



## تحلیل پایداری شبیه سازی هیبرید زمان - واقعی سازه چند طبقه بر اساس تأخیر زمانی عملگر هیدرولیکی

مصطفی نصیری<sup>۱\*</sup>، علی صافی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، اصفهان، ایران  
<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ مهر ۱۳۹۶  
بازنگری: ۱۰ فروردین ۱۳۹۷  
پذیرش: ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۷  
ارائه آنلاین: ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۷

### کلمات کلیدی:

شبیه سازی هیبرید زمان  
واقعی  
عملگر هیدرولیکی  
تأخیر زمانی  
پایداری

**چکیده:** شبیه سازی هیبرید زمان - واقعی (RTHS) نوعی شبیه سازی است که در آن یک قسمت واقعی از یک سازه در کنار شبیه سازی زمان - واقعی بقیه اجزای آن سازه تست می شود. در این مقاله یک ساختمان با سازه چند طبقه به بخش های عددی و واقعی تقسیم شده و رفتار ارتعاشی طبقات واقعی در میان شبیه سازی عددی بقیه طبقات بررسی می شود. برای اعمال اثر نیرو و اینرسی ناشی از بقیه طبقات به طبقه واقعی مورد نظر، از یک عملگر الکترو هیدرولیکی استفاده می شود. دینامیک عملگر هیدرولیکی را می توان با یک تأخیر زمانی تقریب زد و این تأخیر زمانی در حلقه بسته شبیه سازی می تواند باعث کاهش دقت و یا ناپایداری سیستم گردد. بنابراین از معادلات دیفرانسیل تأخیری (DDE) برای تعیین تأخیر زمانی بحرانی وابسته به پارامترهای سیستم استفاده می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی بیانگر تأثیر پارامترهای بدون بعد و پارتیشن بندی سازه در پایداری شبیه سازی هیبرید است.

## ۱- مقدمه

قابل اعتماد برای آنها وجود ندارد را جدا کرده و در میان شبیه سازی عددی بقیه اجزای سازه تست و مورد ارزیابی قرار داد. برای استفاده از شبیه سازی هیبرید زمان - واقعی در تست سازه، مجموعه های شامل میز لرزان، عملگرهای هیدرولیکی و کامپیوتر شبیه ساز زمان - واقعی نیاز است. این تکنولوژی به طور کلی دارای مزایایی چون صرفه جویی در هزینه، تکرارپذیری، غیرمخرب بودن، ایمنی و امکان تست در شرایط مختلف محیطی است. این شبیه سازی نیازمند سیستمهای تبدیلی میباشد که بتواند قسمت واقعی را به قسمت شبیه سازی متصل نماید. سیستمهای تبدیل به طور معمول عملگرها و سنسورها بوده و در بیشتر موارد این سیستمها یک اثر دینامیکی را به شبیه سازی هیبرید وارد می کنند که در سیستم واقعی وجود ندارد و اثر آن میتواند باعث کاهش دقت شبیه سازی و حتی ناپایداری سیستم گردد. برای داشتن یک شبیه سازی دقیقتر لازم است اثر دینامیکی اضافه شده از طرف این سیستمهای تبدیل کاهش یابد. این شبیه سازی از دو قسمت تشکیل میشود، قسمت اول شامل سازه واقعی است و قسمت دیگر مربوط به مدل ریاضی بقیه اجزای سازه است. انتقال نیروی بین این دو قسمت با استفاده از عملگرهای هیدرولیکی و میز لرزان انجام می شود ولی جابجایی و سرعت حاصل از سازه واقعی با استفاده از سنسور اندازه گیری

روشهای تجربی مختلفی برای تست یک سازه و اجزای آن در برابر بارهای ناشی از زلزله وجود دارد. از جمله مهمترین این روشها، تست کنترل نیروی مؤثر، تست شبه دینامیکی و تست هیبرید زمان واقعی می باشند. در تست نیروی مؤثر، سازه کامل ساخته شده و نیروی اینرسی توسط عملگرها به هر طبقه اعمال میشود. در تست شبه دینامیکی، نیروهای استاتیکی و نیروهای اینرسی توسط عملگرها و آهستهتر از زمان - واقعی به هر طبقه اعمال میشود. در تست هیبرید زمان واقعی، از عملگرهای هیدرولیکی برای اعمال نیروهای استاتیکی و از میز لرزان برای اعمال نیروهای اینرسی، به صورت زمان - واقعی استفاده می شود [۱]. تکنولوژی شبیه سازی هیبرید زمان - واقعی یک روش تجربی قدرتمند و با صرفه است که میتواند با فراهم آوردن یک محیط مجازی، به تست یک سازه در شرایط دینامیکی واقعی بپردازد و برای مهندسان سازه درک بهتری برای راستی آزمایی ایجاد نماید. شبیه سازی هیبرید در اواخر دهه ۶۰ میلادی به مهندسی سازه راه یافت و در دهه های گذشته پیشرفت قابل توجهی داشته است. با استفاده از این روش می توان قسمتهای بحرانی از یک سازه را که مدل دقیق و

با عدم قطعیت در میزان تأخیر زمانی، روش جبرانسازی بیش از حد است که مشکل پایداری را میتواند حل کند ولی از دقت شبیه سازی کاسته میشود. علاوه بر این، در زمینه تأخیر زمانی با در نظر گرفتن عدم قطعیت [۲۶] و یا تأخیر زمانی به صورت یک پارامتر تصادفی [۲۷] نیز مطالعاتی انجام شده است.

در پیاده سازی و اجرای شبیه سازی هیبرید، پایداری از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بعضی مطالعات انجام گرفته بر روی پایداری سیستم های هیبرید با فرض سیستم پیوسته بوده است. هوریوچی و همکاران ۱۹۹۹ به بررسی اثر یک جاذب انرژی در یک سیستم لوله کشی با استفاده از میز لرزان و شبیه سازی هیبرید زمان واقعی پرداخته اند. آنها با استفاده از روش پیشبینی چند جمله ای اثر تأخیر زمانی عملگر هیدرولیکی را جبران کرده و پایداری سیستم را بررسی نموده اند. این سیستم با سیگنال سینوسی با فرکانس ۵ هرتز و شتاب ۴۹۴ متر بر مجذور ثانیه تحریک شده و تأخیر زمانی عملگر حدود ۸ میلی ثانیه محاسبه شده است. نتایج نشان میدهد که شبیه سازی هیبرید تطابق خوبی با نتایج تجربی میز لرزان دارد [۲۸]. هوریوچی و کونوا ۲۰۰۱ در پژوهشی دیگر، پایداری یک سیستم جرم- فنر- دمپر سه درجه آزادی را با بررسی ضریب بهره تابع تبدیل حلقه باز در فضای فرکانس مورد ارزیابی قرار داده و وابستگی پایداری سیستم به جرم سازه واقعی را بررسی نمودند. آنها در روش چند جمله ای علاوه بر سیگنال جابجایی، از سیگنال های سرعت و شتاب نیز استفاده نموده و نشان دادند که اگر جرم سازه واقعی نسبت به شبیه سازی تا ۳ برابر نیز افزایش یابد، سیستم پایدار باقی میماند [۲۷]. والاس و همکاران ۲۰۰۵ با استفاده از معادلات دیفرانسیل تأخیری (DDE) اثر تأخیر زمانی در شبیه سازی هیبرید یک سیستم جرم- فنر- دمپر یک درجه آزادی با تکیه گاه متحرک را مطالعه نموده اند. در این شبیه سازی فنر به عنوان سازه واقعی در نظر گرفته شده و تحریک از طریق حرکت تکیه گاه صورت میگیرد. در این سیستم تأخیر بحرانی برابر ۱/۳ میلی ثانیه برای نسبت میرایی ۰/۰۲ محاسبه شده است. آنها نشان دادند که اگر از یک چند جمله ای مرتبه ۴ با ۱۶ نقطه قبلی استفاده شود آنگاه تأخیر زمانی مجاز حدود ۱۵ میلی ثانیه افزایش خواهد داشت [۲۹]. کریکو و همکاران ۲۰۰۶ اثر تأخیر زمانی در پایداری محلی و سراسری شبیه سازی هیبرید در یک پاندول متصل به سیستم جرم- فنر- دمپر را بررسی نموده اند. در این سیستم، پاندول به صورت سازه واقعی در نظر گرفته شده و سیستم جرم- فنر- دمپر شبیه سازی شده است. نتایج آنها نشان می دهد با افزایش تأخیر زمانی عملگر، سیستم پایداری خود را به صورت دوشاخگی هاپ از دست میدهد. برای بررسی دوشاخگی از روش مقیاس چندگانه با دو مقیاس کند و سریع استفاده شده است. این

شده و به کامپیوتر شبیه ساز ارسال میشود. با توجه به اینکه در اینجا سیستم میرایی کمی دارد، تأخیر زمانی ناشی از دینامیک عملگر هیدرولیکی میتواند تأثیر زیادی در پایداری شبیه سازی داشته باشد.

تاکنون روشهای مختلفی توسط محققین برای کاهش و یا جبران سازی اثر دینامیکی عملگرها در شبیه سازی هیبرید ارائه شده است. این روشها شامل روش برون یابی چند جمله ای [۴-۲]، روش تخمین اسمیت [۵]، روش EBC [۶]، روش برون یابی خطی شتاب [۷]، روش مشتق پیشخور [۸]، روش مدل معکوس [۹]، روش پیشبینی بر اساس مدل [۱۰]، روش کنترل تطبیقی با استفاده از خطای ردیابی [۱۱]، روش H $\infty$  و تغییر شکل حلقه [۱۳ و ۱۲] و روش پیشبینی بر اساس مدل با مشتق رو به عقب [۱۴] میباشد.

انتخاب گام زمانی و همچنین الگوریتم استفاده شده برای انتگرال گیری عددی در شبیه ساز زمان- واقعی نیز میتواند در پایداری و دقت شبیه سازی مؤثر باشد. روشهای انتگرال گیری مورد استفاده را میتوان به دو بخش روشهای صریح و روشهای ضمنی تقسیم بندی نمود. روش های انتگرال گیری صریح به علت سرعت بالاتر میتواند به صورت زمان- واقعی مورد استفاده قرار گیرد و لذا بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. روشهای انتگرال گیری صریح دارای پایداری تضمین شده نبوده و لازم است گامهای زمانی آن تا حد لازم کوچک انتخاب شوند. روش های ضمنی پایدار بوده ولی شامل پروسه های تکراری در هر بازه زمانی می باشد و استفاده از آن در شبیه سازی زمان- واقعی مشکلتر است. از جمله روشهای انتگرال گیری مورد استفاده در شبیه سازی هیبرید می توان به روش نیومارک [۱۵]، جداسازی اپراتور [۱۶]، جداسازی اپراتور  $\alpha$  [۱۷]، نیومارک اصلاح شده چانگ [۱۸]، کنترل نیروی معادل [۱۹]، نگاشت قطب [۲۰]، روش Gui- $\lambda$  [۲۱]، روش سراسری  $\alpha$  [۲۲] و روش  $\alpha$ -KR [۲۳] اشاره نمود.

یک عامل بسیار مهم در ایجاد ناپایداری، دینامیک سیستم عملگر و عدم توانایی آن در در اجرای فرمان صادر شده از طرف شبیه ساز به صورت زمان- واقعی میباشد. در شبیه سازی هیبرید ناگزیر از پذیرفتن این دینامیک ناخواسته بوده و لذا مطالعات زیادی بر روی پایداری این سیستمها با در نظر گرفتن دینامیک اضافه شده به صورت یک تأخیر زمانی خالص انجام شده است. تأخیر زمانی در شبیه سازی هیبرید به طور معمول به شکلهای مختلفی چون تأخیر زمانی ثابت و یا تأخیر زمانی متغیر و متناسب با دینامیک سیستم در نظر گرفته شده است. در مواردی که تأخیر زمانی متغیر در نظر گرفته میشود، یک پروسه آنلاین تطبیقی برای تخمین تأخیر زمانی وجود دارد [۲، ۱۰، ۲۴، ۲۵]. البته تخمین تأخیر زمانی فقط در بعضی موارد خاص ممکن و قابل استفاده بوده و پایداری روش تخمین نیاز به بررسی دارد. یک روش برای مقابله

نیومارک استفاده شود، نتایج حاصل از معادلات دیفرانسیل تأخیری در صورتی که تأخیر زمانی کوچک باشد، غیرمحافظةکارانه خواهد بود ولی در صورتی که تأخیر در حد میانی باشد نتایج محافظهکارانه است. در صورتی که از روش انتگرالگیری میانی استفاده شود آنگاه نتایج حاصل از حل معادلات دیفرانسیل تأخیری همیشه نتایج محافظهکارانه ارائه میدهد [۳۴]. زو و همکاران ۲۰۱۵ با استفاده از معیار شعاع طیفی برای سیستمهای گسسته، پایداری شبیه سازی هیبرید سیستمهای چند درجه آزادی را بررسی نمودند. اثر پارامترهای سیستم، تأخیر زمانی و گام زمانی انتگرالگیری ارزیابی شده است. نتایج آنها اثر روش پیشبینی چندجمله‌ای مرتبه ۳ در افزایش محدوده پایداری شبیه سازی هیبرید با استفاده از نمودارهای شعاع طیفی بر حسب فرکانس طبیعی سازه واقعی را نشان میدهد. نتایج نشان میدهد که در یک سازه دو طبقه، محدوده پایداری با افزایش میرایی سازه واقعی افزایش و با افزایش فرکانس طبیعی سازه واقعی کاهش مییابد [۳۵]. او و همکاران ۲۰۰۷ با استفاده از شعاع طیفی پایداری روش کنترل نیروی معادل در شبیه سازی هیبرید شبه‌دینامیکی یک سیستم یک درجه آزادی و با مدل گسسته را بررسی کرده‌اند. این روش به منظور حذف تکرار از الگوریتم انتگرالگیری ضمنی استفاده شده است و برای عملگر یک تابع تبدیل مرتبه ۲ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان میدهد که تأخیر زمانی برای جابجایی عملگر ۲۱ میلیثانیه ولی برای نیروی عملگر ۸ میلیثانیه است [۱۹]. آنها همچنین در پژوهشی دیگر با استفاده از بیشینه تأخیر زمانی در سیستم به جبران‌سازی تأخیر زمانی در جابجایی طی یک روند بهینه پرداخته‌اند. نتایج نشان دهنده تطابق محدوده پایداری حاصل از بررسی شعاع طیفی با نتایج بدست آمده از روش راث میباش [۲۶]. در پژوهشهای اخیر، روشهای پیشبینی پایداری و شناسایی عملکرد برای سیستمهای یک درجه آزادی و سیستمهای چند درجه آزادی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش قبل از بررسی اثر دینامیک عملگر در پایداری سیستم، به ارزیابی اثر پارتیشن‌بندی سیستم به قسمتهای واقعی و قسمتهای عددی، در پایداری و عملکرد سیستم میپردازد [۳۶ و ۳۷].

برای رسیدن به یک شبیه سازی هیبرید پایدار و دقیق، لازم است درک درستی از تأثیر پارامترهای مختلف در شبیه سازی هیبرید مورد بررسی وجود داشته باشد. در این مقاله با استفاده از معادلات دیفرانسیل تأخیری، به بررسی اثر تأخیر زمانی ناشی از عملگر هیدرولیکی در پایداری شبیه سازی هیبرید یک ساختمان با سازه چند طبقه پرداخته می‌شود. همچنین اثر پارامترهای بیبعد در پایداری شبیه سازی، با در نظر گرفتن تأخیر زمانی عملگر هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. فرض شده است که نیروهای استاتیکی و اینرسی فقط توسط عملگر

سیستم در تأخیرهای ۵ و ۱۱ میلی‌ثانیه ناپایدار ولی در تأخیر زمانی ۷/۵ میلی‌ثانیه پایدار است [۳۰]. مرکان و ریکل ۲۰۰۸ پایداری شبیه سازی‌های هیبرید شبه دینامیکی را برای سیستم جرم-فنر-دمپر یک، دو و سه درجه آزادی بررسی نموده‌اند. آنها برای بدست آوردن تأخیر زمانی بحرانی از مکان هندسی ریشه‌ها استفاده نموده و تأخیر زمانی مربوط به عملگرهای مختلف در طبقات را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها نشان داده‌اند که با اضافه شدن یک درجه آزادی به سیستم که عملگر آن دارای تأخیر زمانی نباشد، محدوده مجاز تأخیر زمانی برای عملگرهای دیگر افزایش مییابد. در این پژوهش همچنین نشان داده شده است که کاهش تأخیر زمانی مربوط به یک عملگر باعث افزایش محدوده مجاز تأخیر زمانی برای عملگرهای دیگر میشود [۳۱]. چی و همکاران ۲۰۱۰ پایداری شبیه سازی هیبرید یک سیستم جرم-فنر-دمپر یک درجه آزادی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش جرم، فنر و دمپر به دو بخش واقعی و شبیه سازی شده تقسیم شده‌اند. با استفاده از روش مکان هندسی ریشه‌ها، اثر نسبت جرم، نسبت میرایی و نسبت سختی سازه واقعی نسبت به شبیه سازی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آنها نشان میدهد که نسبت جرمهای بالا و پایین میتواند باعث ناپایداری شبیه سازی هیبرید شود. در حالتی که دمپر به عنوان سازه واقعی انتخاب شود، اثر تأخیر زمانی کمتر خواهد بود [۳۲]. بتلهو و کریستنسون ۲۰۱۵ با استفاده از روش کنترل مقاوم برای سیستمهای چند ورودی و چند خروجی، پایداری شبیه سازی هیبرید با وجود چندین عملگر را ارزیابی نمودند. در این روش لزومی ندارد که دینامیک عملگر به صورت تأخیر زمانی خالص در نظر گرفته شود و میتوان دینامیک واقعیتری از عملگر را در نظر گرفت. دینامیک عملگر با عدم قطعیت بررسی شده است و پایداری سیستم با تئوری بهره کوچک ارزیابی شده است [۳۳]. برای بررسی پایداری سیستم حلقه بسته میتوان با در نظر گرفتن زمان نمونه برداری، از مدل گسسته سیستم استفاده نمود. در ادامه برخی از پژوهشهایی که با فرض گسسته بودن سیستم به بررسی پایداری سیستمهای هیبرید پرداخته‌اند، اشاره می‌شود. چن و ریکل ۲۰۰۸ پایداری شبیه سازی هیبرید یک سیستم یک درجه آزادی را مطالعه کرده‌اند. در این پژوهش پایداری سیستم با در نظر گرفتن تأخیر زمانی عملگر و روش انتگرالگیری صریح در شبیه سازی عددی، بررسی شده است. تأخیر زمانی عملگر با یک تابع تبدیل گسسته مدلسازی شده و اثر پارامترهای سیستم و همچنین الگوریتم انتگرالگیری در پایداری سیستم مطالعه شده است. مطالعه انجام شده بیانگر تفاوت قابل توجه نتایج نسبت به استفاده از معادلات دیفرانسیل تأخیری دارد و لزوم بررسی روش انتگرالگیری در پایداری را نشان می‌دهد. نتایج نشان میدهد که اگر از روش انتگرالگیری صریح

$$m_2 \ddot{x}_{21} + c_2 \dot{x}_{21} + k_2 x_{21} = F_2(t) \quad (5)$$

$$m_3 \ddot{x}_{32} + c_3 \dot{x}_{32} + k_3 x_{32} = F_3(t) \quad (6)$$

در معادلات (۴) تا (۶)، نیروهای  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_3$  با استفاده از روابط (۷) تا (۹) محاسبه میشوند.

$$F_1(t) = -m_1 \ddot{x}_g + c_2 \dot{x}_{21} + k_2 x_{21} \quad (7)$$

(۸)

$$F_2(t) = c_3 \dot{x}_{32} + k_3 x_{32} + \frac{m_2}{m_1} (-c_2 \dot{x}_{21} - k_2 x_{21} + c_1 \dot{x}_{10} + k_1 x_{10})$$

$$F_3(t) = \frac{m_3}{m_2} (-c_3 \dot{x}_{32} - k_3 x_{32} + c_2 \dot{x}_{21} + k_2 x_{21}) \quad (9)$$

که در اینجا  $x_{21}$  جابجایی طبقه دوم نسبت به اول،  $x_{32}$  جابجایی طبقه سوم نسبت به دوم،  $x_1$  جابجایی طبقه اول نسبت به زمین و  $x_g$  نیز بیانگر جابجایی زمین است. در اینجا بسته به اینکه سازه کدام طبقه به عنوان سازه واقعی برای تست انتخاب شود، نیروی  $F_1$ ،  $F_2$  و یا  $F_3$  توسط عملگر هیدرولیکی اعمال میشود. به عنوان نمونه اگر سازه طبقه دوم برای تست انتخاب شود آنگاه در معادلات از  $F_2(t-\tau)$  استفاده میشود.

### ۳- شبیه سازی هیبرید زمان- واقعی

در شبیه سازی هیبرید زمان-واقعی، به جای ساخت کل سازه، فقط سازه مورد مطالعه ساخته شده و حرکت بقیه قسمتهای سازه و اثر آن بر روی طبقه مورد نظر، شبیه سازی میشود. با استفاده از این روش نیازی به ساخت کل سازه نبوده و سازه مورد نظر با صرف زمان و هزینه کمتر مورد ارزیابی قرار میگیرد. در روابط ۴ تا ۶، با توجه به اینکه کدام طبقه به صورت واقعی در نظر گرفته شود می توان نیروی اعمال شده به آن طبقه را با تأخیر در نظر گرفت. برای نمونه در صورتی که فرض شود طبقه دوم به صورت واقعی وجود داشته باشد، آنگاه برای انجام شبیه سازی هیبرید زمان- واقعی لازم است اثر نیرو و اینرسی ناشی از حرکت طبقه های اول و سوم به صورت عددی شبیه سازی شده و با استفاده از عملگر هیدرولیکی و میز لرزان به طبقه دوم اعمال شود. برای این منظور، همانطور که در معادلات ۱ و ۳ مشاهده میشود، برای شبیه سازی عددی حرکت طبقات اول و سوم لازم است جابجایی و سرعت طبقه دوم با استفاده از سنسور اندازه گیری شده و به شبیه ساز ارسال شود. برای اعمال اثر نیرو و اینرسی ناشی از طبقات اول و سوم نیز می توان از عملگر هیدرولیکی و یا میز لرزان استفاده کرد. بسته به سهم عملگر هیدرولیکی و میز لرزان در اعمال شتاب و نیرو میتوان روابط ۱۰ و ۱۱ را ارائه نمود.

$$a = \frac{\eta_a}{m_1} (-c_2 \dot{x}_{21} - k_2 x_{21} + c_1 \dot{x}_{10} + k_1 x_{10}) - \frac{\eta_f}{m_1} (c_3 \dot{x}_{32} - k_3 x_{32}) \quad (10)$$

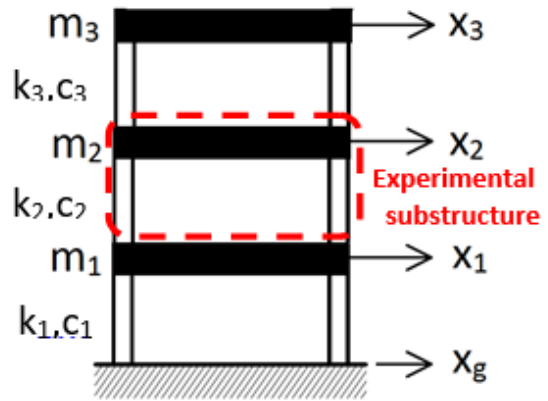
(۱۱)

$$F = (1 - \eta_a) \frac{m_2}{m_1} (-c_2 \dot{x}_{21} - k_2 x_{21} + c_1 \dot{x}_{10} + k_1 x_{10}) + (1 - \eta_f) (c_3 \dot{x}_{32} - k_3 x_{32})$$

هیدرولیکی اعمال میشوند و از میز لرزان استفاده نمی شود. با توجه به اینکه تأخیر زمانی ناشی از سنسورهای استفاده شده در شبیه سازی نسبت به تأخیر زمانی ناشی از عملگر هیدرولیکی ناچیز است، لذا از تأخیر زمانی سنسورها نیز صرف نظر شده است. علاوه بر این، با توجه به اینکه پارتیشن بندی سیستم به قسمتهای واقعی و مدل میتواند در پایداری سیستم مؤثر باشد لذا در اینجا به تأثیر پارتیشن بندی سیستم در محدودیتهای پایداری شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- مدل سازی ریاضی ارتعاشات سازه

برای انجام شبیه سازی هیبرید زمان-واقعی ابتدا لازم است مدل ریاضی سیستم را بدست آورد. در اینجا به عنوان نمونه یک ساختمان سه طبقه مطابق شکل ۱ را در نظر گرفته شده و هدف آن است که سازه مربوط به یک طبقه (به عنوان نمونه طبقه دوم) به صورت واقعی در میان شبیه سازی حرکت بقیه طبقات تست شود.



شکل ۱. مدل ارتعاشی یک ساختمان سه طبقه

Fig 1. Three-story building model

با در نظر گرفتن حرکت های افقی سازه، معادلات حاکم بر این سیستم به صورت معادلات ۱ تا ۳ خواهد بود.

$$m_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) = -c_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) \quad (1)$$

(۲)

$$m_2 (\ddot{x}_2 + \ddot{x}_g) = -c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2 (x_2 - x_1) + c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_3 (x_3 - x_2) \quad (3)$$

(۳)

$$m_3 (\ddot{x}_3 + \ddot{x}_g) = -c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - k_3 (x_3 - x_2)$$

که در اینجا  $x_1$ ،  $x_2$ ،  $x_3$  بیانگر جابجایی طبقات نسبت به زمین است. با توجه به اینکه میزان تغییر طول فنرها و سرعت دمپرها بر اساس جابجایی نسبی طبقات نسبت به هم بدست می آید لذا با تعریف متغیرهای  $x_{21} = x_2 - x_1$  و  $x_{32} = x_3 - x_2$ ، معادلات حاکم بر سازه به شکل معادلات ۴ تا ۶ بدست می آید.

$$m_1 \ddot{x}_{10} + c_1 \dot{x}_{10} + k_1 x_{10} = F_1(t) \quad (4)$$

$$\mathbf{X} = [x_{10} \quad x_{21} \quad x_{32} \quad \dot{x}_{10} \quad \dot{x}_{21} \quad \dot{x}_{32}]^T \quad (13)$$

مقادیر  $\lambda_i \in \mathbb{C}$  که از حل معادله ۱۳ بدست می آید، مقادیر ویژه سیستم هستند که این مقادیر میتواند برای بررسی پایداری مورد استفاده قرار گیرد. در صورتی که این مقادیر در سمت چپ صفحه مختلط قرار گیرند آنگاه سیستم پایدار خواهد بود. در شبیه سازی هیبرید ساختمان سه طبقه، برای بدست آوردن مدل فضای حالت، بردار متغیرهای حالت به شکل رابطه ۱۴ انتخاب میگردد.

$$\mathbf{X} = [x_{10} \quad x_{21} \quad x_{32} \quad \dot{x}_{10} \quad \dot{x}_{21} \quad \dot{x}_{32}]^T \quad (14)$$

با در نظر گرفتن شتاب زمین  $\ddot{x}_g$  به عنوان ورودی سیستم و استفاده از معادلات ۴ تا ۶، مدل فضای حالت به شکل رابطه ۱۵ بدست می آید.

$$\dot{\mathbf{X}} = A_0 \mathbf{X}(t) + A_1 \mathbf{X}(t - \tau) + B u \quad (15)$$

که  $A_0$  بیانگر ضرایب فضای حالت برای متغیرهای بدون تأخیر زمانی و  $A_1$  بیانگر ضرایب برای متغیرهای همراه با تأخیر زمانی ثابت است. با توجه به اینکه در این سیستم فقط یک تأخیر زمانی  $\tau$  ثابت مربوط به عملگر هیدرولیکی در نظر گرفته شده است لذا  $k=1$  میباشد. در اینجا پارامترهای بدون بعد نیز به صورت روابط ۱۶ تعریف شده است.

(۱۶)

با استفاده از پارامترهای بدون بعد، ماتریس‌های  $A_0$ ،  $A_1$  و  $B$  با استفاده از روابط ۱۷ تا ۱۹ بدست می آیند.

$$\omega_1 = \sqrt{k_1 / m_1}, \quad \zeta_1 = c_1 / 2\sqrt{k_1 m_1}, \quad \alpha_1 = m_2 / m_1$$

$$\omega_2 = \sqrt{k_2 / m_2}, \quad \zeta_2 = c_2 / 2\sqrt{k_2 m_2}, \quad \alpha_2 = m_3 / m_2$$

$$\omega_3 = \sqrt{k_3 / m_3}, \quad \zeta_3 = c_3 / 2\sqrt{k_3 m_3}$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\omega_1^2 & \alpha_1 \omega_2^2 & 0 & -2\zeta_1 \omega_1 & 2\alpha_1 \zeta_2 \omega_2 & 0 \\ 0 & -\omega_2^2 & 0 & 0 & -2\zeta_2 \omega_2 & 0 \\ 0 & \omega_3^2 & -\omega_3^2(1 + \alpha_2) & 0 & 2\zeta_3 \omega_3 & -2\zeta_3 \omega_3(1 + \alpha_2) \end{bmatrix} \quad (17)$$

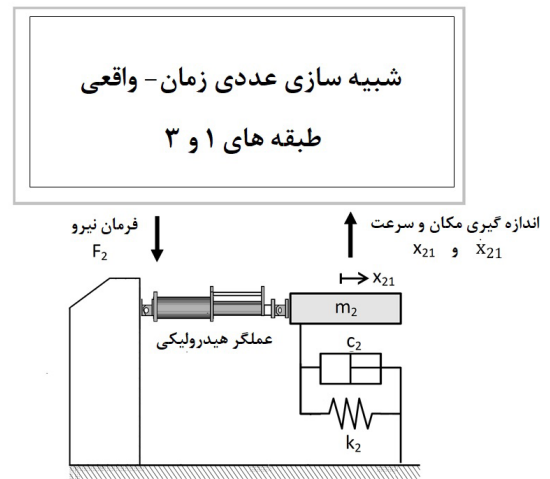
$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_1^2 & -\alpha_1 \omega_2^2 & \alpha_2 \omega_3^2 & 2\zeta_1 \omega_1 & -2\alpha_1 \zeta_2 \omega_2 & 2\alpha_2 \zeta_3 \omega_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$B = [0 \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad 0 \quad 0]^T \quad (19)$$

با توجه به ماتریسهای  $A_0$  و  $A_1$  بدست آمده، معادله مشخصه حاکم بر سیستم به صورت معادله ۲۰ خواهد بود.

$$\det(\lambda I - A_0 - A_1 e^{-\tau \lambda}) = 0 \quad (20)$$

که  $a$  بیانگر شتابی است که توسط میز لرزان اعمال میشود و  $F$  نشان دهنده نیرویی است که عملگر هیدرولیکی وارد میکند. در اینجا بیانگر سهم شتاب ناشی از نیروهای اینرسی طبقات اول و سوم و بیانگر سهم شتاب ناشی از نیروهای استاتیکی طبقات اول و سوم است که میتواند توسط میز لرزان اعمال شود. در صورتی که از میز لرزان استفاده نشود و کلیه این نیروها فقط از طریق عملگر هیدرولیکی اعمال شود آنگاه  $\eta_a = \eta_f = 0$  در نظر گرفته میشود. با در نظر گرفتن اثر  $\eta_f$  تأخیر زمانی عملگر هیدرولیکی در اعمال نیرو به سازه طبقه دوم و  $\eta_f$  صرف نظر کردن از تأخیرهای زمانی مربوط به سنسورها، کافی است در معادلات حاکم بر سیستم به جای  $F_2(t)$  از  $F_2(t-\tau)$  استفاده شود. شکل ۲ شمای کلی شبیه سازی هیبرید برای تست سازه طبقه دوم از یک ساختمان سه طبقه را نشان میدهد.



شکل ۲. شماتیک روش شبیه سازی هیبرید زمان- واقعی برای تست سازه طبقه دوم  
Fig 2. Real-time hybrid simulation for testing the second story of a three-story building

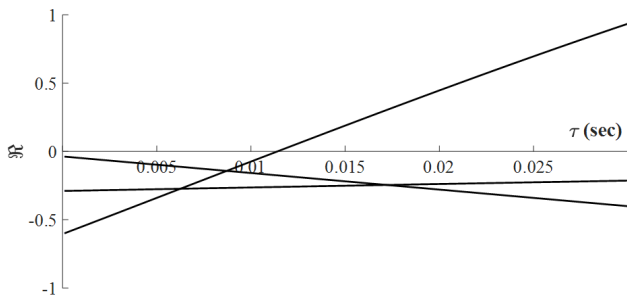
### ۳- بررسی پایداری

مدل فضای حالت یک سیستم خطی غیرمتغیر با زمان و با چندین تأخیر زمانی ثابت ( $\tau_i$ ) به صورت معادله ۱۲ میباشد.

$$\det\left(\lambda I - A_0 - \sum_{i=1}^k A_i e^{-\tau_i \lambda}\right) = 0 \quad (12)$$

که  $\lambda \in \mathbb{C}$  و  $\tau \in \mathbb{R}^+$ ،  $u \in \mathbb{R}^m$ ،  $X \in \mathbb{R}^n$ ،  $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$  که بردار متغیرهای حالت،  $u$  بردار ورودیها و  $n$  نیز بیانگر تعداد تأخیرهای زمانی مختلف موجود در سیستم است. معادله ۱۲ به معادله دیفرانسیل تأخیری معروف است و با توجه به اینکه تأخیر زمانی در مشتق متغیرهای حالت ظاهر نشده است، این معادله دیفرانسیل تأخیری از نوع عقب افتاده میباشد. معادله مشخصه معادلات دیفرانسیل ۱۳ به صورت معادله ۱۳ بدست می آید.

مختلف شبیه سازی بر روی محدوده پایداری سیستم بررسی می‌گردد. با توجه به اینکه فضای حالت سیستم مرتبه ۶ میباشد لذا معادله مشخصه سیستم دارای ۶ ریشه بوده که نسبت به محور حقیقی متقارن میباشند. شکل ۳-الف بیانگر ریشه‌های معادله مشخصه سیستم در صفحه مختلط میباشند. همانطور که در شکل مشخص است، با افزایش تأخیر زمانی در بازه  $0 < \tau < 0.03 \text{ sec}$  یک جفت ریشه محور موهومی را قطع نموده ولی دو جفت ریشه دیگر همچنان در سمت چپ صفحه باقی مانده‌اند. شکل ۳-ب بخش حقیقی ریشه‌ها را به ازای تغییر تأخیر زمانی نشان میدهد که بیانگر آن است که در  $\tau = 0.012 \text{ sec}$  سیستم در مرز ناپایداری قرار می‌گیرد.

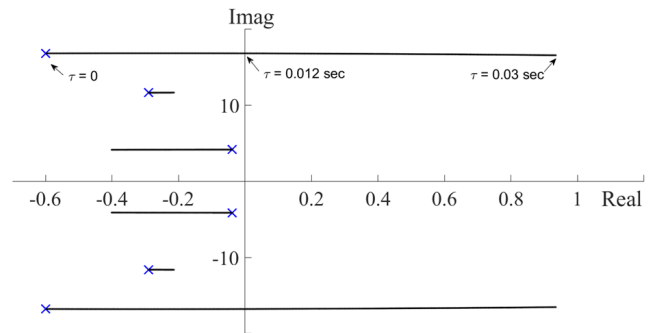


(ب)

که  $\lambda$  مقادیر ویژه بوده که از حل معادله جبری غیرخطی ۲۰ بدست می‌آیند. برای حل این معادله از ابزار Biftool و روش آرنولدی که یک الگوریتم متعارف برای حل مسئله مقدار ویژه است، استفاده شده است.

#### ۴-نتایج

نتایج شبیه سازی هیبرید زمان-واقعی یک ساختمان سه طبقه که طبقه دوم آن به صورت واقعی و طبقات اول و سوم آن شبیه سازی شده اند، ارائه میشود. در این شبیه سازی، اثر نیروهای استاتیکی و نیروهای اینرسی با استفاده از یک عملگر هیدرولیکی به طبقه دوم اعمال میشود و از میز لرزان استفاده نمیشود. اثر عملگر هیدرولیکی به صورت یک تأخیر زمانی ثابت در نظر گرفته میشود و تأثیر پارامترهای



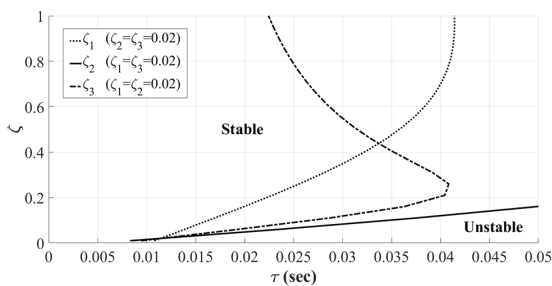
(الف)

شکل ۳. (الف) مکان هندسی ریشه‌ها در صفحه مختلط (ب) بخش حقیقی مکان هندسی ریشه‌ها به ازای تغییرات تأخیر زمانی ( $\tau$ )

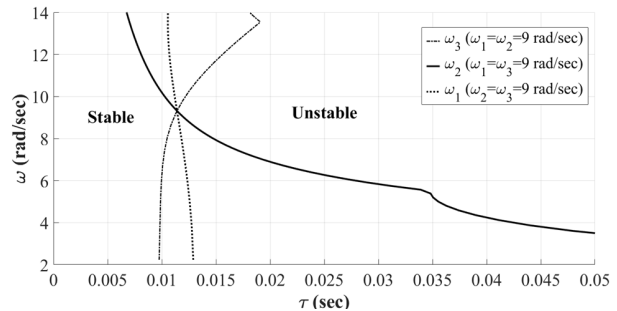
Fig 3. (a) Root locus in s-plane (b) Real part of roots versus time delay

در شکل ۴-الف تأثیر پارامترهای  $\omega$  بر محدوده پایداری سیستم با فرض ثابت بودن میرایی ( $\zeta = 0.02$ ) به ازای مقادیر مختلف تأخیر زمانی ( $\tau$ ) عملگر مشاهده میشود. همانطور که مشاهده میشود، با کاهش فرکانس ( $\omega$ )، محدوده مجاز تأخیر زمانی ( $\tau$ ) برای پایداری نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۴-ب، تأثیر میرایی طبقات بر روی پایداری سیستم بررسی شده است. در این شبیه سازی با فرض ثابت بودن فرکانس

مورد بررسی ها به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده میشود، مقدار  $\zeta_3$  محدوده‌های سخت تری برای پایداری ایجاد میکند. برای نمونه در تأخیر زمانی بحرانی  $\tau = 0.02 \text{ sec}$  محدوده‌های پایداری به صورت  $0.01 < \zeta_3 < 0.02$ ،  $\zeta_2 > 0.02$  و یا به صورت محدوده  $\zeta_1 > 0.02$  میباشد که بیانگر نقش محدود کننده  $\zeta_3$  نسبت به پارامترهای دیگر است.



(ب)



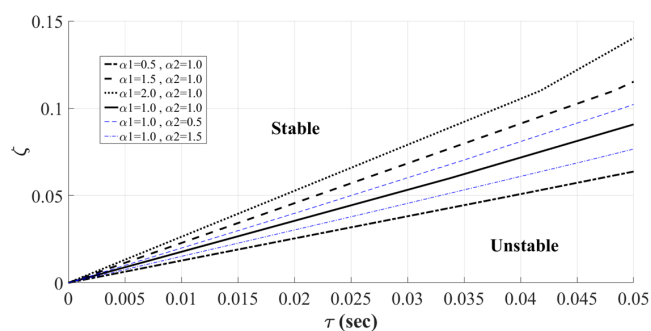
(الف)

شکل ۴. (الف) محدوده پایداری سیستم به ازای میرایی‌های مختلف (ب) محدوده پایداری سیستم به ازای فرکانس‌های مختلف

Fig 4. Stability margin for (a) different frequencies (b) different damping ratios

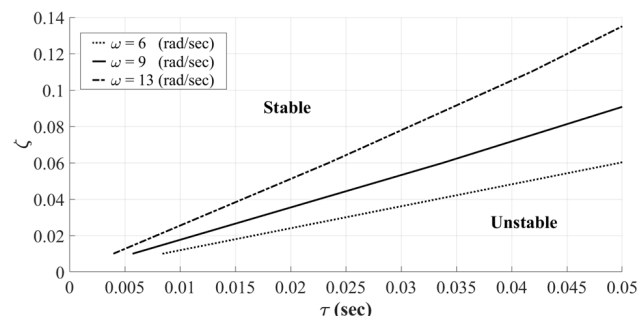
در شکل ۶، به بررسی اثر پارتیشن بندی سازه در پایداری شبیه سازی پرداخته شده است. برای این منظور، طبقات مختلف به عنوان طبقه واقعی در نظر گرفته شده است و محدوده پایداری بدست آمده است. همانطور که در شکل ۶-الف مشاهده می شود، برای نمونه در صورتی که میرایی سازه  $\zeta = 0.2$  باشد، آنگاه در صورتی که طبقه اول، دوم و یا سوم به عنوان طبقات واقعی انتخاب شوند آنگاه محدوده تأخیر زمانی برای پایداری به ترتیب  $\tau < 0.06 \text{ sec}$ ،  $\tau < 0.105 \text{ sec}$  و  $\tau < 0.065 \text{ sec}$  خواهد بود که بیانگر آن است که اگر طبقه دوم به عنوان طبقه واقعی انتخاب شود، محدوده تأخیر زمانی برای پایداری کمتر خواهد بود. همچنین شکل ۶-ب مشاهده می شود که به عنوان نمونه اگر فرکانس سیستم برابر  $\omega = 8 \text{ rad/sec}$  باشد آنگاه در صورتی که طبقه اول، دوم و یا سوم به عنوان طبقات واقعی انتخاب شوند آنگاه محدوده تأخیر زمانی برای پایداری به ترتیب  $\tau < 0.032 \text{ sec}$ ،  $\tau < 0.017 \text{ sec}$  و  $\tau < 0.015 \text{ sec}$  خواهد بود ولی برای نمونه در صورتی که فرکانس سیستم کمتر و برابر  $\omega = 6 \text{ rad/sec}$  باشد آنگاه در صورتی که طبقه اول، دوم و یا سوم به عنوان طبقات واقعی انتخاب شوند آنگاه محدوده تأخیر زمانی برای پایداری به ترتیب  $\tau < 0.0375 \text{ sec}$ ،  $\tau < 0.028 \text{ sec}$  و  $\tau < 0.017 \text{ sec}$  خواهد بود. بنابراین در فرکانس های بالا طبقه سوم و در فرکانس های پایین طبقه دوم محدوده تأخیر زمانی کمتری ایجاد خواهد کرد.

نسبت فرکانس های مودال رابطه مستقیمی با نسبت جرم ها در سیستم دارد. در اینجا برای نسبت جرم ها از پارامترهای بدون بعد  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  استفاده شده است. در شکل ۷ به بررسی اثر پارامترهای  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  در محدوده پایداری سیستم پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می شود، در حالتی که  $\alpha_1 = 1.5$ ،  $\alpha_2 = 1$  محدوده مجاز تأخیر زمانی نسبت به حالتی که  $\alpha_1 = 1$ ،  $\alpha_2 = 1.5$  کمتر است. بنابراین افزایش نسبت جرم ها در طبقه های پایین محدودیت بیشتری در پایداری و محدوده مجاز تأخیر زمانی ایجاد می نماید.



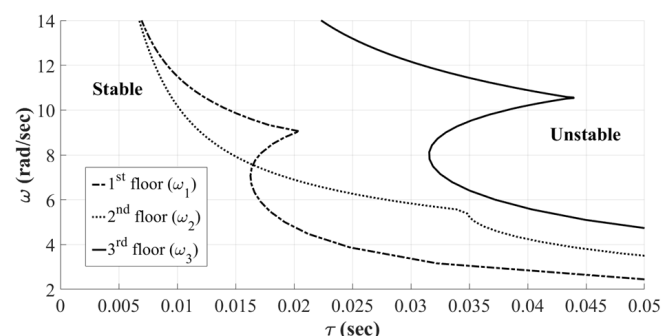
شکل ۷. اثر نسبت جرم ها در محدوده پایداری سیستم  
Fig7. Effect of mass ratios on stability margin

در شکل ۵، با فرض  $\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_3$  و همچنین فرض  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ ، پایداری سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که انتظار می رود با افزایش  $\omega$  محدوده مجاز تأخیر زمانی کاهش ولی با افزایش  $\zeta$  محدوده مجاز تأخیر زمانی افزایش می یابد. به گونه ای که به عنوان نمونه در  $\zeta = 0.2$ ، به ازای مقادیر  $\omega$  برابر ۶، ۹ و ۱۳ رادیان بر ثانیه، مقادیر مجاز تأخیر زمانی به ترتیب برابر  $0.105$ ،  $0.065$  و  $0.032$  ثانیه می باشد.

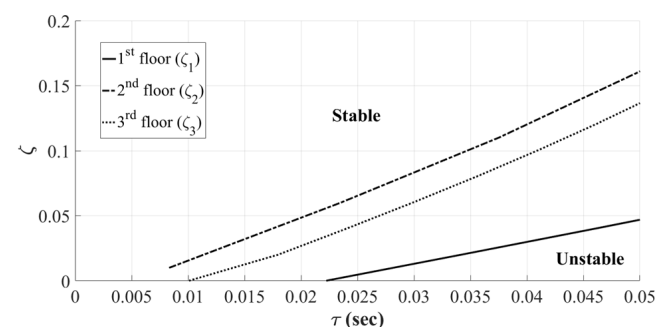


شکل ۵. محدوده پایداری سیستم با فرض  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$  و  $\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_3$

Fig5. Stability margin for different frequencies assuming g



(الف) محدوده پایداری سیستم به ازای میرایی های مختلف  
(a) Stability margin for different frequencies



(ب) محدوده پایداری سیستم به ازای فرکانس های مختلف  
(b) Stability margin for different damping ratios

شکل ۶. اثر پارتیشن بندی سیستم با در نظر گرفتن طبقات ۱، ۲ و ۳ به عنوان طبقات واقعی

Fig6. Effect of partitioning on stability margin

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، بررسی پایداری شبیه سازی هیبرید زمان- واقعی با استفاده از معادلات دیفرانسیل تأخیری برای یک ساختمان با سازه چند طبقه صورت گرفته است. با توجه به اینکه برای اعمال نیروهای استاتیکی و اینرسی از یک عملگر هیدرولیکی استفاده شده است، اثر تأخیر زمانی عملگر در پایداری شبیه سازی هیبرید به ازای فرکانسها و میراییهای مختلف سیستم بررسی شده است. نتایج نشان میدهد که با در نظر گرفتن سختیها، میراییها و جرمهای یکسان برای کلیه طبقات و در شرایط نامی  $\omega=9\text{rad/sec}$  و  $\zeta=0.02$ ، اگر تأخیر زمانی عملگر هیدرولیکی از ۱۲ میلیثانیه بیشتر شود آنگاه سیستم ناپایدار خواهد بود. بررسی اثر میرایی طبقات مختلف بیانگر نتیجه جالبی در اثر میرایی طبقه انتهایی در پایداری است. افزایش میرایی طبقه سوم در محدوده  $0.25 < \zeta_3$  باعث افزایش محدوده تأخیر زمانی تا ۴۵ میلی ثانیه می شود ولی در محدوده  $0.25 > \zeta_3$ ، با افزایش میرایی محدوده مجاز تأخیر زمانی کاهش مییابد. همچنین با در نظر گرفتن هر کدام از طبقات به عنوان طبقه واقعی، پایداری سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان میدهد که در محدوده میرایی  $\zeta < 0.25$ ، با افزایش فرکانس، محدوده مجاز تأخیر زمانی کاهش و با افزایش میرایی، محدوده مجاز تأخیر زمانی افزایش مییابد. همچنین بررسی پارتیشن بندیهای مختلف سازه، بیانگر نقش تعیین کننده طبقات مختلف در پایداری میباشد.

علاوه بر این، تغییر نسبت جرمها در طبقات مختلف نشان می دهد که افزایش نسبت جرمها در طبقه های پایین محدودیت بیشتری در پایداری و محدوده مجاز تأخیر زمانی ایجاد مینماید. به گونهای که اگر جرم طبقات اول و دوم یکسان ولی جرم طبقه سوم  $1/5$  برابر جرم طبقات دیگر انتخاب شود آنگاه بیشینه تأخیر زمانی مجاز برابر ۳۳ میلیثانیه ولی در حالتی که جرم طبقه اول  $1/5$  برابر جرم طبقات دیگر انتخاب شود آنگاه بیشینه تأخیر زمانی مجاز برابر ۲۳ میلیثانیه خواهد بود.

## ۶- علائم اختصاری

جابجایی زمین	$X_g$
جابجایی طبقه زام نسبت به طبقه آام	$X_{ij}$
جرم	$m$
ضریب میرایی	$c$
ضریب سختی	$k$
تعداد تأخیرهای زمانی مختلف موجود در سیستم	$n$
بردار متغیرهای حالت	$X$
مقادیر ویژه	$\lambda$

## I

ماتریس همانی	$I$
ضرایب فضای حالت برای متغیرهای بدون تأخیر زمانی	$A_0$
ضرایب فضای حالت برای متغیرهای همراه با تأخیر زمانی	$A_1$
بردار ورودی ها	$u$
نیروی عملگر هیدرولیکی	$F$
فرکانس طبیعی	$\omega$
نسبت میرایی	$\zeta$
نسبت جرم	$\alpha$
تأخیر زمانی	$\tau$
سهم شتاب ناشی از نیروهای اینرسی طبقات اول و سوم	$\eta_a$
سهم شتاب ناشی از نیروهای استاتیکی طبقات اول و سوم	$\eta_f$

## مراجع

- [1] Saouma V, Sivaselvan M. Hybrid simulation: Theory, implementation and applications: CRC Press; 2014.
- [2] Wallace M, Wagg D, Neild S. An adaptive polynomial based forward prediction algorithm for multi-actuator real-time dynamic substructuring. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2005;461(2064):3807-26.
- [3] Tu J-Y, Hsiao W-D, Chen C-Y. Modelling and control issues of dynamically substructured systems: adaptive forward prediction taken as an example. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2014;470(2168):20130773.
- [4] Zhou H, Wagg DJ, Li M. Equivalent force control combined with adaptive polynomial-based forward prediction for real-time hybrid simulation. Structural Control and Health Monitoring. 2017;24(11):e2018.
- [5] Reinhorn A, Sivaselvan M, Weinreber S, Shao X. Real-time dynamic hybrid testing of structural systems. 2004.
- [6] Gawthrop P, Virden D, Neild S, Wagg D. Emulator-based control for actuator-based hardware-in-the-loop testing. Control Engineering Practice. 2008;16(8):897-908.
- [7] Horiuchi T, Konno T. A new method for compensating actuator delay in real-time hybrid experiments. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2001;359(1786):1893-909.
- [8] Jung RY, Benson Shing P. Performance evaluation of a real-time pseudodynamic test system. Earthquake engineering & structural dynamics. 2006;35(7):789-810.
- [9] Chen C, Ricles JM. Improving the inverse compensation method for real-time hybrid simulation through a dual compensation scheme. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2009;38(10):1237-55.



- A, Sause R. Implementation and application of the unconditionally stable explicit parametrically dissipative KR- $\alpha$  method for real-time hybrid simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2015;44(5):735-55.
- [24] Ahmadzadeh M, Mosqueda G, Reinhorn A. Compensation of actuator delay and dynamics for real-time hybrid structural simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2008;37(1):21-42.
- [25] Darby A, Williams M, Blakeborough A. Stability and delay compensation for real-time substructure testing. *Journal of Engineering Mechanics*. 2002;128(12):1276-84.
- [26] Wu B, Wang Z, Bursi OS. Actuator dynamics compensation based on upper bound delay for real-time hybrid simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2013;42(12):1749-65.
- [27] Shi P, Wu B, Spencer Jr BF, Phillips BM, Chang CM. Real-time hybrid testing with equivalent force control method incorporating Kalman filter. *Structural Control and Health Monitoring*. 2016;23(4):735-48.
- [28] Horiuchi T, Inoue M, Konno T, Namita Y. Real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation and its application to a piping system with energy absorber. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1999;28(10):1121-41.
- [29] Wallace M, Sieber J, Neild SA, Wagg DJ, Krauskopf B. Stability analysis of real-time dynamic substructuring using delay differential equation models. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2005;34(15):1817-32.
- [30] Kyrychko Y, Blyuss K, Gonzalez-Buelga A, Hogan S, Wagg D. Real-time dynamic substructuring in a coupled oscillator-pendulum system. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2006;462(2068):1271-94.
- [31] Mercan O, Ricles JM. Stability analysis for real-time pseudodynamic and hybrid pseudodynamic testing with multiple sources of delay. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2008;37(10):1269-93.
- [32] Chi F, Wang J, Jin F. Delay-dependent stability and added damping of SDOF real-time dynamic hybrid testing. *Earthquake Engineering and engineering vibration*. 2010;9(3):425-38.
- [33] Botelho RM, Christenson RE. Robust stability and performance analysis for multi-actuator real-time hybrid substructuring. *Dynamics of Coupled Structures, Volume 4*: Springer; 2015. p. 1-7.
- [34] Chen C, Ricles JM. Stability analysis of SDOF real-time
- [10] Carrion JE, Spencer Jr BF. Model-based strategies for real-time hybrid testing. *Newmark Structural Engineering Laboratory. University of Illinois at Urbana ...*; 2007. Report No.: 1940-9826.
- [11] Chen C, Ricles JM. Tracking error-based servohydraulic actuator adaptive compensation for real-time hybrid simulation. *Journal of Structural Engineering*. 2010;136(4):432-40.
- [12] Gao X, Castaneda N, Dyke SJ. Real time hybrid simulation: from dynamic system, motion control to experimental error. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2013;42(6):815-32.
- [13] Ou G, Ozdagli AI, Dyke SJ, Wu B. Robust integrated actuator control: experimental verification and real-time hybrid-simulation implementation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2015;44(3):441-60.
- [14] Phillips BM, Takada S, Spencer Jr B, Fujino Y. Feedforward actuator controller development using the backward-difference method for real-time hybrid simulation. *Smart Structures and Systems*. 2014;14(6):1081-103.
- [15] Newmark NM, editor *A method of computation for structural dynamics 1959*: American Society of Civil Engineers.
- [16] Wu B, Xu G, Wang Q, Williams MS. Operator-splitting method for real-time substructure testing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2006;35(3):293-314.
- [17] Combescure D, Pegon P.  $\alpha$ -Operator splitting time integration technique for pseudodynamic testing error propagation analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 1997;16(7-8):427-43.
- [18] Chang S-Y. Explicit pseudodynamic algorithm with unconditional stability. *Journal of Engineering Mechanics*. 2002;128(9):935-47.
- [19] Wu B, Wang Q, Benson Shing P, Ou J. Equivalent force control method for generalized real-time substructure testing with implicit integration. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 2007;36(9):1127-49.
- [20] Chen C, Ricles JM. Development of direct integration algorithms for structural dynamics using discrete control theory. *Journal of Engineering Mechanics*. 2008;134(8):676-83.
- [21] Gui Y, Wang J-T, Jin F, Chen C, Zhou M-X. Development of a family of explicit algorithms for structural dynamics with unconditional stability. *Nonlinear Dynamics*. 2014;77(4):1157-70.
- [22] Chung J, Hulbert G. A time integration algorithm for structural dynamics with improved numerical dissipation: the generalized- $\alpha$  method. 1993.
- [23] Kolay C, Ricles JM, Marullo TM, Mahvashmohammadi

lishing a predictive performance indicator for real-time hybrid simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2014;43(15):2299-318.

[37] Maghareh A, Dyke S, Rabieniaharatbar S, Prakash A. Predictive stability indicator: a novel approach to configuring a real-time hybrid simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2017;46(1):95-116.

hybrid testing systems with explicit integration algorithms and actuator delay. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2008;37(4):597-613.

[35] Zhu F, Wang JT, Jin F, Chi FD, Gui Y. Stability analysis of MDOF real-time dynamic hybrid testing systems using the discrete-time root locus technique. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2015;44(2):221-41.

[36] Maghareh A, Dyke SJ, Prakash A, Bunting GB. Estab-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Safi, M. Nasiri, Stability Analysis of Real-time Hybrid Simulation for a Multi-story Structure Considering Time-delay of Hydraulic Actuator, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(3)(2019)391-400.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13547.5433

