاران می‌باشد [6]. در این مدل، مطابق شکل (۱) دیوار با المان‌های تک محوری با سختی k_1 تا k_n به صورت موازی، یک المان صلب محوری در مرکز دیوار و تیرهای با صلبیت بی‌نهایت در بالا و پایین تر از طبقه مدل می‌شود. مشخصات سختی و رابطه نیرو- تغییر مکان المان‌های محوری به روابط ساختاری تنش- کرنش بتن و فولاد

مدل ساختمانی

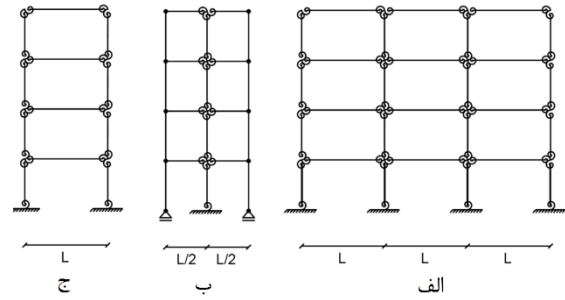
به منظور ارزیابی سیستم ساده شده پیشنهادی قاب خمشی - دیوار برشی بتنی، یک ساختمان ده طبقه طراحی شده است (شکل ۴- الف). این مدل به عنوان مدل اصلی یا مدل مرجع است و مدل ساده شده پیشنهادی با آن مقایسه می گردد.

ساختمان در دو جهت متقارن است و دارای پنج دهانه ۶ متری و با ارتفاع طبقات ۳/۲ متر می باشد. بار مرده و زنده کف طبقات به ترتیب ۵ و ۲ کیلونیوتن بر متر مربع د نظر گرفته شده است. برای تعیین بار طراحی لرزه ای بر اساس آیین نامه 7-10 ASCE/SEI، طیف پاسخ طراحی برای خاک نوع D واقع در منطقه کالیفرنیا با ($S_1 = 0. S_s = 1.25$)، تعیین شده است. طیف طراحی سازه در شکل (۴- ب) نشان داده شده است.



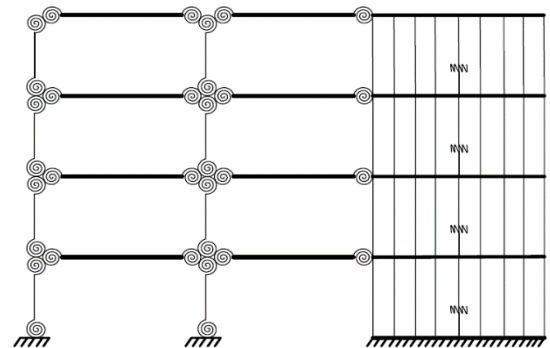
شکل ۴ ساختمان ده طبقه مورد بررسی: (الف) پلان سازه، (ب) طیف طراحی سازه

باتوجه به تقارن سازه در دو جهت، مدل با جزئیات مطابق شکل (۵) انتخاب شده است؛ یعنی قاب های شماره ۱، ۲ و ۳ در نظر گرفته شده اند که به صورت طبقه صلب به هم وصل شده اند.

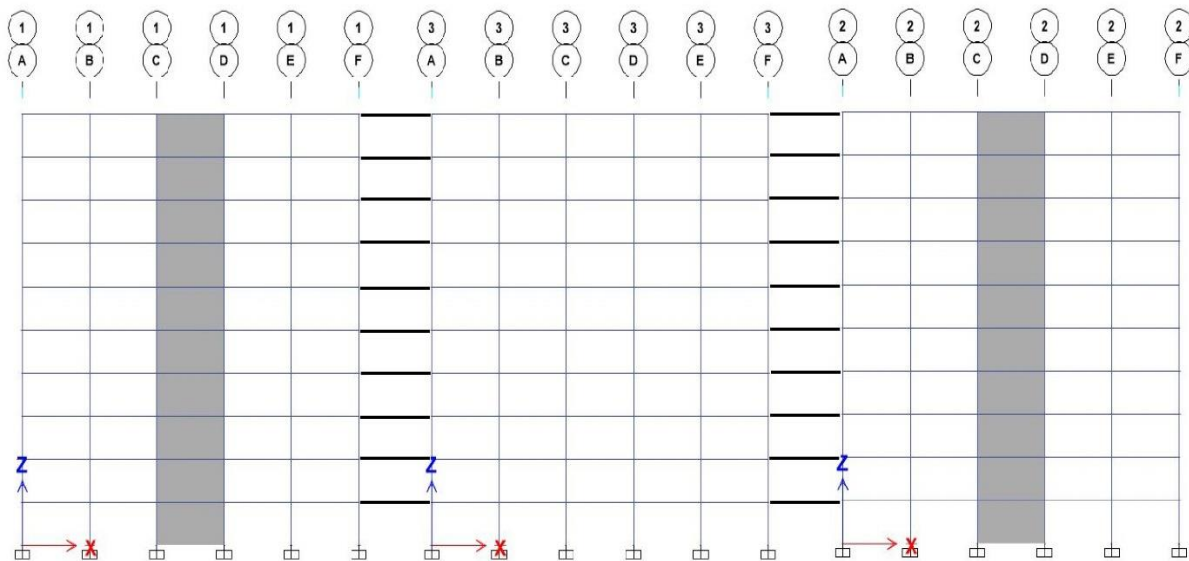


شکل ۲ مدل های قاب: (الف) CMRF، (ب) MFB و (ج) SF [20]

در قاب خمشی بتنی برخلاف قاب خمشی فولادی، ظرفیت لنگر مثبت و منفی تیرها با هم برابر نیست که این موضوع سبب تقدم و تأخر مفصل شدن دو انتهای تیر می شود. به این معنی که وقتی قاب خمشی بتن آرمه تحت بارگذاری جانبی قرار می گیرد، یک انتهای تیر که ظرفیت کمتری دارد زودتر تسلیم می شود و بنابراین نقطه عطف در وسط تیر قرار نمی گیرد. این مشکل در مدل یک دهانه قاب جایگزین برطرف شده است. تمام پارامترهای این مدل مانند مدل MFB است ولی چون مدل دارای دو ستون است، EI و M_y ستون ها در این مدل برابر نصف مقادیر متناظر در تک ستون مدل MFB می باشد. هم چنین مساحت ستون ها باید برابر مساحت المان های خرابایی دو طرف مدل MFB لحاظ شود. در این تحقیق مدلی برای سیستم دو گانه منظم در پلان و دارای دهانه های یکسان پیشنهاد شده است که ترکیبی از مدل های ساده شده دیوار برشی و قاب خمشی می باشد (شکل ۳). برای دیوار برشی از مدل ساده شده MVLEM و برای قاب خمشی از مدل ساده شده قاب جایگزین استفاده شده است که توسط تیرهای رابطی به یکدیگر متصل شده اند. این تیرهای رابط نماینده تیرهای بین قاب و دیوار در مدل اصلی می باشند.



شکل ۳ مدل ساده شده پیشنهاد شده برای سیستم دو گانه قاب خمشی و دیوار برشی



شکل ۵ مدل دارای جزئیات سیستم دوگانه قاب-دیوار

جدول ۱ مشخصات مقاطع تیرها و ستون قاب‌های ۲، ۱ و ۳

شماره قاب	طبقه اول- سوم	طبقه چهارم- ششم	طبقه هفتم و هشتم	طبقه نهم و دهم
ستون‌های قاب ۱ و ۲	C55-16T18	C50-16T16	C45-16T16	C40-16T16
ستون‌های قاب ۳	C50-16T16 C55-16T18	C45-16T16 C50-16T16	C40-16T16 C45-16T16	C35-16T12 C40-16T16
ابعاد تیرها	B55*55	B50*50	B45*45	B40*40

جدول ۲ مشخصات مقاطع دیوارهای قاب‌های ۲، ۱

مشخصات دیوار	طبقه اول و دوم	طبقه سوم و چهارم	طبقه پنجم و ششم	طبقه هفتم و هشتم
ضخامت دیوار و میلگرد طولی	40 cm T10@300	35 cm T10@300	30 cm T10@300	25 cm T10@300
ابعاد و میلگرد المان مرزی	C65*65-24T28	C60*60-24T25	C55*55-24T20	C50*50-20T18

دسته‌ای از رشته یا فیبرهای محوری که براساس روابط تنش- کرنش محوری مصالح می‌باشند، تقسیم می‌شود. در مدل فایبر دیوار برشی بخش هسته و پوسته المان‌های مرزی با مدل‌های رفتاری محصورشده و غیرمحصورشده از هم تفکیک شده‌اند. تیر و ستون‌های قاب نیز به صورت پلاستیسیته متمرکز مدل‌سازی شده‌اند یعنی یک المان الاستیک به همراه دو فنر متمرکز در دو انتهای این المان که غیرخطی شدن عضو را نشان می‌دهند. مدل رفتاری این فنرها مدل رفتاری ایبارا-مدینا-کراوینکلر و مطابق شکل (۶) می‌باشد که در این تحقیق براساس روابط هستلوتن برای سازه بتنی مورد استفاده قرار گرفته‌است.

در جدول (۱) مشخصات تیرها و ستون‌ها ارائه شده‌است. تمام تیرهای یک طبقه تیپ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مشخصات مقطع عرضی تمام دیوارها در جدول (۲) نشان داده شده‌اند. دیوارها در هر دو طبقه تیپ در نظر گرفته شده‌اند.

مدل‌سازی غیرخطی

مدل دارای جزئیات

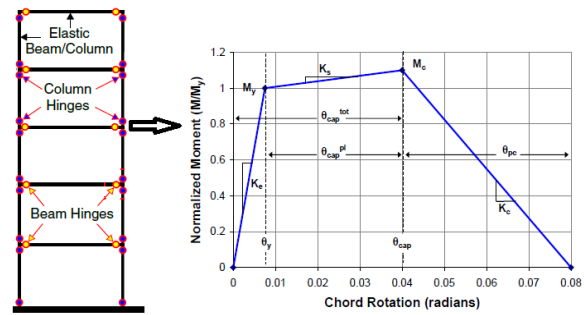
مدل دارای جزئیات به عنوان یک مدل مرجع یا مدل اصلی در نرم‌افزار آپن‌سیس (OpenSees) مدل‌سازی شده‌است. در این مدل برای مدل‌سازی دیوار برشی از دو المان تیر-ستون با مقطع فایبر در هر طبقه استفاده شده‌است به طوری که مقطع عرضی المان به

مدل ساده شده

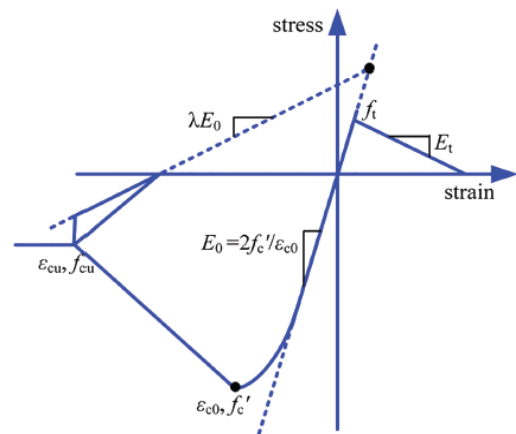
به منظور ارائه مدل ساده شده برای سیستم دوگانه قاب خمشی و دیوار برشی مطابق شکل (۳)، از سه قاب متصل بهم به عنوان مدل اصلی یا مدل دارای جزئیات مطابق شکل (۵) استفاده شده است؛ لذا در مدل ساده شده از یک قاب به عنوان جایگزین نه قاب سیستم اصلی (دو قاب از سیستم ۱، دو قاب از سیستم ۲ و پنج قاب از سیستم ۳) و یک دیوار به عنوان جایگزین دو دیوار در سیستم اصلی قاب‌های ۱ و ۲ استفاده شده است. تیر واسط بین دیوار و قاب در سیستم ساده شده نیز جایگزین چهار تیر واسط در سیستم اصلی قاب‌های ۱ و ۲ می‌باشد.

برای مدل‌سازی دیوار در مدل ساده شده از مدل MVLEM استفاده شده است، به طوری که در هر طبقه دو المان MVLEM قرار داده شده است و تعداد المان‌های محوری در مقطع عرضی دیوار شش المان می‌باشد یعنی دو المان محوری برای ستون‌های مرزی دیوار و چهار المان محوری که جان دیوار را تشکیل می‌دهند. با توجه به امکانات برنامه آپن سیس، برای مدل‌سازی این المان‌های محوری از المان‌های تراس استفاده شده است که مدل رفتاری و سطح مقطع بتن و فولاد به آن اختصاص داده می‌شود. در مدل ساده شده سطح مقطع بتن و میلگردهای دیوار در المان‌های محوری به‌ازای دو دیوار دو برابر شده‌اند.

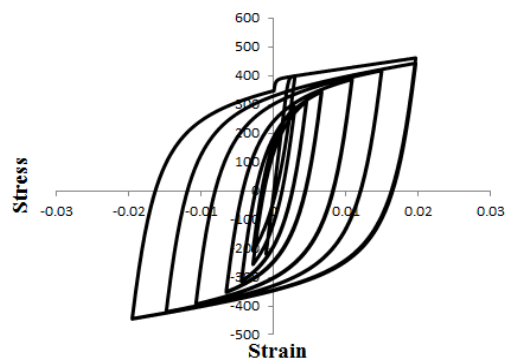
در تعریف پارامترهای فنرهای انتهایی تیرهای قاب و تیرهای رابط، پارامترهای سختی و لنگر تسلیم در فنر معادل مدل‌های ساده شده برابر با مجموع پارامترهای متناظر در مدل اصلی (مجموع موازی فنرها) می‌باشد، یعنی برای تیرهای قاب برابر با مجموع نه پارامتر از تیرهای قاب‌های ۱، ۲ و ۳، و برای تیر واسط برابر با مجموع چهار پارامتر از چهار تیر واسط در قاب‌های اصلی ۱ و ۲ است. سایر پارامترها از جمله پارامترهای زوال مانند M_c/M_y و θ_p به صورت میانگین در نظر گرفته شده‌اند. در تعیین پارامترهای فنرهای غیرخطی ستون پارامترهای سختی و لنگر تسلیم در فنر معادل مدل‌های ساده شده، برای ستون متصل به دهانه دیوار (ستون چپ) از برآیند مشخصات چهار ستون متصل به دیوار در قاب ۱ و ۲ و سه ستون قاب ۳ استفاده شده است. هم‌چنین برای ستون راست در مدل ساده شده از برآیند



شکل ۶ مدل رفتار غیرخطی فنرهای دورانی



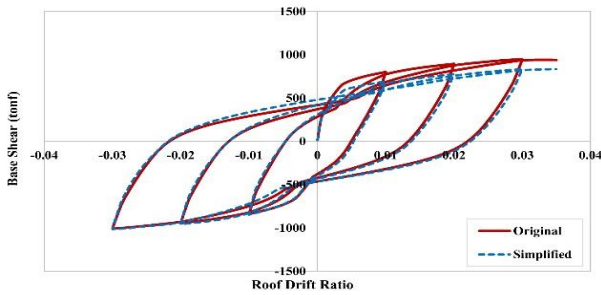
الف



ب

شکل ۷ مدل رفتاری مصالح: الف) Concrete02 و ب) Steel02 [35]

دقت مدل‌سازی علاوه بر نوع روش مدل‌سازی به مدل‌های رفتاری مصالح نیز بستگی دارند. با توجه به نرم‌افزار آپن سیس مدل‌های هیستریک محوری ساختاری مصالح استفاده شده در این تحقیق برای بتن و فولاد به ترتیب Concrete02 و Steel02 می‌باشند [35].



شکل ۸ منحنی پوش‌آور چرخه‌ای

برای ارزیابی دقیق‌تر پاسخ سازه توسط دو مدل اصلی و ساده‌شده از دو دسته رکورد نزدیک گسل و دور از گسل استفاده شده‌است که عبارتند از تعداد ۲۰ رکورد حوزه نزدیک از کار بیکر و تعداد ۲۰ رکورد حوزه دور از FEMA 440 و FEMA P-695. مشخصات این رکوردها در جداول (۴) و (۵) آورده شده‌اند. لازم به توضیح است که رکوردهای دور از گسل طوری مقیاس شده‌اند که مقدار طیف شتاب آن‌ها در دوره تناوب اصلی ساختمان برابر با طیف طرح ساختمان شود. از جمله پارامترهای مهمی که در ارزیابی رفتار لرزه‌ای و خسارت سازه در مهندسی زلزله مورد توجه است جابه‌جایی نسبی طبقات می‌باشد. در این تحقیق نیز از این پارامتر به منظور بررسی پاسخ‌های سازه با دو مدل اصلی و ساده‌شده استفاده شده‌است و برای بررسی دقیق‌تر پاسخ‌ها، کمیت‌های بایاس و پراکندگی دو پارامتر به‌ازای رکوردهای حوزه دور و نزدیک تعیین شده‌اند. شکل (۹) توزیع جابه‌جایی‌های نسبی را در ارتفاع طبقات ساختمان نشان می‌دهند. هر منحنی خاکستری‌رنگ توزیع جابه‌جایی نسبی را در مدل اصلی به‌ازای هر رکورد زلزله نشان می‌دهد. علاوه بر این جابه‌جایی نسبی متوسط حاصل از تمام رکوردها برای دو مدل اصلی و ساده‌شده نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود جابه‌جایی نسبی در طبقات بالاتر بیشتر از طبقات پایین‌تر می‌باشد، به عبارت دیگر جابه‌جایی نسبی طبقات تحت تأثیر عملکرد دیوار قرار گرفته‌است. هم‌چنین با توجه به جابه‌جایی نسبی متوسط، پاسخ حاصل از دو مدل اصلی و ساده‌شده تحت زلزله نزدیک گسل اختلاف کمتری را نشان می‌دهند.

چهارستون کناری قاب ۱ و ۲ و سه ستون قاب ۳ استفاده شده‌است.

جزء سوم مدل ساده پیشنهادی سیستم دوگانه قاب خمشی - دیوار برشی، تیرهای رابط بین قاب و دیوار هستند که تحت عنوان تیر واسط نام‌گذاری شده‌اند. پارامترهای غیرخطی این تیر رابط معادل چهار تیر واسط بین قاب و دیوار در مدل اصلی مدل‌سازی می‌شود.

ارزیابی مدل ساده پیشنهادی

در این تحقیق به منظور ارزیابی مدل ساده پیشنهادشده و مقایسه آن با مدل مرجع، پس از مدل‌سازی هر دو مدل در نرم‌افزار آپن‌سیس، تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی چرخه‌ای و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی انجام شده‌است.

در جدول (۳) زمان تناوب سه مود اول سازه برای هر دو مدل اصلی و ساده‌شده ارائه شده‌اند. زمان تناوب اصلی سازه در دو مدل اختلاف بسیار کم، ۰/۱۴۲ درصد را نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که مدل ساده‌شده پیشنهادی سختی اولیه سازه را به‌درستی مدل کرده‌است و تخمین دقیقی از زمان تناوب اصلی سازه ارائه می‌دهد.

جدول ۳ زمان تناوب سه مود اول سازه

زمان تناوب مودها	سازه اصلی	سازه ساده‌شده
T ₁	۰/۶۳۳۵	۰/۶۳۲۶
T ₂	۰/۱۳۱۷	۰/۱۳۰۸
T ₃	۰/۰۵۰۶	۰/۰۴۹۷

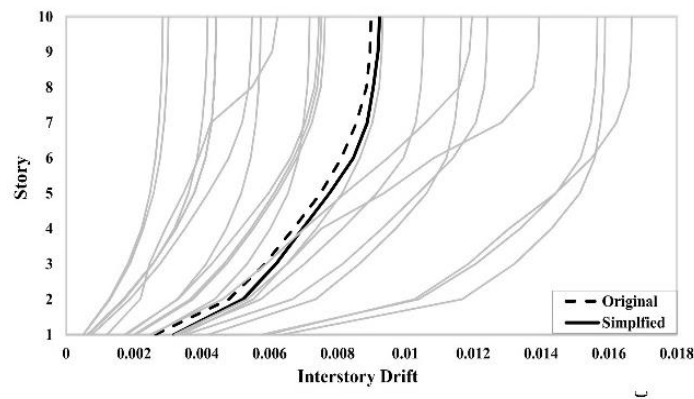
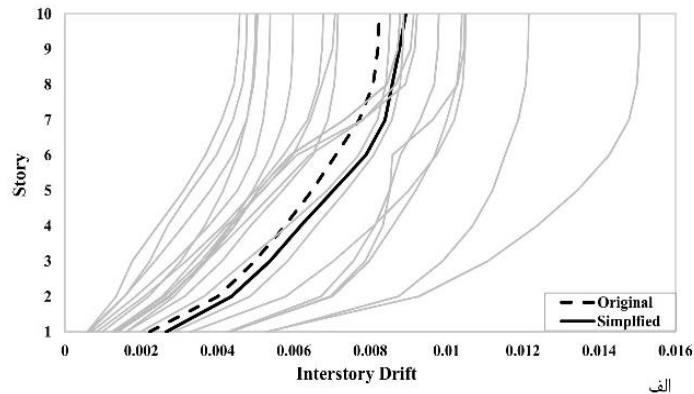
به‌منظور درک بهتر رفتار غیرخطی کلی سازه در شکل (۸) منحنی پوش‌آور چرخه‌ای برای سیستم سازه کل آورده شده‌اند که نشان می‌دهد رفتار دو مدل در حین باربرداری و بارگذاری مجدد تطبیق مناسبی دارد و ظرفیت تسلیم تقریباً یکسانی را نشان می‌دهد.

جدول ۴ رکوردهای انتخابی نزدیک گسل

نام زلزله	بزرگا (Mw)	فاصله از گسل (Km)	PGA (g)	ایستگاه
Imperial Valley-06	6.53	7.3	0.179	EC County Center FF
Imperial Valley-06	6.53	0.1	0.378	EC Meloland Overpass FF
Imperial Valley-06	6.53	7.1	0.357	El Centro Array #4
Imperial Valley-06	6.53	4.0	0.375	El Centro Array #5
Imperial Valley-06	6.53	0.6	0.462	El Centro Array #7
Imperial Valley-06	6.53	3.9	0.468	El Centro Array #8
Imperial Valley-06	6.53	5.1	0.417	El Centro Differential Array
Westmorland	5.9	16.7	0.172	Parachute Test Site
Coalinga-05	5.8		0.866	Oil City
Morgan Hill	6.2	0.5	0.814	Coyote Lake Dam (SW Abut)
Taiwan SMART1(40)	6.3		0.205	SMART1 C00
Loma Prieta	6.93	8.5	0.363	Saratoga
Erzican	6.69	4.4	0.486	Erzican
Cape Mendocino	7.01	8.2	0.615	Petrolia
Northridge-01	5.4	6.7	0.518	Jensen Filter Plant
Northridge-01	5.4	6.7	0.518	Jensen Filter Plant Generator
Northridge-01	5.5	6.7	0.426	Newhall - W Pico Canyon Rd.
Northridge-01	7.0	6.7	1.376	Pacoima Dam (upper left)
Northridge-01	5.4	6.7	0.594	Sylmar - Converter Sta
Kobe, Japan	0.3	6.9	0.645	Takarazuka

جدول ۵ رکوردهای انتخابی دور از گسل

نام زلزله	بزرگا (Mw)	فاصله از گسل (Km)	PGA (g)	ایستگاه
Imperial Valley-06	7.28	23.6	0.245	Yermo
Imperial Valley-06	7.28	36.2	0.089	Palm Springs, Airport
Imperial Valley-06	6.69	17.3	0.883	Santa Monica City Hall
Imperial Valley-06	6.69	10.4	0.367	Los Angeles, Hollywood Storage Bldg
Imperial Valley-06	6.69	24.3	0.172	Los Angeles, N. Westmoreland
Imperial Valley-06	7.01	22.7	0.55	Rio Dell Overpass
Imperial Valley-06	7.62	32	0.44	CHY101
Westmorland	7.62	77.5	0.51	TCU045
Coalinga-05	7.14	41.3	0.82	Bolu
Morgan Hill	7.13	26.5	0.34	Hector
Taiwan SMART1(40)	6.53	33.7	0.35	Delta
Loma Prieta	6.9	8.7	0.51	Nishi-Akashi
Erzican	6.6	46	0.24	Shin-Osaka
Cape Mendocino	7.51	53.7	0.22	Arcelik
Northridge-01	7.51	98.2	0.36	Duzce
Northridge-01	7.28	82.1	0.42	Coolwater
Northridge-01	6.93	9.8	0.53	Capitola
Northridge-01	7.37	40.4	0.51	Abbar
Northridge-01	6.69	13.3	0.52	BeverlyHillsMulhol
Kobe, Japan	6.54	11.2	0.45	PoeRoad



شکل ۹ توزیع جابه‌جایی نسبی طبقات تحت: (الف) رکوردهای حوزه دور و (ب) رکوردهای حوزه نزدیک

استاندارد لگاریتم طبیعی θ'/θ که هر چه مقدار پراکندگی کمتر باشد، پراکندگی پیش‌بینی‌کننده θ' در اطراف $\delta\theta$ کمتر است و در نتیجه دقت پیش‌بینی‌کننده θ' بیشتر است. مقادیر بایاس و پراکندگی تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. مطابق شکل، مقادیر بایاس در دو طبقه اول بیشتر است و مدل ساده‌شده پاسخ جابه‌جایی نسبی را در این طبقات حدود ۲۰ درصد بیشتر نشان می‌دهد؛ اما در طبقات بالاتر، مقدار بایاس کمتر شده و پاسخ پیش‌بینی‌شده توسط مدل ساده‌شده به‌طور متوسط نزدیک به مدل دارای جزئیات بوده‌است. به‌طور کلی نیز به‌ازای رکوردهای حوزه نزدیک، مدل ساده‌شده پیش‌بینی دقیق‌تری از پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ارائه نموده‌است. هم‌چنین مقادیر پراکندگی در طبقات مختلف نشان می‌دهند که مدل ساده‌شده در پیش‌بینی جابه‌جایی نسبی طبقات مختلف تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد خطا دارد.

به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌ها از پارامترهای بایاس و پراکندگی استفاده شده‌است. مدل فیبر به‌عنوان مدل مرجع در نظر گرفته شده‌است. این دو پارامتر به‌صورت روابط زیر تعریف می‌شوند:

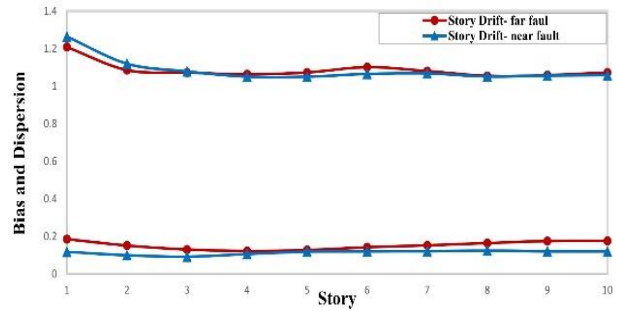
$$\delta = e^{\frac{1}{n} \sum \ln(\frac{\theta'}{\theta})} \tag{۱}$$

$$\sigma = SD(\ln(\frac{\theta'}{\theta})) \tag{۲}$$

در این روابط n تعداد رکوردهای زلزله، θ حداکثر جابه‌جایی نسبی در هر طبقه در مدل دارای جزئیات و θ' حداکثر جابه‌جایی نسبی در مدل‌های ساده‌شده پیشنهادی می‌باشد. فاکتور بایاس (δ) یک پیش‌بینی‌کننده عبارت است از میانگین هندسی θ'/θ که اگر این فاکتور کمتر از یک باشد پیش‌بینی‌کننده θ' به‌طور متوسط تخمینی دست پایین از θ ارائه می‌دهد. و اگر بزرگ‌تر از یک باشد θ' به‌طور متوسط θ را دست بالا تخمین می‌زند. هم‌چنین دقت یک پیش‌بینی‌کننده توسط فاکتور پراکندگی (σ) محاسبه می‌شود که عبارت است از انحراف

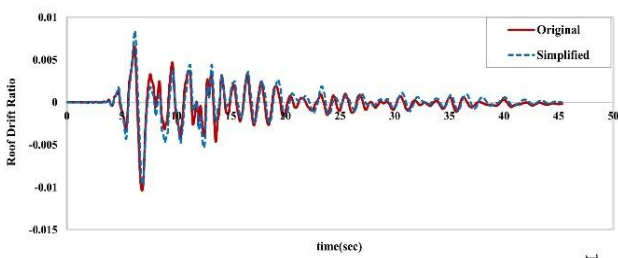
رکورد حوزه دور و دو رکورد حوزه نزدیک نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روند نوسانات پاسخ در طول زمان برای هر دو گروه رکورد حوزه دور و نزدیک در دو مدل اصلی و ساده شده مشابه می‌باشد ولی در جابه‌جایی‌های حداکثر و جابه‌جایی‌های ماندگار برای بعضی از رکوردهای زلزله تفاوت‌هایی مشاهده می‌شود.

باتوجه به این که یکی از مهم‌ترین اهداف ایجاد مدل‌های ساده‌شده چند درجه آزادی کاهش زمان انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی می‌باشد، مدت زمان انجام تحلیل برای هر دو مدل اصلی و ساده به‌ازای هر یک از رکوردهای حوزه دور و نزدیک تعیین شده و در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند.

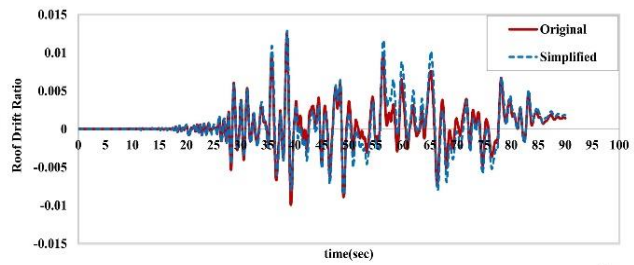


شکل ۱۰ بایاس و پراکندگی جابه‌جایی نسبی طبقات تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک

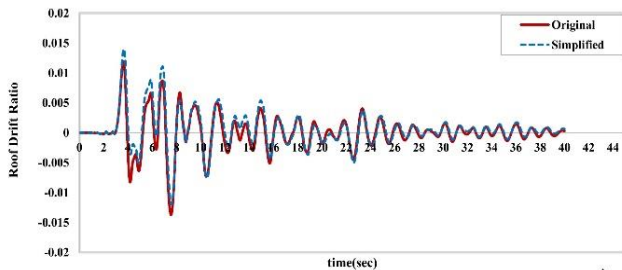
در شکل‌های (۱۱) نمونه‌هایی از منحنی‌های تاریخچه‌زمانی نسبت جابه‌جایی بام برای مدل‌های اصلی و ساده‌شده، تحت دو



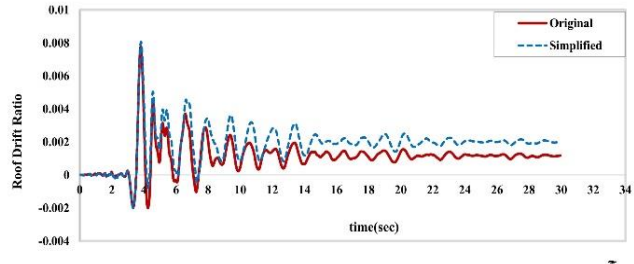
ب



الف

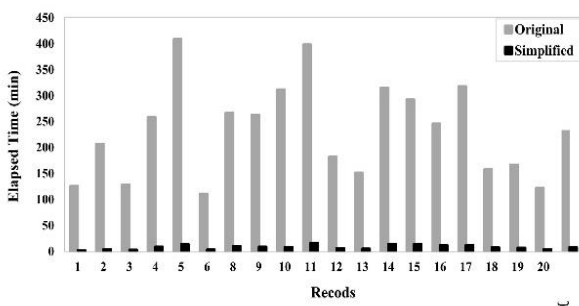


د

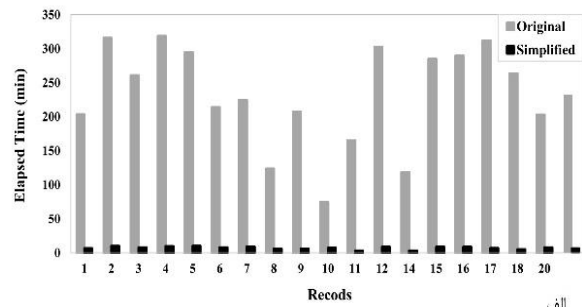


ج

شکل ۱۱ نمودار تاریخچه‌زمانی جابه‌جایی بام تحت رکورد (الف) حوزه دور FEMA695ChiChiCHY101، (ب) حوزه دور HectorMineHector، (ج) حوزه نزدیک Northridge-01 و (د) Morgan Hill نزدیک



ب



الف

شکل ۱۲ مقایسه مدت زمان مورد نیاز برای تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت رکوردهای: (الف) حوزه دور و (ب) حوزه نزدیک

چنددهانه و دیوار برشی با مدل فایبر در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شد.

نتایج آنالیزهای غیرخطی برای ۲۰ رکورد نزدیک گسل و ۲۰ رکورد دور از گسل نشان می‌دهد که مدل ساده‌شده پیشنهادی جابه‌جایی نسبی طبقات را با خطای کمتر از ۲۰ درصد پیش‌بینی می‌کند. درحالی‌که مدت زمان لازم برای تحلیل مدل ساده‌شده حدود ۳۰ برابر کمتر از زمان لازم برای تحلیل مدل دارای جزئیات است.

برای ارزیابی پاسخ دینامیکی مدل ساده‌شده از تغییرمکان نسبی طبقات و دو شاخص آماری بایاس و پراکندگی استفاده شد که همواره این شاخص‌های آماری انحراف و پراکندگی کمتر از ۲۰ درصد را نشان داده‌اند.

مطابق شکل (۱۲) مجموع زمان انجام تحلیل تاریخیچه‌زمانی مربوط به دو مدل اصلی و ساده‌شده تحت تمام ۴۰ رکورد حوزه دور و نزدیک به ترتیب ۱۴۳ و ۵ ساعت بوده‌است. ملاحظه می‌شود که مدل ساده‌شده حدود ۳۰ برابر زمان انجام تحلیل را کاهش می‌دهد که این مورد مهم‌ترین قابلیت و کارایی مدل ساده‌شده در تعیین پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل ساده‌شده برای سیستم دوگانه قاب خمشی- دیوار برشی منظم با دهانه برابر ارائه شده‌است که در آن برای مدل‌سازی دیوار برشی از مدل MVLEM و برای مدل‌سازی قاب خمشی بتنی از مدل قاب جایگزین استفاده شده‌است. برای ارزیابی دقت مدل ساده‌شده پیشنهادی، مدل دارای جزئیات یک ساختمان دارای سیستم مشتمل بر قاب

مراجع

1. Taucer, F., Spacone, E., & Filippou, F. C., "A Fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures", *Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-91/17*, College of Engineering, University of California, (1991).
2. Petrangeli, M., Pinto, P. E., & Ciampi, V., "Fiber Element for Cyclic Bending and Shear of RC Structures. I: Theory", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 125, No. 9, pp. 994-1001, (1999).
3. Petrangeli, M., "Fiber Element for Cyclic Bending and Shear of RC Structures. II: Verification", *Journal of engineering mechanics*, Vol. 125, No. 9, pp. 1002-1009, (1999).
4. Kabeyasawa, T., Shiohara, H., Otani, S., & Aoyama, H., "Analysis of the Full-Scale Seven-Story Reinforced Concrete Test Structure", *Journal of the Faculty of Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 431-478, (1983).
5. Vulcano, A., & Bertero, V. V., "Analytical Models for Predicting the Lateral Response of RC Shear Walls: Evaluation of Their Reliability", *Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-87/19*, College of Engineering, University of California, (1987).
6. Vulcano, A., Bertero, V. V., & Colotti, V., "Analytical Modeling of RC Structural Walls", *In Proceedings of 9th world conference on earthquake engineering*, Vol. 6, pp. 41-46, (1988).
7. Massone, L. M., & Wallace, J. W., "Load-Deformation Responses of Slender Reinforced Concrete Walls", *Structural Journal*, Vol. 101, No. 1, pp. 103-113, (2004).
8. Orakcal, K., & Wallace, J. W., "Nonlinear Modeling and Analysis of Slender Reinforced Concrete Walls", *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 5, pp. 688-698, (2004).
9. Kolozvari, K., Orakcal, K., & Wallace, J. W., "Modeling of Cyclic Shear-Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls. I: Theory", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, No. 5, pp. 04014135, (2015).

10. Kolozvari, K., Tran, T. A., Orakcal, K., & Wallace, J. W., "Modeling of Cyclic Shear-Flexure Interaction in Reinforced Concrete Structural Walls. II: Experimental Validation", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, No. 5, pp. 04014136, (2015).
11. Kolozvari, K., Orakcal, K., & Wallace, J. W., "Shear-Flexure Interaction Modeling of reinforced Concrete Structural Walls and Columns under Reversed Cyclic Loading", Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report No. PEER-2015/12, University of California, Berkeley, (2015).
12. Kolozvari, K., & Wallace, J. W., "Practical Nonlinear Modeling of Reinforced Concrete Structural Walls", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, No. 12, pp. G4016001, (2016).
13. Esmaeiltabar, P., Vaseghi, J., & Khosravi, H., "Nonlinear Macro Modeling of Slender Reinforced Concrete Shear Walls", *Structural Concrete*, Vol. 20, No. 3, pp. 899-910, (2019).
۱۴. اسماعیل تبار نشلی، پ.، واتقی امیری، ج.، خسروی، ح.، «مقایسه مدل ساده شده چند المان محوری با مدل فایبر در مدل سازی غیرخطی دیوار برشی بتنی»، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره ۷، شماره ۳۱، (بهار ۱۳۹۹).
15. Nakashima, M., Ogawa, K., & Inoue, K., "Generic Frame Model for Simulation of Earthquake Responses of Steel Moment Frames", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 31, No 3, pp. 671-692, (2002).
16. Khaloo, A. R., & Khosravi, H., "Modified Fish-Bone Model: A Simplified MDOF Model for Simulation of Seismic Responses of Moment Resisting Frames", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 55, pp. 195-210, (2013).
17. Soleimani, R., Khosravi, H., & Hamidi, H., "Substitute Frame and Adapted Fish-Bone model: Two Simplified Frames Representative of RC Moment Resisting Frames", *Engineering Structures*, Vol. 185, pp. 68-89, (2019).
18. d'Aragona, M. G., Polese, M., & Prota, A., "Stick-IT: A Simplified Model for Rapid Estimation of IDR and PFA for Existing Low-Rise Symmetric Infilled RC Building Typologies", *Engineering Structures*, Vol. 223, pp. 111182, (2020).
19. Gaetani d'Aragona, M., Polese, M., Di Ludovico, M., & Prota, A., "The Use of Stick- IT Model for the Prediction of Direct Economic Losses", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 50, No. 7, pp. 1884-1907, (2021).
20. Soleimani, R., & Hamidi, H., "General Substitute Frame Model (GSF) for Efficient Estimation of Seismic Demands of Steel and RC Moment Frames", *Engineering Structures*, Vol. 246, pp. 113031, (2021).
21. Soleimani, R., & Hamidi, H., "Improved Substitute-Frame (ISF) Model for Seismic Response of Steel-MRF with Vertical Irregularities", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 186, pp. 106918, (2021).
22. Jamšek, A., & Dolšek, M., "The Reduced-Degree-of-Freedom Model for Seismic Analysis of Predominantly Plan-Symmetric Reinforced Concrete Wall-Frame Building", *Buildings*, Vol. 11, No. 8, pp. 372, (2021).
23. Jamšek, A., & Dolšek, M., "Seismic Analysis of Older and Contemporary Reinforced Concrete Frames with the Improved Fish-Bone Model", *Engineering Structures*, Vol. 212, pp. 110514, (2020).
24. Hosseini, M., Amiri, H. A., & Estekanchi, H. E., "Consistent One-Bay Frame Simplified Model for Efficient Seismic Evaluation of Steel Moment Frame Buildings with Equal and Unequal Bay Lengths", *In Structures*, Vol. 34, pp. 3345-3362, Elsevier, (2021).
25. Qu, Z., Gong, T., Wang, X., Li, Q., & Wang, T., "Stiffness and Strength Demands for Pin-Supported Walls in Reinforced-Concrete Moment Frames", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 146, No. 9, pp. 04020181, (2020).

26. Ghaderi, P., Khosravi, H., & Firoozjaee, A. R., "Consideration of Strength-Stiffness Dependency in the Determination of Lateral Load Pattern", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 137, pp. 106287, (2020).
27. Wu, P., "Population Development Challenges in China ", Springer, Singapore, pp. 205-216, (2020).
28. Khan, F. R., & Sbarounis, J. A., "Interaction of Shear Walls and Frames", *Journal of the Structural Division*, Vol. 90, No. 3, pp. 285-335, (1964).
29. Kuang, J. S., & Huang, K., "Simplified Multi- Degree- of- Freedom Model for Estimation of Seismic Response of Regular Wall- Frame Structures", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 20, No. 3, pp. 418-432, (2011).
30. Azzato, F., & Vulcano, A., "Modeling of RC Frame-Wall Structures for Nonlinear Seismic Analysis", *In Proceedings of the 11 th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, (1996).
31. Zhou, X., & Li, G., "A Macro-Element Based Practical Model for Seismic Analysis of Steel-Concrete Composite High-Rise Buildings", *Engineering structures*, Vol. 49, pp. 91-103, (2013).
32. Kolozvari, K., & Wallace, J. W., "Practical Nonlinear Modeling of Reinforced Concrete Structural Walls", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, No. 12, pp. G4016001., (2016).
33. Li, G., Zhang, F., Zhang, Y., & Li, H. N., "Nonlinear Hysteretic Behavior Simulation of Reinforced Concrete Shear Walls Using the Force Analogy Method", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 24, No. 7, pp. 504-520, (2015).
34. Kazaz, İ., & Gülkan, P., "Dynamic Shear Force Amplification in Regular Frame-Wall Systems", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 25, No. 2, pp. 112-135, (2016).
35. McKenna, F., Fenves G. L., Scott, M. H., & Jeremic, B., "Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees)." Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA (2000).