

توسعه روش شبیه سازی ترکیبی و ارزیابی کارآیی آن از طریق بررسی اتصال خمشی تیر-ستون فولادی

زینب جان نثاری لادانی^۱، عباسعلی تسنیمی^{۲*}، مائده ذاکر صالحی^۳

۱-دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲-استاد مهندسی سازه، گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳-استادیار گروه سازه های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو

* tasnimi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۲۳

چکیده

شبیه سازی ترکیبی یک ابزار نسبتاً جدید و کارآمد است که می تواند از مزایای هر دو روش عددی و آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد سازه ها تحت بارگذاری های مختلف استفاده کند. در این مقاله یک چهارچوب شبیه سازی ترکیبی توسعه داده شده است که در آن نرم افزار OpenSees به عنوان یک برنامه اجزا محدود برای مدل سازی بخش عددی، OpenFresco به عنوان نرم افزار واسط و LabVIEW به عنوان جمع آورنده داده و کنترل کننده حرکت محرک در نظر گرفته شدند. برای بررسی درستی کارآیی چهارچوب شبیه سازی توسعه یافته، یک اتصال بهبود یافته تیر با عرض بال افزایش یافته به ستون در یک قاب خمشی فولادی یک طبقه یک دهانه در نظر گرفته شد. قاب مورد نظر به دو زیرسازه عددی و آزمایشگاهی تقسیم شد به این ترتیب که نیمی از قاب در OpenSees و نیم دیگر آن در آزمایشگاه ساخته شد و پای سازه تحت شتاب افقی زلزله طبع قرار گرفت. کارایی فرآیند کنترلی مورد استفاده در چهارچوب توسعه یافته با مقایسه جابه جایی های اندازه گیری شده و دستور، مورد بررسی قرار گرفت و مقدار اندک شاخص خطای شبیه سازی ترکیبی^۱ حاکی از عملکرد مناسب فرآیند کنترلی در سیستم شبیه سازی توسعه یافته بود. برای بررسی عملکرد شبیه سازی ترکیبی، یک شبیه سازی عددی کوپل شده (شبیه سازی ترکیبی مجازی) به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. در این شبیه سازی کاملاً عددی، ABAQUS و OpenSees به عنوان نرم افزار اجزا محدود و OpenFresco به عنوان نرم افزار واسط استفاده شدند. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی کوپل شده و شبیه سازی ترکیبی با یکدیگر مقایسه شدند و شاخص دقت (ϵ^{rms}) به دست آمده حاکی از دقت و عملکرد مناسب چهارچوب توسعه یافته شبیه سازی ترکیبی بود.

واژگان کلیدی: شبیه سازی ترکیبی، نرم افزار واسط OpenFresco، LabVIEW، اتصال تیر با عرض بال افزایش یافته به ستون

۱- مقدمه

یکی از اهداف اصلی مهندسی زلزله، طراحی، ساخت و نگهداری سازه‌هاست به گونه‌ای که در هنگام زلزله رفتاری مناسب داشته باشند. بزرگترین چالشی که در این زمینه وجود دارد، پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها است. با وجود اینکه روش‌های عددی در دهه‌های اخیر با پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای همراه بوده و تا حد زیادی در برآورده نمودن این هدف مثمر ثمر بوده‌اند، اما در مدلسازی برخی از سازه‌ها کارآمدی لازم را نداشته و تخمین مناسبی از رفتار سازه‌ها ارائه نداده است. روش‌های آزمایشگاهی نیز هر یک دارای معایبی بوده که استفاده از آنها را در پیش‌بینی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، با محدودیت‌هایی همراه می‌کند. به منظور رفع این مشکل محققان به این نتیجه رسیدند که از روش شبیه‌سازی ترکیبی (هیبریدی) استفاده نمایند. این روش به گونه‌ای است که از مزایای روش‌های عددی و آزمایشگاهی به صورت همزمان بهره برده و تاثیر معایب آنها را به حداقل می‌رساند از اینرو می‌توان آن را روش مناسبی برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها دانست.

شبیه‌سازی ترکیبی تصویری از رفتار لرزه‌ای سازه‌های بزرگ از قبیل ساختمان‌ها و پل‌ها را که تحت اثر زلزله قرار می‌گیرند، در اختیار ما می‌گذارد. در حقیقت این روش مبتنی بر ساخت بخشی از سازه در آزمایشگاه و ایجاد مدل عددی قسمت‌های باقیمانده آن در کامپیوتر و ترکیب همزمان این دو زیر سازه است و دیگر نیازی به ساخت کل سازه در آزمایشگاه برای بررسی عملکرد لرزه‌ای آن نخواهد بود.

با توجه به قابلیت‌های روش شبیه‌سازی ترکیبی، در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی برای گسترش و بهبود بخش‌های مختلف عددی و آزمایشگاهی آن صورت گرفت. عده‌ای با بهبود بخشیدن روش‌های انتگرال‌گیری متناسب با این روش به توسعه بخش عددی پرداختند. زمانی که سازه رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهد، استفاده از ماتریس سختی اولیه نمی‌تواند عملکرد آن را به درستی ارزیابی نماید پس باید در هر گام از سختی تانژانتی استفاده نمود. تلاش‌های فراوانی برای تخمین ماتریس سختی تانژانتی در فرآیند شبیه‌سازی ترکیبی صورت

گرفت که در این راستا می‌توان از تحقیقات اسپنسر و کاریون [1] نام برد که ماتریس سختی تانژانتی را بر اساس فرمول (Broyden) محاسبه نمودند. هانگ و همکارانش [2] الگوریتمی پیشنهاد دادند که دقت مساله را در حالت غیر خطی افزایش داد. ذاکر صالحی و همکارانش [3] الگوریتمی را ارائه دادند که در آن با تنظیم اندازه گام زمانی انتگرال‌گیری، امکان به کارگیری روش‌های ضمنی برای شبیه‌سازی ترکیبی بدون نیاز به انجام تکرار و یا تخمین برخط ماتریس سختی وتری، فراهم شود.

برخی دیگر با ایجاد روش‌های کنترلی مناسب برای حرکت محرک‌ها و جبران تاخیر آنها برای توسعه بخش آزمایشگاهی گام برداشتند. از آن جمله می‌توان به تحقیقات هوریچی و همکارانش [4] اشاره کرد که یک سیستم شبیه‌سازی ترکیبی ارائه دادند که در آن یک پروسه جبران تاخیر حرکت محرک وجود داشت که فرمان جابه‌جایی مورد نیاز را در زمانی معادل یک گام زمانی جلوتر از گام شبیه‌سازی فعلی، پیش‌بینی می‌کرد سپس در سال ۲۰۰۱ هوریچی و کونو [5] یک روش جبران تاخیر پیشنهاد نمودند که برای پیش‌بینی‌های خود علاوه بر جابه‌جایی، سرعت و شتاب را نیز مدنظر قرار دادند. تاکاناشی و فنوس [6] مجموعه‌ای از نرم افزارهای مرتبط با یکدیگر را ایجاد کردند که در آزمایش‌های آزمایشگاهی قابل استفاده بودند. این محیط نرم‌افزاری، نرم‌افزار OpenSees [7] را که بر پایه روش اجزا محدود استوار است، گسترش داد. نرم افزار OpenFresco¹ یک نرم افزار با دسترسی نامحدود برای نمونه‌های آزمایشگاهی و کنترل آنها است که توسط تاکاناشی و فنوس ایجاد شد. کمپیل و استوجادینوویچ [8] شبیه‌سازی ترکیبی توزیع شده مکانی را برای استفاده از امکانات آزمایشگاه‌های دیگر در سراسر جهان پیشنهاد کردند و آنها را از طریق یکپارچه سازی عددی با استفاده از اینترنت به هم مرتبط کردند. عده‌ای نیز همچون ایترتون و حجار [9] با بهره‌مندی از روش ترکیبی به عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی رفتار

1. Open-Source Framework for Experimental Setup and Control

لرزه‌ای سازه‌ها، تعدادی قاب فولادی لغزان مرکز گرا را در برابر بارهای لرزه‌ای مورد بررسی قرار دادند و توانستند رفتار آنها را ارزیابی نمایند. ایباتی و همکارانش [10] عملکرد لرزه‌ای یک پل بتنی چند دهانه را با استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی ارزیابی نموده و اثربخشی سیستم‌های مبتنی بر اصطکاک را بر رفتار پل مورد مطالعه قرار دادند. تریزیک و استوجادینویچ [11] از شبیه‌سازی ترکیبی برای ارزیابی عملکرد ترافیکی یک پل روگذر بزرگراهی پس از وقوع زلزله ای بزرگ، استفاده نمودند به این ترتیب که یکی از ستون‌های پل به صورت فیزیکی ساخته شد و مابقی سازه در OpenSees مدل شد. پس از زلزله، بارهای مربوط به یک کامیون سنگین که در بحرانی ترین موقعیت روی پل قرار گرفته بود، روی مدل هیبریدی اعمال شد. داده‌های به دست آمده از این آزمایش‌ها نشان داد که این پل ظرفیت حمل بار کامیون‌های سنگین را بلافاصله پس از یک زلزله بزرگ دارد. محمود و همکارانش [12] عملکرد لرزه‌ای یک قاب فولادی نیمه صلب را با استفاده از شبیه‌سازی ترکیبی ارزیابی کردند. مصطفایی و همکارانش [13] از شبیه‌سازی ترکیبی برای مدل نمودن رفتار یک ستون از یک ساختمان ۶ طبقه ۴ دهانه بتنی که تحت بارگذاری آتش قرار گرفته بود، استفاده نمودند. به این ترتیب که ستون مورد نظر را در آزمایشگاه ساخته و آن را در محفظه آتش قرار دادند و بقیه سازه را در نرم افزار اجزا محدود SAFIR [14]، مدل کردند. با این کار نیازی به ساخت کل سازه در آزمایشگاه و در مقیاس واقعی نبود و تنها ساخت ستون تحت آتش در مقیاس واقعی در آزمایشگاه کافی بود و همچنین نتایج حاصله از شبیه‌سازی ترکیبی با آزمایشات انجام شده در مقیاس واقعی، هماهنگی خوبی داشت. وایت و همکارانش [15] یک روش شبیه‌سازی ترکیبی ترمومکانیکی را پیشنهاد دادند که شبیه‌سازی ترکیبی مکانیکی را با در نظر گرفتن درجات آزادی حرارتی و بارگذاری‌های ناشی از تغییرات دمایی نظیر آتش سوزی، گسترش می‌دهد. نتایج تحقیقات نشان داد، ارتقای سیستم شبیه‌سازی ترکیبی در بخش‌های مختلف عددی و آزمایشگاهی، امکان استفاده از این سیستم را در حل مسائل گوناگون و پیچیده فراهم می‌آورد. زمانی می‌توان از عملکرد سیستم شبیه-

سازی ترکیبی توسعه یافته اطمینان حاصل کرد که از آن در حل مسائل گوناگون استفاده نمود و به پاسخ‌های صحیح دست یافت.

تحقیقات روی اتصالات پس از نورتریج نشان داد اگرچه این اتصالات در جزئیات جوش بهبود یافته‌اند، اما هنوز شکل‌پذیری مورد انتظار آیین‌نامه‌ها را در مناطق با خطر لرزه‌ای بالا برآورده نمی‌کنند. در این شرایط، اتصالات خمشی با شکل‌پذیری بیشتر مورد نیاز بود. برای جلوگیری از شکست ترد و داشتن رفتار انعطاف پذیرتر در اتصال تیر به ستون و انتقال مفصل پلاستیک به مکانی دورتر از بر ستون، پژوهشگران دو رویکرد را پیشنهاد کردند که عبارت بود از:

۱- تقویت اتصالات [16، 17]

۲- کاهش ظرفیت خمشی تیر متصل به ستون [18، 19]

در رویکرد اول، سخت‌کننده‌هایی به صورت ورق پوششی یا صفحه مثالی در بر ستون استفاده شد که منجر به داشتن اتصالات سخت‌تر گشت. بنابراین، مفصل پلاستیک به مکانی دورتر از بر ستون منتقل شد. دیلمی و همکارانش [20] تاثیر استفاده از صفحات سخت کننده به صورت عمودی را بر رفتار اتصالات خمشی، مطالعه کردند و از تحلیل‌های اجزا محدودی غیرخطی برای بررسی رفتار چرخه ای این اتصالات استفاده نمودند. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که صفحه سخت کننده عمودی می‌تواند به طور قابل توجهی رفتار اتصال را بهبود بخشد. در روش دوم، بخشی از بال تیر در مجاورت اتصال تیر-ستون بریده شد. بنابراین، تشکیل مفصل پلاستیک در بخش با مقطع کاهش یافته رخ داد. میرقادی و همکارانش [21] نوع جدیدی از اتصال RBS را پیشنهاد کردند. با توجه به نتایج تحلیلی و تجربی، اتصال پیشنهادی رفتار شکل پذیر مناسبی را ارائه کرد. موریسون و همکارانش [22] با استفاده از اتصال RBS، اتصالی ارائه دادند که به جای اینکه مقطع تیر را در ناحیه‌ای کاهش دهند تیر را در همان ناحیه، حرارت دادند و عملکرد اتصال را بررسی نمودند. تحلیل‌های اجزای محدودی و آزمایش‌ها نشان داد از آنجایی که مدول الاستیک و غیرالاستیک فولاد توسط عملیات حرارتی تغییر نمی‌یابد و همچنین سطح

مقطع آن نیز ثابت است، در اتصال پیشنهادی سختی الاستیک یا مقاومت کماتشی مانند اتصال RBS، قربانی نمی شود و اتصال عملکرد مناسبی دارد.

هدف از این مقاله توسعه شبیه سازی ترکیبی برای بررسی عملکرد لرزه ای سازه ها تحت شتاب زلزله و بررسی درستی و دقت عملکرد آن است. از آنجایی که شبیه سازی های ترکیبی در مواردی استفاده می شوند که بخشی از سازه دارای رفتار ناشناخته و یا پیچیده باشد و با توجه به اینکه یکی از بخش های مهم سازه که باید در برابر بارهای لرزه ای رفتار مناسبی داشته باشد، اتصالات تیر به ستون هستند و در صورت خرابی آنها سقف فرو ریخته و شرط ایمنی جانی ارضا نمی شود پس در این پژوهش، کارایی این سیستم توسعه یافته ترکیبی با مطالعه روی یک اتصال خمشی نسبتاً جدید تیر به ستون فولادی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- شبیه سازی ترکیبی

هر سیستم شبیه سازی ترکیبی از دو بخش کلی تشکیل می شود: بخش عددی و بخش آزمایشگاهی. این دو قسمت معمولاً از طریق یک نرم افزار واسط برای تبادل داده ها با یکدیگر مرتبط می شوند. همچنین باید سیستمی برای کنترل حرکت محرک در آزمایشگاه و جمع آوری داده وجود داشته باشد. در بخش عددی معمولاً از یک نرم افزار اجزا محدود برای مدل سازی قسمتی از سازه استفاده می شود. انتخاب نرم افزار اجزا محدود مناسب برای مدل سازی زیرسازه عددی و همچنین نرم افزار واسط و سیستم کنترل کننده، مساله ای است که به عوامل متعددی از قبیل مدل سازه ای، سرعت مورد نظر برای انجام شبیه سازی، زمان واقعی بودن و نبودن و ... بستگی دارد. بخش آزمایشگاهی شامل زیرسازه فیزیکی و تجهیزات آزمایشگاهی از قبیل محرک اعمال جابه جایی، نیروسنج، جابه جایی سنج می باشد.

در سالهای اخیر سیستم شبیه سازی ترکیبی برای اولین بار در ایران، توسط ذاکر صالحی [23] ایجاد شد. این سیستم از سه بخش کلی آزمایشگاه محاسباتی، سیستم کنترل کننده و آزمایشگاه فیزیکی تشکیل شده بود. آزمایشگاه محاسباتی وظیفه

محاسبه جابه جایی های دستوری را برعهده داشت که در آن برنامه نویسی ها در دو محیط MATLAB و LabVIEW انجام شده بود.

در این پژوهش برای توسعه سیستم شبیه سازی ترکیبی و همچنین به منظور استفاده از شبیه سازی ترکیبی در مسائل پیچیده مهندسی، نرم افزار OpenSees جایگزین کد نویسی های انجام شده در MATLAB شد. به این ترتیب امکان استفاده از قابلیت های نرم افزار OpenSees برای مدل نمودن سازه ها و همچنین استخراج خروجی های متعدد از تحلیل، فراهم شد. OpenFresco به عنوان نرم افزار واسط به این چهارچوب شبیه سازی افزوده شد و از آن برای مرتبط نمودن مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی و همچنین باز و بسته نمودن درگاه ارتباطی بین دو زیر سازه استفاده شد. به علاوه استفاده از این نرم افزار واسط امکان انجام آزمایش ها توزیع شده جغرافیایی را آسان نمود. از LabVIEW نیز که یک زبان برنامه نویسی گرافیکی است به عنوان جمع آورنده داده ها و کنترل کننده حرکت محرک در آزمایشگاه، استفاده شد.

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می شود، در این مطالعه برای توسعه شبیه سازی ترکیبی از دو کامپیوتر استفاده شده است.

الف) سیستم قدرتمند PC1 شامل نرم افزارهای OpenSees، OpenFresco و LabVIEW.

ب) سیستم PC2 برای پشتیبانی از برنامه LabVIEW و کارت DAQ¹.

برنامه LabVIEW در PC2 وظیفه کنترل حرکت محرک را بر عهده دارد. دو کامپیوتر از طریق یک شبکه اترنت با استفاده از یک کابل LAN به هم متصل شدند و داده ها از طریق پروتکل UDP² بین دو سیستم منتقل می شود.

با توجه به سختی اولیه در نظر گرفته شده برای زیرسازه فیزیکی، معادلات حرکت در نرم افزار OpenSees واقع در PC1 حل می شود. جابه جایی به دست آمده از حل معادله از طریق المان عمومی به نرم افزار واسط OpenFresco منتقل می -

1 Data Acquisition

2 User Datagram Protocol

کنترل تناسبی-انتگرال-مشتق گیر (PID)، یک سیستم حلقه بسته است که سیستم کنترل بازخورد دارد و رایج ترین الگوریتم کنترلی است که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد و در کنترل صنعتی پذیرفته شده است. محبوبیت کنترل کننده های PID را می توان تا حدی به عملکرد مناسب آنها در طیف گسترده ای از شرایط عملیاتی و سادگی عملکرد آنها نسبت داد. کنترل کننده این وظیفه را بر عهده دارد که مقادیر اندازه گیری شده را تا حد امکان نزدیک به مقادیر دستور نگه دارد به این ترتیب که سیگنال اندازه گیری شده را با سیگنال مرجع (دستور) مقایسه کرده و بر این اساس، یک سیگنال خروجی می فرستد. تفاوت بین سیگنال خروجی و سیگنال مرجع، سیگنال خطا را تشکیل می دهد که از آن برای تولید خروجی نهایی سیستم با استفاده از سه نوع بهره تناسبی (K_p) - انتگرال گیر (K_i) - مشتق گیر (K_d)، استفاده می شود. شکل (۲) بلوک دیاگرام یک کنترل کننده PID را نشان می دهد.

شود. OpenFresco این جابه جایی را از طریق پروتکل TCP/IP به LabVIEW منتقل می کند. لازم به ذکر است که اتصال OpenFresco و LabVIEW به صورت دستی^۱ است، یعنی زمانی که LabVIEW آماده دریافت داده ها است، آمادگی خود را اعلام کرده و منتظر ارسال اطلاعات از OpenFresco می ماند. در این فرآیند، OpenFresco پس از ارسال اولین جابه جایی زیر سازه فیزیکی "d(d1)" در انتظار پاسخ (F1) قرار خواهد داشت. پاسخ F1 از LabVIEW در سیستم PC2 به LabVIEW در سیستم PC1 و از آنجا به OpenFresco و OpenSees منتقل می شود تا معادله حرکت برای گام بعدی حل شود. در تمامی مراحل ذکر شده سرعت پردازش بسیار زیاد بوده و تاخیر بین ارسال جابه جایی و دریافت نیرو تنها به دلیل دینامیک و حرکت موتور و پهنای باند سنسور است. بنابراین، هیچ وقفه ای در این فرآیند ایجاد نمی شود. در این روش شبیه سازی برای کنترل حرکت محرک الکترومکانیکی (اکچویتور) از کنترل کننده PID^۲ استفاده شد.

شکل ۱. فرآیند انتقال داده بین زیرسازه ها

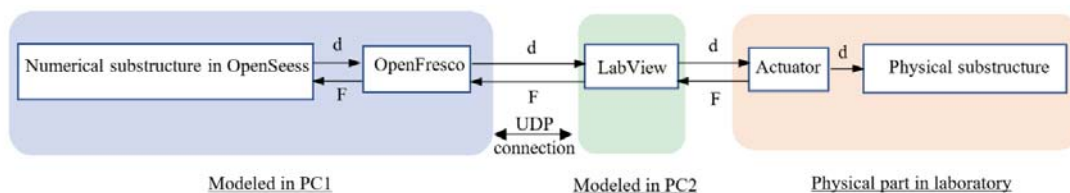


Fig. 1. The process of data transfer between substructures

شکل ۲. بلوک دیاگرام کنترل کننده PID

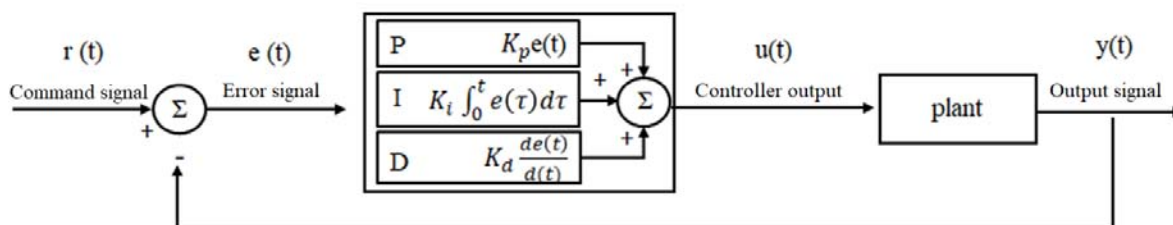


Fig. 2. PID controller block diagram

1 Hand shaking

2. Proportional-Integral-Derivative

برای بدست آوردن سیستم کنترل سریع مورد نظر با حداقل خطای حالت پایدار تنظیم شد، بهره مشتق گیر افزایش می یابد تا زمانی که متغیر مورد نظر با سرعت قابل قبولی به مقدار مرجع برسد. افزایش بهره مشتق گیر، باعث کاهش میزان بالا رفتن مقادیر از میزان مورد نظر (overshoot) شده و منجر به پایداری بیشتر شده، اما باعث می شود که سیستم نسبت به نویز بسیار حساس باشد. اغلب اوقات، مهندسان برای برآورده کردن بهتر نیازهایشان، لازم دارند یک ویژگی یک سیستم کنترل را با ویژگی دیگری عوض کنند.

۳-مدل سازه ای

برای ارزیابی کارایی سیستم توسعه یافته شبیه سازی ترکیبی، یک اتصال بهبود یافته تیر با عرض بال افزایش یافته به ستون، در یک قاب خمشی ویژه فولادی یک طبقه یک دهانه در نظر گرفته شد. دهانه قاب و ارتفاع ستون ۲۰۰ میلی متر هستند. بار مرده و زنده روی تیر به ترتیب برابر ۲۶۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر در نظر گرفته شد. این قاب یک قاب خمشی ویژه می باشد که طبق استانداردهای AISC 341-16 [24] و AISC 360-16 [25] طراحی شده است. فرض بر این است که قاب روی خاک سنگی بسیار متراکم و نرم (کلاس C) (طبق FEMA 356 [26]) و در ناحیه لرزه ای با خطر نسبی بسیار زیاد قرار دارد. ضریب شکل پذیری (R) برابر ۷/۵ می باشد که نشان دهنده پتانسیل بالای شکل پذیری در این سیستم سازه ای است. Ω نیز برابر ۳ در نظر گرفته شده است. ابعاد مقاطع تیر و ستون در جدول (۱) مشاهده می شود. جزئیات بخش عریض شده تیر و ابعاد آن در قسمت مربوط به زیرسازه فیزیکی ارائه می شود.

بلوک تناسبی (P) یک سیگنال خروجی متناسب با اندازه سیگنال خطا، تولید می کند. به طور کلی افزایش بهره تناسبی باعث افزایش سرعت پاسخ سیستم کنترلی می شود. با این حال، اگر بهره تناسبی خیلی زیاد باشد، سیگنال خروجی شروع به نوسان می کند. چنانچه بهره تناسبی بیشتر افزایش یابد، نوسانات بزرگتر شده و سیستم ناپایدار می شود و حتی ممکن است از کنترل خارج شود. بلوک انتگرال گیر (I) عبارت خطا را در طول زمان جمع می کند. این بلوک متناسب با مدت زمان و اندازه سیگنال خطا است. بلوک مشتق گیر (D) یک سیگنال خروجی متناسب با سرعت تغییر سیگنال خطا ایجاد می کند. هرچه خطا سریعتر تغییر کند، خروجی مشتق گیر بزرگتر است. در ادامه چگونگی میزان نمودن هر یک از بهره های تناسبی، انتگرال گیر و مشتق گیر ارائه شده است.

برای میزان نمودن بهره های مختلف از روش آزمون و خطا استفاده می شود. در این روش ابتدا بهره های انتگرال گیر و مشتق گیر، صفر در نظر گرفته می شوند و بهره تناسبی افزایش می یابد تا خروجی سیستم شروع به نوسان کند. با افزایش بهره تناسبی، سیستم سریع تر نوسان می کند، اما باید مراقب بود که سیستم ناپایدار نشود. هنگامی که P برای به دست آوردن پاسخ سریع مورد نظر تنظیم شد، بهره انتگرال افزایش می یابد تا نوسانات متوقف شود. بهره انتگرال گیر خطای حالت ماندگار را کاهش می دهد، اما باعث بالا رفتن مقادیر از میزان مورد نظر (overshoot) می شود. وجود مقداری بیش از حد مورد نظر، همیشه برای یک سیستم سریع ضروری است تا بتواند فوراً به تغییرات پاسخ دهد. بهره انتگرال گیر برای دستیابی به حداقل خطای حالت پایدار بهینه سازی شده است. هنگامی که I و P

جدول ۱. ویژگی های مقاطع تیر و ستون

Beam Section				Column Section (IPE120)			
d_b (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	d_c (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)
90	4	45	6	120	4.4	64	6.3

Table 1. Section properties

۳-۱- زیرسازه عددی در OpenSees

ستون سمت چپ قاب و نیمی از تیر به صورت دو بعدی در OpenSees [27] به عنوان زیرسازه عددی مدل سازی شدند. ستون سمت راست و نیم دیگر تیر نیز به عنوان زیرسازه فیزیکی در آزمایشگاه ساخته شدند. جرم متمرکز معادل ۱۵۰۰ کیلوگرم در فصل مشترک مدل های عددی و فیزیکی در نظر گرفته شد. سه درجه آزادی برای هر گره در نظر گرفته شد اما در گره رابط بین دو زیرسازه که نقطه عطف قاب تحت بارگذاری جانبی است، می توان یک اتصال غلتکی در نظر گرفت زیرا جابه جایی عمودی نسبت به افقی مقدار کمی است. بنابراین از المان عمومی با یک درجه آزادی افقی در این مطالعه استفاده شد. برای به دست آوردن سختی اولیه المان عمومی، یک جابه جایی واحد روی مدل سه بعدی زیرسازه فیزیکی در ABAQUS اعمال شد و نیروی حاصل اندازه گیری شد. برای بررسی مشخصات فولاد مصرفی مطابق استاندارد ASTM E8M [28] نمونه هایی برای انجام آزمایش کوپن برای ورق با ضخامت های ۴، ۴/۴، ۶ و ۶/۳ میلی متری آماده شد، این نمونه به صورت شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است. ابعاد نمونه های کوپن برای ضخامت های مختلف ورق، در جدول (۲) ارائه شده است.

آزمایش کوپن در آزمایشگاه سازه توسط دستگاه یونیورسال انجام شد. به این ترتیب که نمونه کوپن مورد نظر بین دو فک دستگاه یونیورسال قرار گرفت و تا زمان شکست نمونه بارگذاری کششی به آن اعمال شد. شکل (۴) نمونه کوپن در هنگام آزمایش کشش و همچنین نمونه کوپن بعد از اتمام آزمایش را نشان می دهد.

شکل ۳. هندسه نمونه کوپن

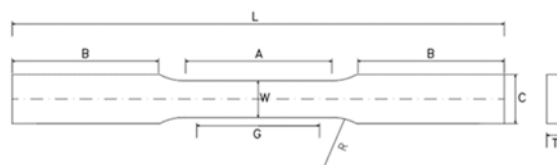


Fig. 3. Geometry of coupon specimen

جدول ۲. ابعاد نمونه آزمایش کوپن برای ورق های با ضخامت ۴، ۴/۴، ۶ و ۶/۳ میلی متری

A (mm)	B (mm)	C (mm)	L (mm)	W (mm)	G (mm)	R (mm)
70	55	20	200	12.5	50	20

Table 2. Dimensions of coupon specimens

شکل ۴. نمونه کوپن در هنگام آزمایش کشش و پس از اتمام آن



Fig. 4. Coupon specimen during the tensile test and after test completion

برای نشان دادن رفتار واقعی ماده که از آزمایش کوپن بدست آمد، Steel02 از کتابخانه OpenSees انتخاب شد. ویژگی های Steel02 به کار رفته در این مطالعه در جدول (۳) ارائه شده است. در تعریف المان های تیر و ستون از المان تیر ستون غیرخطی استفاده شد. به طور کلی دو نوع المان تیر ستون غیر خطی وجود دارد:

- المانهای بر مبنای نیرو: شامل المان با پلاستیسیته گسترده^۱ و المان با پلاستیسیته متمرکز با قسمت های میانی الاستیک^۲ است.
 - المان های بر مبنای جابه جایی: شامل المان با پلاستیسیته گسترده با توزیع انحنای خطی^۳ است.
- در المان های بر مبنای نیرو با افزایش تعداد نقاط انتگرال گیری یا تعداد المان ها دقت افزایش می یابد ولی در المان های بر مبنای جابه جایی تنها با افزایش تعداد المان ها دقت بالا می رود [29]. در این پژوهش تیر و ستون توسط المان های بر مبنای جابه جایی شبیه سازی شدند. برای اختصاص میرایی رایلی به

1 Nonlinear Beam-Column

2 beam WithHinges

3 dispBeamColumn

المانها و گره ها، از دستور Rayleigh استفاده شد. ماتریس میرایی D به صورت ترکیبی از ماتریس جرم و ماتریس سختی محاسبه شد و نسبت میرایی در مدل برابر ۵٪ در نظر گرفته شد. دستور system، سیستم حل معادلات را مشخص می کند که در اینجا از سیستم BandGeneral استفاده شده است. دستور numberer برای ساخت گزینه DOF_Numberer به کار می رود که ارتباط بین تعداد معادلات و درجات آزادی و چگونگی شماره گذاری درجات آزادی را برقرار می کند. در اینجا از شمارنده plain استفاده شده است. این شمارنده برای مدل های کوچک توصیه می شود. دستور Constraints یا قیود برای ساخت گزینه ConstraintHandler به کار می رود. این گزینه تعیین می کند که چگونه معادلات قید در تحلیل اعمال شود. معادلات قید یک مقدار مشخص را در یک درجه آزادی اعمال کرده و یا بین درجات آزادی سیستم رابطه برقرار می کنند. در اینجا از قید plain استفاده شده است. برای جلوگیری از تکرار الگوریتم های انتگرال گیری ضمنی که منجر به بارگذاری و باربرداری نامطلوب زیرسازه فیزیکی می شوند، از انتگرال گیر NewmarkHSFixedNumIter که یک الگوریتم انتگرال گیری مناسب برای شبیه سازی های ترکیبی می باشد با دستور test، FixedNumIter در ۵ تکرار استفاده شد [30].

دستور test برای ساخت گزینه آزمون همگرایی به کار می رود. الگوریتم های مختلف نیازمند یک آزمایش همگرایی هستند که تعیین کنند در انتهای یک گام تکرار، همگرایی حاصل شده است یا خیر. با انجام چندین تحلیل با تعداد تکرارهای مختلف این نتیجه حاصل شد که استفاده از ۵ بار تکرار در الگوریتم انتگرال گیری علاوه بر اینکه پاسخ ها را با دقت مناسبی ارائه می دهد نسبت به تعداد تکرارهای بیشتر، زمان تحلیل را کاهش داده و در دقت پاسخ ها تغییر چندانی ایجاد نمی کند [31].

در تحلیل مورد نظر مقدار ۷ برابر ۰/۵ و همچنین مقدار β برابر ۰/۲۵ در نظر گرفته شد. به منظور بررسی عملکرد چهارچوب شبیه سازی ارائه شده در محدوده خطی و غیرخطی سازه، باید رکوردی با دامنه شتاب بالا به سازه وارد می شد. با توجه به اینکه زلزله طبس همچنان یکی از شدیدترین زمین لرزه ها از نظر محتوای انرژی و دارا بودن دامنه های بلند در فرکانس های مختلف است، پس از این زمین لرزه استفاده شد. ۱/۸ برابر شتاب افقی زلزله طبس (RSN143_TABAS_TAB-L1) [32] به سازه اعمال شد.

جدول ۳. ویژگی های Steel02

Section	Yield strength (MPa)	Initial elastic tangent (MPa)	Strain hardening ratio	parameters to control the transition from elastic to plastic branches			isotropic hardening parameter			
				R0	CR1	CR2	a1	a2	a3	a4
Beam	248	2.1e5	0.02	18	0.925	0.15	0.1	1	0.1	1
Column	353	2.1e5	0.02	18	0.925	0.15	0.1	1	0.1	1

Table 3. The properties of Steel02

۳-۲- زیرسازه فیزیکی

مدل ستون سمت راست قاب و نیمی از تیر که به ستون متصل است، در آزمایشگاه ساخته شد. زیرسازه فیزیکی به

گونه ای طراحی شد که بتوان با امکانات موجود در آزمایشگاه سازه و با توجه به محدودیت ظرفیتی محرک الکترومکانیکی، نمونه را تا محدوده پلاستیک بارگذاری نمود.

بودن رفتار این اتصال بهبود یافته، چهارچوب شبیه سازی توسعه یافته می‌تواند ابزار مناسبی برای ارزیابی عملکرد آن باشد. نمایی از اتصال بهبود یافته در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، تیر عریض شده و صفحات پوششی توسط جوش شیاری با نفوذ کامل به ستون متصل شده‌اند. از جوش گوشه برای اتصال صفحات پوششی به بال‌های تیر استفاده شده است. ورق‌های مضاعف بین ورق‌های پیوستگی برای ارضای لزوم چشمه اتصال، قرار گرفته‌اند. پارامترهای هندسی اتصال تیر با عرض بال افزایش یافته به ستون که بر اساس استاندارد AISC358-16 [33] محاسبه شده- اند، در جدول (۴) ارائه شده است.

از آنجایی که با توجه به آیین‌نامه AISC 358-16 [33] اتصال تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) یک اتصال از پیش تایید صلاحیت شده می‌باشد و تا حدودی به اتصال تیر با عرض بال افزایش یافته به ستون شباهت دارد پس در اینجا از ابعاد پیشنهادی آیین‌نامه برای طراحی اتصال تیر با مقطع کاهش یافته به منظور طراحی اتصال تیر با عرض بال افزایش یافته استفاده می‌شود. اولین بار اتصال تیر با عرض بال افزایش یافته به ستون توسط چن و همکارانش [34] ارائه شد. در این پژوهش برای ارضای لزوم اجرایی و همچنین تامین حداکثر خمش محتمل در هر ستون، از دو صفحه پوششی در بالا و پایین بال‌های تیر استفاده می‌شود. بنابراین با توجه به ناشناخته

شکل ۵. اتصال بهبود یافته تیر با عرض بال افزایش یافته به ستون

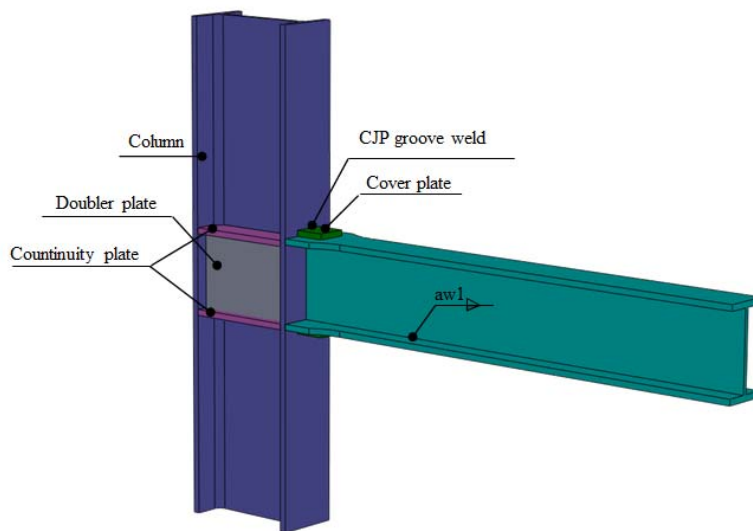


Fig. 5. Improved widened flange beam-column connection

جدول ۴. پارامترهای هندسی اتصال بهبود یافته تیر با عرض بال افزایش یافته به ستون

a (mm)	b/2 (mm)	c (mm)	R (mm)	b _{sf} (mm)	b _p (mm)	L (mm)	t _{cover plate} (mm)	t _{doubler plate} (mm)	t _{continuity plate} (mm)	a _{w1} (mm)	a _{w2} (mm)	a _{w3} (mm)
30	30	9.5	52.1	64	30	30	6	6	6	4	4	4

Table 4. Geometric parameters of improved widened flange beam to column connection

۳-۳- برپایی سیستم آزمایشگاهی

در آزمایشگاه برای اعمال جابه جایی حاصله از OpenSees و اعمال آن به زیرسازه فیزیکی، از یک محرک الکترومکانیکی استفاده شد. ابتدا محرک الکترومکانیکی در ارتفاع مناسب در آزمایشگاه قرار گرفت (در ارتفاع ۲ متری از کف قوی) و لودسل و بازویی انتقال نیرو مطابق شکل (۶) به انتهای شفت محرک متصل شدند. نیروهای مقاوم زیرسازه فیزیکی با استفاده از یک لودسل با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلوگرم، اندازه گیری شدند.

شکل ۶. چگونگی قرارگیری لودسل و بازویی انتقال نیرو نسبت به محرک

الکترومکانیک

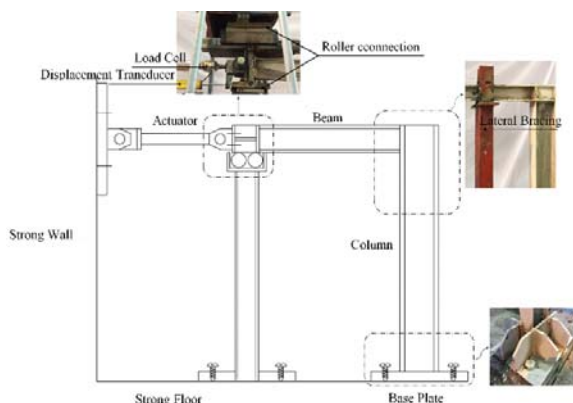


Fig. 7. Experimental setup configuration

برای ارزیابی کارایی سیستم توسعه یافته شبیه سازی ترکیبی، یک اتصال بهبود یافته تیر با عرض بال افزایش یافته به ستون در یک قاب خمشی ویژه (SMRF) فولادی یک طبقه یک دهانه در نظر گرفته شد و $1/8$ برابر شتاب افقی زلزله طبس به پای ستون در زیرسازه عددی، اعمال شد. شکل (۸) نمودار جابه جایی افقی سر تیر برحسب زمان و همچنین نیروی افقی تیر در برابر جابه جایی افقی سر تیر را نشان می دهد. همان طور که در نمودار مربوط به جابه جایی افقی سر تیر بر حسب زمان مشاهده می شود، بیشترین جابه جایی نمونه برابر $4/8$ میلی متر می باشد که این مقدار جابه جایی منجر به ایجاد تسلیم در برخی از قسمت های نمونه شده است. خطی نبودن نمودار نیروی سر تیر در برابر جابه جایی افقی آن نیز مؤید این مطلب و ورود نمونه به ناحیه غیرالاستیک می باشد.

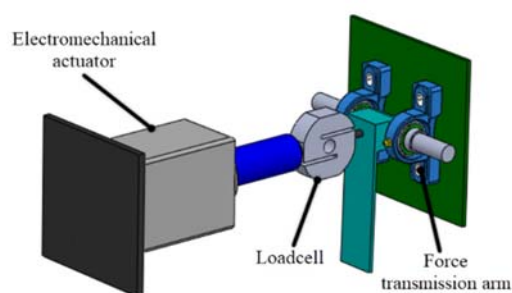


Fig. 6. The position of loadcell and force transmission arm relative to electromechanical actuator

برای اندازه گیری جابه جایی افقی سر تیر، یک جابه جایی سنج بر روی نمونه در یک مکان ثابت قرار داده شده است. قبل از شروع آزمایش، جابه جایی سنج نیز با استفاده از دستگاه یونیورسال کالیبره شد. پای ستون به کف قوی با استفاده از صفحه کف ستون، متصل شد. به منظور جلوگیری از جابه جایی خارج از صفحه قاب، از مهار جانبی استفاده شد. برای تامین نمودن شرایط مرزی زیرسازه فیزیکی، از ریل و کالسکه^۱ به عنوان اتصال غلتکی در سر تیر استفاده شد. پیکربندی ستاپ آزمایشگاهی در شکل (۷) نشان داده شده است.

۴- نتایج شبیه سازی ترکیبی

1 Linear guide rail

شکل ۹. تسلیم در اتصال بهبود یافته (a) نمونه تغییر شکل نیافته در ابتدای آزمایش (b) نما از بالا (c) نمای جانبی

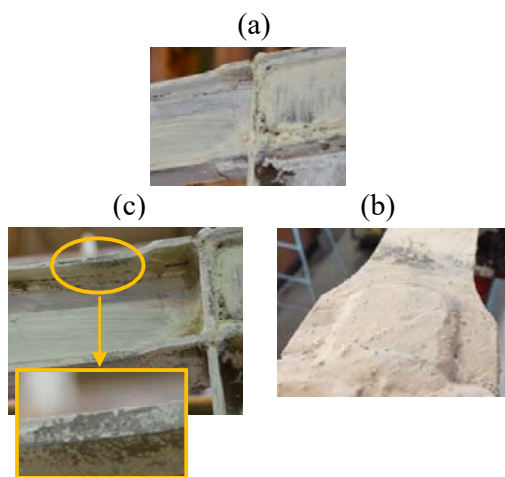


Fig. 9. Yielding in modified connection (a) undeformed specimen at the beginning of test (b) Top view (c) Side view

در اینجا برای اندازه‌گیری خطای آزمایشگاهی ایجاد ترکیبی (HSEM) که توسط ماسکودا و همکاران پیشنهاد شد [35].

شکل ۱۰. تاریخچه جابه‌جایی دستور و اندازه‌گیری شده

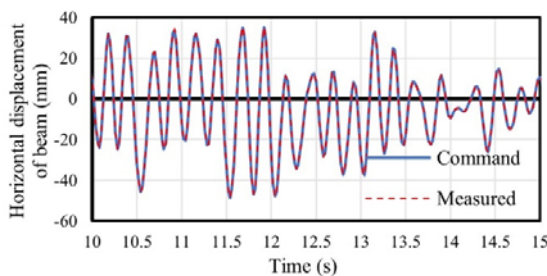


Fig. 10. Measured and command displacement history

استفاده می‌شود. این خطا بر اساس تفاوت بین انرژی تلف شده یا ذخیره شده توسط زیرسازه آزمایشگاهی (E^{BE}) و انرژی موجود در زیرسازه آزمایشگاهی به دست آمده از جابه‌جایی‌های دستور حاصل از انتگرال‌گیری عددی و نیروهای بازگشتی اندازه‌گیری شده (E^E) محاسبه می‌شود. E^E و E^{BE} از روابط زیر بدست می‌آیند. در واقع، این خطای انرژی چنانچه به انرژی ورودی اعمال شده به قاب به اضافه حداکثر انرژی

شکل ۸. (a) نمودار جابه‌جایی افقی سر تیر برحسب زمان (b) نمودار نیروی سر تیر در برابر جابه‌جایی افقی آن

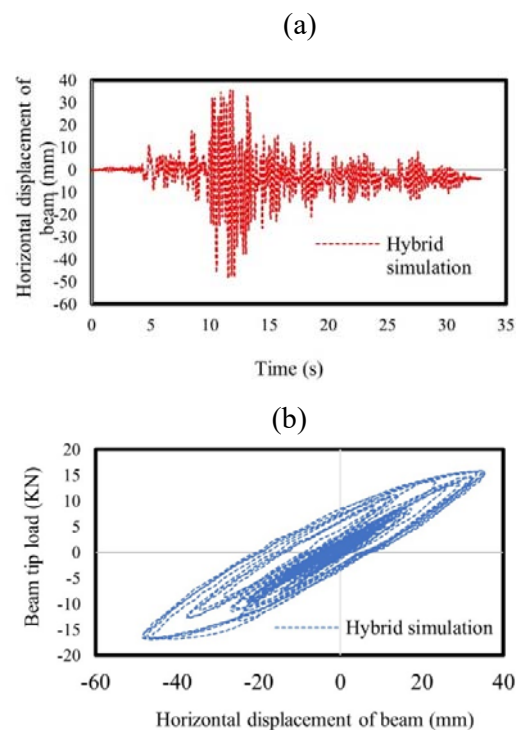
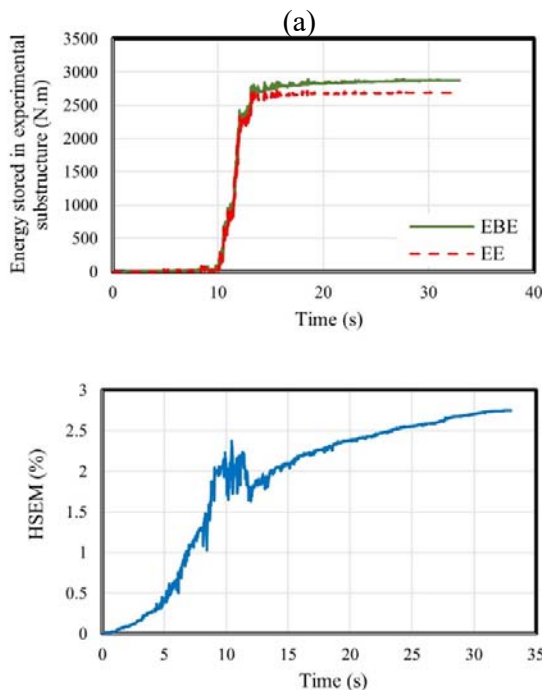


Fig. 8. (a) Horizontal displacement of beam versus time (b) Beam tip load versus horizontal displacement of beam

شکل (۹) عملکرد نمونه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است و انتظار می‌رفت، آب آهک بلافاصله پس از صفحات پوششی و در لبه‌های نواحی قوسی شکل، پوسته پوسته شد. بنابراین تسلیم در اتصال بهبود یافته تیر با عرض بال افزایش یافته، ابتدا در مناطق مذکور رخ داد.

برای اطمینان از اینکه فرآیند کنترلی که برای سیستم تعریف شده است به درستی کار می‌کند و برای تعیین اینکه آیا محرک، جابه‌جایی را به درستی به زیرسازه فیزیکی اعمال می‌کند، جابه‌جایی‌های دستور و اندازه‌گیری شده در سر تیر با هم مقایسه شدند. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، جابه‌جایی‌های دستور و اندازه‌گیری شده با یکدیگر تطابق زیادی دارند. برای نشان دادن بهتر این تطابق، تاریخچه جابه‌جایی از ۱۰ تا ۱۵ ثانیه بزرگ شده است.

شکل ۱۱. (a) E^{BE} و E^E (b) HSEMFig. 11. (a) E^{BE} , E^E (b) HSEM

برای بررسی عملکرد شبیه سازی ترکیبی یک شبیه سازی عددی کوپل شده (شبیه سازی ترکیبی مجازی) به عنوان مرجع در نظر گرفته شد. در این شبیه سازی کاملاً عددی، ABAQUS و OpenSees به عنوان نرم افزار اجزا محدود و OpenFresco به عنوان نرم افزار واسط استفاده شدند. ستون سمت راست قاب، نیمی از تیر متصل به ستون، ورقهای پیوستگی، ورق مضاعف، صفحات پوششی و صفحه کف ستون که زیرسازه فیزیکی را تشکیل می دهند به صورت سه بعدی در ABAQUS مدلسازی شدند. این قطعات توسط المانهای سالیید در ABAQUS مدلسازی شدند و برای در نظر گرفتن رفتار واقعی فولاد، یک سخت شوندگی ترکیبی^۱ از نوع نیم چرخه^۲ انتخاب شد و مقادیر تنش و کرنش شاخه پلاستیک منحنی های تنش-کرنش واقعی بدست آمده از آزمایش کوپن در ABAQUS قرار گرفتند. مدول یانگ و نسبت پواسون به ترتیب ۲۱۰ گیگا پاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شدند و مابقی قاب به صورت دو

کرنشی قابل بازگشت زیرسازه آزمایشگاهی نرمال شود، شاخص HSEM را تشکیل می دهد.

$$E_i^{BE} = \frac{1}{2}(r_{i-1}^m + r_i^m)(u_i^m - u_{i-1}^m) \quad (1)$$

$$E_i^E = \frac{1}{2}(r_{i-1}^c + r_i^c)(u_i^c - u_{i-1}^c) \quad (2)$$

که در آن r^m نیروی بازگشتی اندازه گیری شده، u^m جابه جایی اندازه گیری شده و u^c جابه جایی دستور می باشند. شاخص HSEM از رابطه (۳) بدست می آید.

$$HSEM = \frac{E^{error}}{E^{input} + E^{strain}} \quad (3)$$

که در آن E^{error} برابر است با:

$$E^{error} = E^{BE} - E^E \quad (4)$$

E^{input} و E^{strain} عبارتند از:

$$E^{input} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{2} M(a_{i-1} + a_i)(u_i - u_{i-1}) \right) \quad (5)$$

$$E^{strain} = \frac{1}{2} K_{initial} (u_y)^2 \quad (6)$$

که در آن M جرم سازه، a شتاب ورودی، $K_{initial}$ سختی اولیه زیرسازه آزمایشگاهی و u_y جابه جایی جاری شدگی نمونه آزمایشگاهی می باشد. شکل (۱۱) انرژی زیرسازه آزمایشگاهی (E^E و E^{BE}) را نشان می دهد. همانطور که نشان داده شده است خطای انرژی کمتر از ۳٪ انرژی ورودی زلزله به اضافه حداکثر انرژی کرنشی است. این مقدار کم HSEM نشان دهنده عملکرد خوب زیرسازه آزمایشگاهی است. توجه به این نکته ضروری است که تغییر قابل توجه در HSEM در ۱۲ ثانیه اول شبیه سازی رخ می دهد و بقیه شبیه سازی مشارکت کمتری در مقدار HSEM دارد.

1 Combined hardening

2 Half cycle

شکل ۱۳. تاریخچه جابه‌جایی افقی سر تیر در شبیه‌سازی عددی کوپل شده و شبیه‌سازی ترکیبی

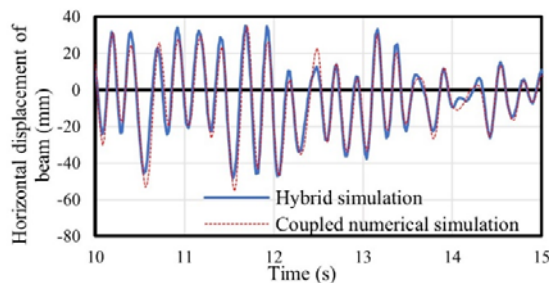


Fig. 13. Horizontal displacement history of beam tip for coupled numerical and hybrid simulation

برای تعیین تفاوت بین دو نمودار به صورت کمی، شاخص دقت پیشنهاد شده توسط ماسکودا و همکاران [36]، مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص ε^{rms} است و از رابطه (۷) بدست می‌آید که در حقیقت جذر میانگین مربعات (RMS^1) اختلاف بین جابه‌جایی مدل مرجع (u^{exact}) و جابه‌جایی شبیه‌سازی با در نظر گرفتن خطاها (u^{sim}) است که به جابه‌جایی مدل مرجع نرمال می‌شود. ε^{rms} برای قاب‌های مذکور، حدود ۴/۹٪ است که این اختلاف به دلیل تقریب‌های در نظر گرفته شده در تعریف شرایط مرزی در زیرسازه فیزیکی و همچنین خطاهای ردیابی محرک است.

$$\varepsilon^{rms} = \frac{RMS |u^{exact} - u^{sim}|}{MAX |u^{exact}|} \quad (7)$$

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش شبیه‌سازی ترکیبی عددی-آزمایشگاهی توسعه یافت که در آن نرم افزار OpenSees به عنوان نرم‌افزار اجزا محدود برای مدل نمودن بخش عددی و نرم افزار واسط OpenFresco برای مرتبط نمودن زیرسازه فیزیکی-شامل یک ستون از قاب خمشی و نیمی از تیر- به زیرسازه عددی استفاده شد. برای کنترل حرکت محرک نیز برنامه LabVIEW به کار گرفته شد. یافته‌های اصلی حاصل از این پژوهش به شرح ذیل خلاصه می‌شوند:

- ۱- برای مرتبط نمودن مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی و همچنین باز و بسته نمودن درگاه ارتباطی بین دو

بعدی در OpenSees همانند آنچه در بخش ۳-۱ شرح داده شد، مدل گردید. دقت مدل‌سازی قاب در ABAQUS با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده توسط چن و همکاران تأیید شد [34]. پیکربندی مدل مرجع در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

شکل ۱۲. پیکربندی مدل مرجع

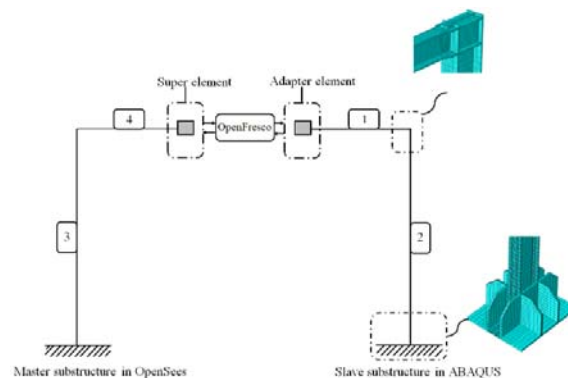


Fig. 12. Reference model configuration

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، دو زیرسازه از طریق درجات آزادی واسط به یکدیگر متصل می‌شوند. به المان واسطی که در سمت زیرسازه اصلی قرار دارد، المان supper (برتر) و به المانی که در سمت زیرسازه ثانوی قرار دارد، المان adapter (اداپتور) گفته می‌شود. جرم متمرکز و میرایی در سمت زیرسازه اصلی در نظر گرفته شد و ۱/۸ برابر شتاب افقی زلزله طیس (RSN143_TABAS_TAB-L1) به پای ستون اعمال شد.

شکل (۱۳) تاریخچه جابه‌جایی افقی سر تیر را در شبیه‌سازی عددی کوپل شده و شبیه‌سازی ترکیبی نشان می‌دهد. برای ارائه بهتر، تاریخچه جابه‌جایی از ۱۰ تا ۱۵ ثانیه در شکل بزرگ شده است. همانطور که نشان داده شده، تفاوت بین دو تاریخچه جابه‌جایی کوچک است.

1 Root mean square

با توجه به قابلیت‌های بیان شده برای سیستم توسعه یافته از این سیستم می‌توان برای شبیه سازی رفتار سازه‌های پیچیده‌تر نیز استفاده نمود.

مراجع

- [1] Carrion J.E., Spencer B.F., (2003), "Model-based strategies for real-time hybrid testing", In ASCE Structure Congress, Seattle, WA.
- [2] Hung Ch., El-Tawil-Sh., (2009), "Full operator algorithm for hybrid simulation", Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 38:1545-1561.
- [3] Zakersalehi M., Tasnimi A. A., Ahmadizadeh M., (2017), "A new integration scheme for application to seismic hybrid simulation", Earthquake Engineering & Engineering vibration 16: 69-81.
- [4] Horiuchi T., Inoue, M., Konno, T., and Namita, Y., (1999), "Real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation and its application to a piping system with energy absorber." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28(10), 1121-1141.
- [5] Horiuchi T., Konno, T., (2001), "A new method for compensating actuator delay in real-time hybrid experiments", Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 359, No. 1786, Dynamic Testing of Structures, 1893-1909.
- [6] Takahashi, Y., and Fenves, G.L., (2006), "Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics early view.
- [7] McKenna, F.T., (1997), "Object-Oriented finite element programming: Frameworks for analysis, algorithms and parallel computing", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley. Pearlman, L., D'Arcy, M., Johnson, E., Kesselman, C. and Plaszczak, P., NEESgrid.
- [8] Campbell S, Stojadinovic B., (1996), "A system for simultaneous pseudodynamic testing of multiple substructures", Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI.
- [9] Eatherton, M., Hajjar, J., (2014), "Hybrid simulation testing of a self-centering rocking steel braced frame system", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics.

زیر سازه، از دستورات تعریف شده در نرم‌افزار واسط OpenFresco استفاده شد. مزیت این نرم افزار نسبت به نرم افزارهای دیگر مانند MATLAB این بود که با بهره‌گیری از آن دیگر نیازی به تعریف مجدد دستورات مربوط به باز و بسته نمودن درگاه ارتباطی و انجام کدنویسی نبود. به علاوه با استفاده از این نرم افزار واسط امکان انجام آزمایش‌های توزیع شده جغرافیایی تسهیل شد.

۲- چهارچوب توسعه یافته با ایجاد شبکه بین دو کامپیوتر و به صورت دست‌دهی عمل می‌کند. OpenFresco پس از ارسال اولین جابه‌جایی منتظر پاسخ مربوطه (نیرو) می‌ماند. نیرویی که با اعمال اولین جابه‌جایی به زیرسازه فیزیکی به دست می‌آید، از LabVIEW در کامپیوتر دوم به LabVIEW در کامپیوتر اول و از آنجا به OpenSees و OpenFresco منتقل می‌شود تا معادله حرکت برای گام بعدی حل شود. در تمامی مراحل ذکر شده سرعت پردازش بسیار زیاد بوده و تاخیر بین ارسال جابه‌جایی و دریافت نیرو تنها به دلیل دینامیک و حرکت موتور و پهنای باند سنسور است، بنابراین هیچ وقفه‌ای در این فرآیند ایجاد نمی‌شود.

۳- کارایی فرآیند کنترلی مورد استفاده با مقایسه جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری‌شده و دستور مورد بررسی قرار گرفت و مقدار اندک شاخص خطای HSEM (کمتر از ۰.۳٪) حاکی از عملکرد مناسب فرآیند کنترلی در سیستم شبیه‌سازی توسعه یافته بود.

۴- درستی عملکرد چهارچوب شبیه سازی ترکیبی توسعه یافته، با استفاده از شاخص خطای پیشنهاد شده توسط ماسکودا و همکارانش (ϵ^{rms})، مورد بررسی قرار گرفت. مقدار این شاخص حدود ۰.۴/۹٪ بود که این میزان نشان دهنده دقت و عملکرد مناسب سیستم توسعه یافته می‌باشد.

- Accordion-Web RBS connection”, *Journal of Structural Steel Research*, 66: 277-288.
- [22] Morrison, M., Schweizer, D. Hassan, T., (2015), “An innovative seismic performance enhancement technique for steel building moment resisting connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, 109, pp. 34-46.
- [23] Zakersalehi M., Tasnimi AA., Ahmadizadeh M., (2018), “Reliable nonlinear hybrid simulation using modified operator splitting technique”, *Structural Control and Health Monitoring*, e2283.
- [24] AISC (2016) “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”, ANSI/AISC 341-16. American Institute of Steel Construction, Chicago (IL).
- [25] AISC (2016) “Specification for Structural Steel Buildings”, ANSI/AISC 360-16. American Institute of Steel Construction, Chicago (IL).
- [26] FEMA 356, (2000), “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings”, Washington DC.
- [27] McKenna F, Fenves GL, Scott MH, Jeremic B., (2000), Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees): Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley, CA, USA.
- [28] ASTM, "E 8M Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials [Metric]," (2016) Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 3.01
- [29] Terzic, V., (2011), “Force-based Element vs. Displacement-based Element”, Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Berkeley.
- [30] Imanpour A., Siguier R., Leclerc M., Tremblay R, (2017), “Application of Hybrid Simulation for the Evaluation of the Buckling Response of Steel Braced Frame Columns,” *Proceedings EUROSTEEL*, 8th European Conference on Steel and Composite Structures, Copenhagen, Denmark.
- [31] Schellenberg AH., Mahin SA., Fenves GL., (2009), “Advanced Implementation of Hybrid Simulation”, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California: Berkeley, California.
- [32] PEER Ground Motion Database (2019) <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- [33] AISC (2016) “Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Application”, ANSI/AISC
- [10] Abbiati, G., Bursi, O.S., Caperan, Di Sarno, P., F.J. Molina, L., Paolacci, F., Pegon, P., (2015), “Hybrid simulation of a multi-span RC viaduct with plain bars and sliding bearings”, *Earthquake Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 44 (13) :2221–2240
- [11] Terzic V., Stojadinovic B., (2014), “Hybrid simulation of bridge response to three-dimensional earthquake excitation followed by truck load”, *Journal of Structural Engineering*, 140(8): A4014010.1-A4014010.11
- [12] Mahmoud H., Elnashai A., Spencer B., Kwon O., Bennier D., (2013), “Hybrid simulation for earthquake response of semirigid partial-strength steel frames”, *Journal of Structural Engineering*, 139(7): 1134-1148.
- [13] Mostafaei, H., (2013a), “Hybrid fire testing for assessing performance of structures in fire—Application.”, *Fire Safety Journal*, 56 (Feb): 30–38.
- [14] Franssen J.-M., SAFIR, (2005), “A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire”, *AISC. Engineering Journal*, 42 (3) 143–158
- [15] Whyte, C. A., Mackie K. R., Stojadinovic B., (2015), “Hybrid simulation of thermomechanical structural response.” *Journal of Structural Engineering*. 142 (2): 04015107
- [16] Uang CM., Bondad D., Lee CH., (1998), “Cyclic performance of haunch repaired steel moment connections: experimental testing and analytical modeling”, *Journal of Engineering Structures*, 20(4-6):552-561
- [17] Engelhardt MD., Sabol TA., (1998), “Reinforcing of steel moment connections with cover plates: benefits and limitations”, *Journal of Engineering Structures*, 20(4-6):510-520
- [18] Plumier A., (1997), “The dogbone: back to the future”, *Engineering Journal*, AISC:61-67
- [19] Engelhardt MD., Winneberger T., Zekany AJ., Potyraj TJ., (1998), “Experimental investigation dogbone moment connections”, *Engineering Journal*, AISC :128-139
- [20] Deylami, A., Toloukian, A. R. (2011). “Effect of Geometry of Vertical Rib Plate on Cyclic Behaviour of Steel Beam to Built-up Box Column Moment Connection”, *Procedia Engineering*, 14, 3010–3018.
- [21] Mirghaderi R, Torabian S, Imanpour A., (2010), “Seismic performance of the

- Hybrid Simulation. Part I: Methodology and Experimental Verification”, Journal of Structural Engineering, 133: 1100-1108.
- [36] Mosqueda G., Stojadinovic B, Mahin S.A., (2007), “Real-time error monitoring for hybrid simulation. II: structural response modification with error”, Journal of Structural Engineering, 133(8): 1109-1117.
- 358-16. American Institute of Steel Construction, Chicago (IL).
- [34] Chen, C. C., Lin, C. C., Lin, C. H., (2006), “Ductile moment connections used in steel column-tree moment resisting frames” Journal of Constructional Steel Research, 793-801.
- [35] Mosqueda G., Stojadinovic, B., Ahmadizadeh, M., (2007), “Real-Time Error Monitoring for

Developing a hybrid simulation framework and evaluating its efficiency by studying a steel beam-column moment connection

Zeinab Jannesari¹, Abbas Ali Tasnimi^{2*}, Maedeh Zakersalehi

- 1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University
- 2- Full Professor in structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University
- 3- Assistant Professor of Earthquake and Structural Engineering, Niroo Research Institute

Abstract

Hybrid simulation is a relatively new and efficient tool that uses the advantages of both numerical and experimental methods to evaluate the performance of structures under different loadings. In this paper, a hybrid simulation framework has been developed, in which OpenSees was considered as finite element software for modeling numerical part, OpenFresco as middleware for data exchange and LabVIEW as data collector and actuator movement controller. Utilizing OpenFresco in the developed framework, would be facilitated conducting geographically distributed hybrid simulations. As the connection between OpenFresco and LabVIEW is hand shaking, the processing speed is very high and the delay between sending displacement and receiving force is only due to the dynamics and movement of the engine and the bandwidth of the sensor, so there is no interruption during this process and in this case, there is no need to define the predictor-corrector algorithm to keep the actuator movement continuous. To validate the accuracy and efficiency of the developed framework, an improved widened flange beam-column connection was considered in a one story one bay steel moment frame, and the mentioned frame was divided into two numerical and experimental substructures in such a way that half of the frame was modeled two-dimensionally in OpenSees and the other half was constructed in the laboratory. The horizontal acceleration of the Tabas earthquake was subjected to the frame. The accuracy of the control system which was used in the developed framework was investigated by comparing the measured and the command displacements, and the small value of HSEM indicated the proper performance of the control process. To evaluate the performance of hybrid simulation, a coupled numerical simulation (virtual hybrid simulation) was considered as a reference model. In this fully numerical simulation, ABAQUS and OpenSees were used as finite element software and OpenFresco as middleware. Results of coupled numerical simulation and hybrid simulation were compared with each other and the obtained accuracy index (e^{rms}) indicated the accuracy and appropriate performance of the developed hybrid simulation framework.

Keywords: Hybrid simulation, OpenFresco middleware, LabVIEW, improved widened flange beam-column connection