Archive of SID

مجله علمی – پژوهشی
عمران مدرس
دوره شانزدهم، شماره ۳، سال ۱۳۹۵

بهبود روش انتگرال‌گیری جداسازی عملگرها برای شبیه‌سازی هیبرید عددی و آزمایشگاهی

مائده ذاکرصالحی[۱]، عباسعلی تسنیمی[۲*]، مهدی احمدی زاده[۳]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

tasnimi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹٤/۷/۹] تاریخ پذیرش: [۱۳۹٤/۱۲/۲۰]

چکیده- روش شبیه‌سازی هیبرید که ترکیبی از تکنیک‌های مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی است، به عنوان یک روش موثر و قابل اعتماد برای بررسی پاسخ دینامیکی سیستم‌های سازه‌ای پیچیده استفاده می‌شود. در این روش پاسخ سازه با انتگرال‌گیری عددی سیستم معادلات حاکم بر کل سیستم به دست می‌آید که در میان روش‌های انتگرال‌گیری، استفاده از روش جداسازی عملگرها (OS) برای شبیه‌سازی هیبرید بسیار مطلوب است؛ چراکه دارای دقت و پایداری بیش‌تری نسبت به روش‌های صریح بوده و از طرفی برخلاف روش‌های ضمنی نیاز به انجام تکرار و تناوب روی نمونه آزمایشگاهی ندارد. ولی روش OS دارای این ضعف است که استفاده از ماتریس سختی اولیه در گام اصلاح کننده آن موجب مخدوش شدن دقت نتایج در محدوده رفتار غیرخطی می‌شود. در این مقاله یک روش بهبود یافته بر پایه روش OS پیشنهاد شده است که روش جداسازی عملگرهای بهبود یافته (MOS) نام‌گذاری شده و در آن با ارائه پروسه‌ای، دقت مرحله پیش‌بینی کننده افزایش داده شده و در نتیجه اثر تقریب ماتریس سختی اولیه در مرحله اصلاح کننده کاهش داده شده است. کارایی این روش برای محدوده وسیعی از سیستم‌های سازه‌ای، سطوح شکل‌پذیری و درجه‌های آزادی مطالعه شده و نتایج به دست آمده نشان دهنده عملکرد موفقیت آمیز این روش در به دست آوردن پاسخ‌های صحیح و پایدار و نیز دقت بالاتر این روش نسبت به روش OS است. هم چنین عملکرد روش MOS در شرایطی که خطاهای آزمایشگاهی به صورت مصنوعی مدل‌سازی شده‌اند نیز بررسی شده، و نتایج حاکی از کارایی این روش در حل معادلات حرکت با وجود خطاهای آزمایشگاهی است.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی هیبرید، انتگرال‌گیری عددی، اندیس خطا، دقت، پایداری، پاسخ لرزه‌ای

۱- مقدمه

درک صحیح عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای جدید و موجود و نیز بررسی رفتار مصالح جدید تحت زلزله‌های شدید یک فاکتور کلیدی برای کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از زلزله است. به علاوه روش‌های جدید طراحی مانند روش طراحی بر اساس عملکرد نیازمند درک بهتری از رفتار سازه در محدوده غیر خطی است. گرچه توسعه روش‌ها و نرم افزاهای تحلیل سازه در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است، ولی معمولا مدل‌های عددی برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها به ویژه اجزای پیچیده و بحرانی سازه تحت زلزله شدید پاسخگو نبوده و هم‌چنان مطالعه‌های آزمایشگاهی به عنوان قابل اعتمادترین روش برای بررسی رفتار سیستم‌های سازه‌ای و نیز گسترش مدل‌های تحلیلی به کار گرفته می‌شوند.

در میان روش‌های آزمایشگاهی، روش میز لرزه امکان شبیه‌سازی واقع گرایانه‌ای از اثر زلزله روی سازه را فراهم می‌آورد. ولی این روش نه تنها دارای محدودیت‌هایی از نظر ابعاد و ظرفیت بارگذاری است، بلکه هزینه‌های اجرایی چنین آزمایش‌هایی نیز بسیار بالا است و در نتیجه استفاده از این روش برای سازه‌های بزرگ و یا پیچیده معمولا عملی نیست. برای رفع این محدودیت‌ها روش شبیه‌سازی هیبرید گسترش

www.SID.ir

Archive of SID

پیدا کرده است که با ترکیب تکنیک‌های مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی، امکان ارزیابی کارامد و واقع گرایانه‌ای از رفتار لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای را فراهم می‌آورد [۱-۵]. در این روش، سازه مطالعه شده به دو یا چند زیرسازه آزمایشگاهی و عددی تقسیم شده که زیرسازه آزمایشگاهی معمولا شامل قسمتی از سازه است که دارای رفتار پیچیده و ناشناخته بوده و مدل سازی عددی آن مشکل است. به این ترتیب شبیه‌سازی هیبرید این مزیت را ایجاد می کند که عدم قطعیت‌هایی که در مورد رفتار اجزای پیچیده و غیرخطی سازه وجود دارد با اندازه گیری‌های آزمایشگاهی جایگزین شود. هم چنین نسبت به روش میزلرزه دارای این مزیت است که نمونه آزمایشگاهی می‌تواند در مقیاس بزرگ یا مقیاس واقعی آزمایش شود. به طور کلی هر گام زمانی یک شبیه‌سازی هیبرید شامل چهار مرحله مجزا است (شکل ۱):

- محاسبه تغییر مکان‌های دستور با استفاده از اطلاعات گام قبل و دیگر پارامترهای سیستم
- اعمال تغییرمکان‌های دستور به زیرسازه‌های عددی و آزمایشگاهی
- جمع‌اوری اطلاعات نیروهای بازگشتی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از زیرسازه‌های آزمایشگاهی و عددی
- حل معادله حرکت گام حاضر با استفاده از مقادیر نیروهای بازگشتی و نیز مقادیر نیروهای وابسته به کرنش، میرایی و اینرسی و نیز نیروی وارد بر سازه محاسبه شده است

در شبیه‌سازی‌هیبرید پاسخ سازه با انتگرال‌گیری عددی از معادله‌حرکت حاکم بر زیرسازه‌عددی و آزمایشگاهی به دست می‌آید. روش‌های انتگرال‌گیری صریح (که در آن‌ها برای محاسبه جابه‌جایی دستور نیاز به اطلاعات شتاب انتهای گام نیست) به‌دلیل سادگی به‌کارگیری، به صورت گسترده در شبیه-سازی هیبرید به‌کار گرفته شده‌اند. ولی برای ارضای شرط پایداری این روش‌ها در سیستم‌های چند درجه‌آزادی و نیز سیستم‌های با سختی بالا، گام‌های زمانی باید کوچک درنظر گرفته شوند که این امر در شبیه‌سازی هیبرید به دلیل افزایش حساسیت سیستم به تاخیر جک و تشدید گسترش خطا مطلوب نیست [۶].

روش‌های انتگرال‌گیری ضمنی (که در آن‌ها برای محاسبه جابه‌جایی دستور نیاز به اطلاعات شتاب انتهای گام است) دارای دقت و پایداری بیشتری در مقایسه با روش‌های صریح است، ولی به کارگیری مستقیم این روش‌ها برای شبیه‌سازی هیبرید به دلیل عدم امکان تکرار روی زیرسازه آزمایشگاهی و نیز مشکل تخمین ماتریس سختی مماسی آن، محدود است. تکرارهایی که در روش انتگرال‌گیری ضمنی مورد نیاز است نمی‌تواند به صورت مستقیم به زیرسازه آزمایشگاهی اعمال شود، چراکه در مواردی که جک هیدرولیکی بیش از اندازه نمونه را بارگذاری کند برای تصحیح آن، نمونه به صورت ناگهانی باربرداری شده و انرژی زیادی نیز اشتباها به وسیله‌ی نمونه جذب می‌شود [۶]. روش انتگرال‌گیری جداسازی عملگرها (OS) که ترکیبی از الگوریتم انتگرال‌گیری صریح و ضمنی است به صورت گسترده در شبیه سازی هیبرید به کار گرفته شده است [۷]؛ به این دلیل که روش OS درمقایسه با روش‌های صریح دارای پایداری و درستی بیشتری است و در مقایسه با روش‌های ضمنی به‌کارگیری آن آسان بوده و نیاز به انجام تکرار روی زیرسازه آزمایشگاهی ندارد.

شکل ۱- نمودار شماتیک مراحل روش شبیه‌سازی هیبرید

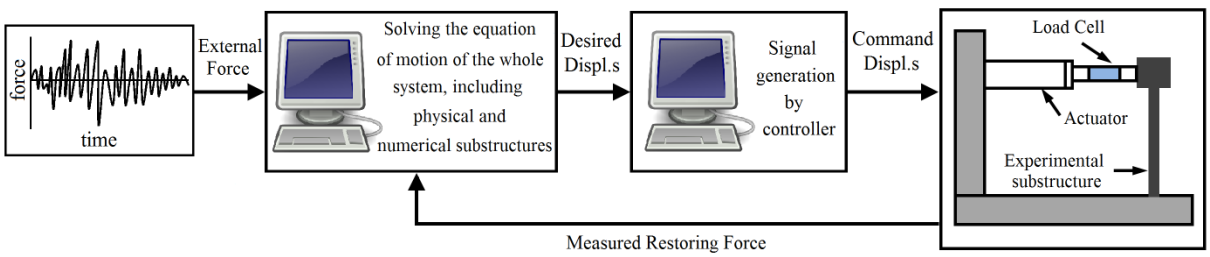

Fig. 1. Schematic view of hybrid simulation procedure

www.SID.ir

Archive of SID

این روش از دو مرحله پیش‌بینی کننده و اصلاح کننده تشکیل شده است که در آن ابتدا در مرحله پیش‌بینی کننده، جابه‌جایی دستور مانند روش صریح محاسبه شده و به زیرسازه آزمایشگاهی اعمال می‌شود. پس از اندازه‌گیری نیروی بازگشتی، مرحله اصلاح کننده روش شروع می‌شود که در آن نیروی بازگشتی و جابه‌جایی با استفاده از ماتریس سختی اولیه اصلاح و به‌روز می‌شوند. ولی این روش نیز دارای این ضعف است که استفاده از ماتریس سختی اولیه به جای ماتریس سختی مماسی، در گام‌های با رفتار غیرخطی ممکن است موجب انحراف نتایج از مقادیر صحیح شود. به ویژه اگر اختلاف بین جابه‌جایی پیش‌بینی شده و جابه‌جایی اصلاح شده بزرگ باشد، این موضوع حادتر است. بنابراین پژوهش‌های زیادی در سال‌های اخیر انجام شده است تا این ضعف روش OS تا حدی برطرف شود [۸-۱۱]. گرچه در این روش‌های ارائه شده دقت بالاتری نسبت به روش معمول OS به دست آمده است، ولی در روش‌های ارائه شده در مراجع [۸-۱۰] نیاز به تخمین آنلاین ماتریس سختی مماسی است. تخمین آنلاین ماتریس سختی نه تنها سبب افزایش قابل ملاحظه هزینه محاسباتی می‌شود، بلکه اگر ماتریس سختی مماسی بین گام پیش‌بینی کننده و اصلاح‌کننده دارای تغییرات قابل توجهی باشد، ممکن است به نتایج اشتباه منجر شود. در روش ارائه شده به وسیله‌ی پژوهشگران مرجع [۱۱] نیز گرچه با تخمین سرعت در گام پیش‌بینی کننده دقت بالاتری در شبیه‌سازی های با نرخ واقعی به دست آمده است؛ ولی هیچ بهبودی در راستای کاهش اثر تقریب ماتریس سختی اولیه نسبت به روش معمول OS ایجاد نشده است. به علاوه در روش‌های ارائه شده در این پژوهش‌ها به جز روش مرجع [۱۰]، الگوریتم روش OS در مرحله اصلاح کننده؛ یعنی بعد از اعمال جابه‌جایی به زیرسازه آزمایشگاهی و اندازه‌گیری نیروی بازگشتی بهبود یافته است. ولی از آن‌جا که هدف از شبیه‌سازی هیبرید اندازه‌گیری آزمایشگاهی رفتار اجزای پیچیده سازه است، بهتر است که درصد بالایی از نیروی بازگشتی به شکل مستقیم از اندازه-گیری‌های آزمایشگاهی به دست آید و نه این که در یک پروسه اصلاح شونده تغییراتی روی آن انجام شود.

با در نظر گرفتن موارد گفته شده در بالا، هدف از این مطالعه ارائه یک روش بهبود یافته بر پایه روش OS است؛ به‌گونه‌ای که نه تنها موجب افزایش دقت این روش شود بلکه با اهداف شبیه سازی هیبرید و نیز محدودیت‌های این روش سازگار باشد. در این روش که روش انتگرال‌گیری جداسازی عملگرهای بهبود یافته (MOS) نام‌گذاری شده است، دقت روش OS در مرحله پیش‌بینی‌کننده (یعنی قبل از اعمال جابه‌جایی دستور به زیرسازه آزمایشگاهی) افزایش داده می-شود. این امر موجب می‌شود که جابه‌جایی دستور نزدیک‌تر به مقدار نهایی آن تخمین زده شود و در نتیجه درصد بالاتری از نیروی بازگشتی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی باشد. هم‌چنین از آنجا که الگوریتم پیشنهادی موجب کاهش طول مرحله اصلاح کننده می‌شود، اثر تقریب ماتریس‌سختی اولیه کم اهمیت‌تر شده و نیاز به تخمین آنلاین ماتریس سختی مماسی که امری مشکل به ویژه در شبیه سازی‌های با نرخ واقعی است، مرتفع می‌شود. همان‌گونه که در ادامه مقاله مشاهده خواهد شد، روش پیشنهادی MOS به صورت موفقیت آمیزی موجب افزایش دقت روش OS به ویژه در محدوده رفتار غیرخطی سازه می‌شود. جزئیات روش MOS در ادامه به صورت مفصل توضیح داده شده است.

۲- روش انتگرال گیری جداسازی عملگرهای بهبود یافته (MOS)

در شبیه‌سازی هیبرید، معادله حرکت حاکم بر کل سیستم شامل زیر سازه‌های عددی و آزمایشگاهی به صورت زیر است:

$$Ma + Cv + r = f \qquad (۱)$$

که در آن **M** و **C** به‌ترتیب ماتریس‌های جرم و میرایی سازه، a و v بردارهای شتاب و سرعت، r بردار نیروهای بازگشتی به-دست آمده از زیرسازه‌های عددی و آزمایشگاهی و f نیز بردار نیروی وارد بر سازه است. برای حل معادله حرکت حاکم بر سازه، معمولا از روش‌های انتگرال‌گیری گام‌به‌گام در حوزه زمان استفاده می‌شود که یکی از پرکاربردترین آن‌ها روش نیومارک-بتا است [۱۲]. در این روش که بر اساس قانون انتگرال‌گیری ذوزنقه‌ای است، باید روابط زیر در گام زمانی nام

www.SID.ir

Archive of SID

برقرار باشند:

$$\mathbf{M a_n + C v_n + r_n = f_n} \quad (۲)$$

$$\mathbf{d_n = d_{n-1} + \Delta t v_{n-1} + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right) a_{n-1} + \beta a_n\right]} \quad (۳)$$

$$\mathbf{v_n = v_{n-1} + \Delta t[(1-\gamma) a_{n-1} + \gamma a_n]} \quad (٤)$$

که در آن Δt گام زمانی انتگرال‌گیری و β و γ پارامترهای روش است. با مساوی صفر قراردادن پارامتر β در معادله (۳) روش نیومارک به یک روش صریح تبدیل می‌شود. مقادیر غیر از صفر برای β نیز معادل روش‌های ضمنی است که در میان آن‌ها β=۰/۲۵ دارای پایداری بدون شرط است [۱۳].

در شبیه‌سازی هیبرید، مشکلی که در به‌کار بردن رابطه (۳) برای محاسبه جابه‌جایی‌دستور در روش‌های انتگرال‌گیری وجود دارد این است که در ابتدای گام زمانی مقدار شتاب در انتهای گام ($\mathbf{a_n}$) مشخص نیست. برای حل این مشکل، در روش OS در مرحله پیش‌بینی‌کننده فرض می‌شود که مقدار شتاب انتهای گام برابر صفر است که این فرض در بیشتر گام‌های زمانی فرض صحیحی نیست و موجب می‌شود که جابه‌جایی پیش‌بینی شده (که به زیرسازه آزمایشگاهی اعمال می‌شود) با جابه‌جایی نهایی دارای اختلاف بوده که در محدوده رفتار غیرخطی سبب ایجاد خطا می‌شود. در روش جداسازی عملگرهای بهبود یافته MOS، هدف این است که در مرحله پیش‌بینی‌کننده مقدار شتاب انتهای گام تخمین زده شده و از آن برای محاسبه جابه‌جایی پیش‌بینی شده استفاده شود. همان‌گونه که مشاهده خواهد شد، استفاده از شتاب تخمینی موجب می‌شود که جابه‌جایی پیش‌بینی شده نزدیک‌تر به مقدار نهایی‌اش محاسبه شده و طول مرحله اصلاح کننده و اثر تقریب ماتریس سختی اولیه کاهش یافته و در پایان دقت نتایج شبیه‌سازی افزایش یابد. روش MOS نیز مانند روش OS از دو مرحله پیش‌بینی کننده و تصحیح کننده تشکیل شده است که الگوریتم آن به شرح زیر است:

مرحله پیش‌بینی کننده– در این مرحله ابتدا یک منحنی درجه یک به دو مقدار آخر نیروی بازگشتی (r_{n-1} و r_{n-2}) برازش داده شده و از آن برای برون‌یابی نیروی بازگشتی در انتهای گام زمانی استفاده می‌شود (شکل ۲):

$$\mathbf{r_n^p = 2r_{n-1} + r_{n-2}} \quad (۵)$$

که در آن $\mathbf{r_n^p}$ بردار نیروی بازگشتی پیش‌بینی شده (برون‌یابی شده) در انتهای گام است.

شکل ۲- برون‌یابی نیروی بازگشتی برای هریک از درجات آزادی

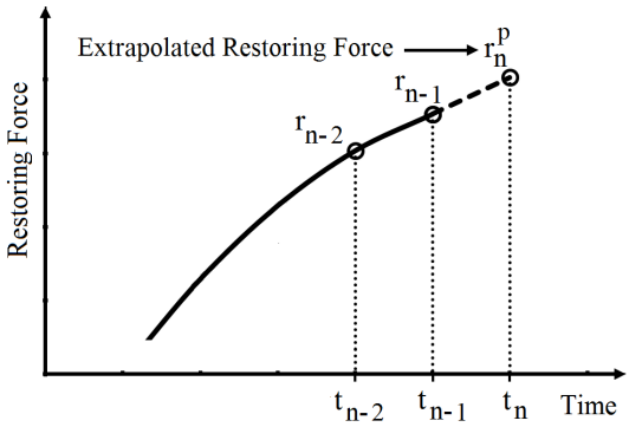

Fig. 2. Extrapolation of restoring force for each DOF

با جای‌گذاری r_n^p از رابطه (۵) و v_n از رابطه (٤) در رابطه تعادل (۲)، شتاب تخمینی در انتهای گام زمانی انتگرال‌گیری (a_n^p) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$a_n^p = (M + C\Delta t\gamma)^{-1} \times (f_n - 2r_{n-1} - r_{n-2} - C\,[v_{n-1} + \Delta t(1-\gamma)a_{n-1}]) \quad (٦)$$

به این ترتیب جابه‌جایی پیش‌بینی شده (جابه‌جایی دستور d_n^p) با جای‌گذاری شتاب تخمینی رابطه (٦) در رابطه (۳) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d_n^p = d_{n-1} + \Delta t v_{n-1} + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right) a_{n-1} + \beta a_n^p\right] \quad (۷)$$

با توجه به رابطه (۷) مشاهده می‌شود که در محاسبه جابه‌جایی پیش‌بینی شده اثر شتاب انتهای گام نیز در نظر گرفته شده است. این جابه‌جایی پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی هیبرید بسیار مهم است؛ چراکه مبنای تولید سیگنال‌های دستوری به زیرسازه آزمایشگاهی و نیروی بازگشتی متناظر با آن بوده و هرچه نزدیک‌تر به مقدار نهایی آن پیش‌بینی شود اثر گام اصلاح کننده که دارای تقریب است، کاهش می‌یابد. این موضوع به صورت شماتیک در شکل (۳) برای یک گام زمانی نشان داده شده است:

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۳- نمودار شماتیک اثر دقت جابه‌جایی پیش‌بینی شده بر دقت نیروی بازگشتی

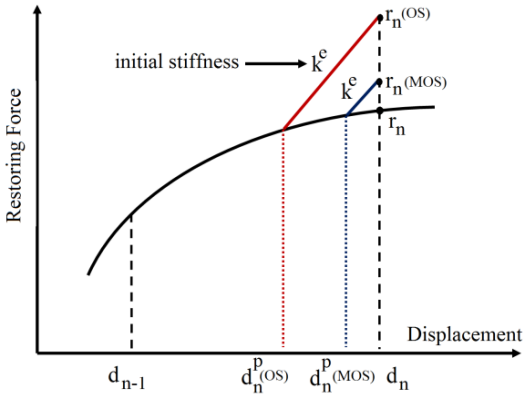

Fig. 3. Schematic effect of the accuracy of predictor displacement on the accuracy of restoring force

بعد از محاسبه جابه‌جایی پیش‌بینی شده، بقیه مراحل مشابه روش معمول OS است: این جابه‌جایی به زیرسازه‌های آزمایشگاهی اعمال شده و نیروی بازگشتی متناظر با آنها اندازه‌گیری می‌شود (d_n^m, r_n^m). سپس مرحله اصلاح کننده به شرح زیر شروع می‌شود:

مرحله اصلاح کننده– در این مرحله ابتدا بردار نیروی-بازگشتی در فاصله جابه‌جایی پیش‌بینی‌شده و جابه‌جایی اصلاح شده بر اساس ماتریس سختی اولیه به روز می‌شود:

$$r_n = r_n^m + K^e(d_n - d_n^m) = r_n^m + K^e\beta\Delta t^2(a_n - a_n^p) \quad (۸)$$

که در آن K^e ماتریس سختی اولیه سیستم است. سپس بردار نیروی بازگشتی به روز شده در رابطه (۲) قرار داده شده و بر اساس آن شتاب انتهای گام محاسبه می‌شود:

$$a_n = (M + C\Delta t\gamma + K^e\beta\Delta t^2)^{-1} \times (f_n - r_n^m + K^e\beta\Delta t^2 a_n^p - C[v_{n-1} + \Delta t(1-\gamma)a_{n-1}]) \quad (۹)$$

با قرار دادن a_n در روابط (۲)، (۳) و (۸) مقادیر جابه‌جایی، سرعت و نیروی بازگشتی محاسبه شده و گام زمانی nام تکمیل می‌شود. این مراحل برای تمام گام‌های زمانی انتگرال‌گیری تکرار می‌شود تا شبیه‌سازی به پایان برسد.

در ادامه مقاله چگونگی عملکرد، دقت و نیز پایداری روش MOS در مقایسه با روش OS برای محدوده وسیعی از سازه‌ها در مطالعات عددی بررسی می‌شود. سپس الگوریتم سیستم شبیه‌سازی هیبرید به صورت عددی و با درنظر گرفتن اثر تاخیر مدل سازی شده و کارایی روش انتگرال‌گیری پیشنهادی در شرایط مصنوعی شبیه‌سازی هیبرید نیز مطالعه می‌شود.

۳- بررسی عملکرد بهبودیافته روش انتگرال-گیری MOS در مقایسه با روش OS

همان‌گونه که گفته شد در روش MOS پروسه‌ای در مرحله پیش‌بینی کننده به کار گرفته شده است تا جابه‌جایی دستور با دقت بالاتری نسبت به روش OS پیش‌بینی شده و درصد بالاتری از نیروی بازگشتی مستقیما از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به دست آید. برای بررسی عملکرد این روش و به ویژه نشان دادن برتری آن نسبت به روش OS، یک سازه یک درجه آزادی با زمان تناوب ۰/۳ ثانیه و میرایی ۵٪ میرایی بحرانی در نظر گرفته شده است. سختی اولیه سیستم برابر ۲ kN/mm است و رفتار غیرخطی سیستم به وسیله‌ی یک مدل دوخطی با سختی پس از جاری‌شدگی ۱۰٪ سختی‌اولیه مدل شده است. مقدار جابه‌جایی جاری شدگی نیز برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در این مدل سازه‌ای فرض بر این است که نیروی بازگشتی سازه به صورت آزمایشگاهی و نیروهای اینرسی و میرایی به صورت عددی تعیین می‌شوند (شکل ٤) و شبیه‌سازی با این فرض انجام می‌شود که هیچ اطلاعاتی از سختی سیستم در دسترس نیست. در این مطالعه و سه نمونه بخش ٤ مقاله، از نرم‌افزار MATLAB برای شبیه‌سازی استفاده شده است و کلیه مدل‌سازی‌های مرتبط با بخش عددی، بخش آزمایشگاهی و نیز الگوریتم انتگرال‌گیری در محیط MATLAB کدنویسی شده‌اند. در این شبیه‌سازی، طول گام زمانی برابر با ۰/۰۲ ثانیه در نظر گرفته شده است و از روش ضمنی نیومارک با β=۰/۲۵ به عنوان حل مرجع برای ارزیابی نتایج استفاده شده است.

شکل ٤- نمای شماتیک سازه مطالعه شده شامل زیرسازه‌های عددی و آزمایشگاهی

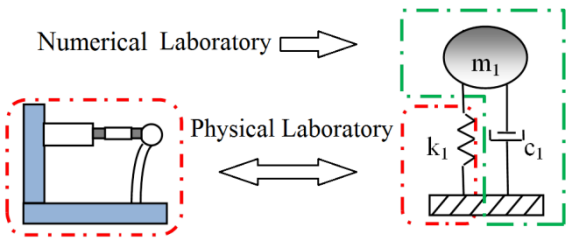

Fig. 4. Schematic view of the considered system including physical and numerical substructures

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۵- تاریخچه جابه‌جایی سازه تحت زلزله طبس با استفاده از روش های MOS، OS و حل مرجع

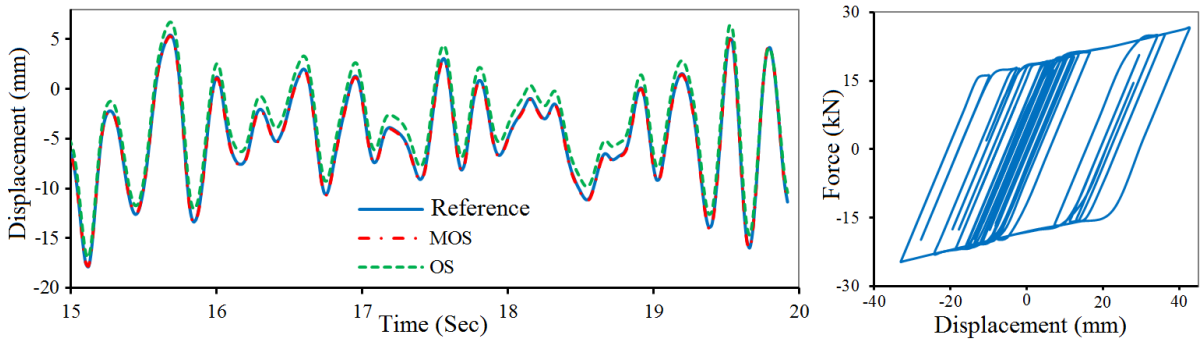

Fig. 5. Displacement history of structure under Tabas record from MOS, OS and reference solution

در شکل (۵) تاریخچه جابه‌جایی سیستم تحت زلزله طبس (ایران، ۱۳۵۷، PGA=۰/۸۵) به دست آمده از روش‌های MOS، OS و حل مرجع نشان داده شده‌است (برای نمایش بهتر فقط از ثانیه ۱۵ تا ۲۰ شبیه سازی رسم شده است). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج روش MOS دارای دقت بالاتری نسبت به روش OS در مقایسه با حل مرجع برای سازه مورد بررسی است. این امر نشان می دهد که روش به کار گرفته شده در مرحله پیش‌بینی کننده روش MOS به صورت موفقیت آمیزی سبب افزایش دقت نتایج در مقایسه با روش معمول OS شده است.

دلیل این افزایش دقت این است که با استفاده از پروسه پیش‌بینی کننده روش MOS، جابه‌جایی پیش‌بینی شده نزدیک‌تر به مقدار نهایی آن به دست می‌آید و در نتیجه طول گام اصلاح کننده که در آن از تقریب ماتریس سختی اولیه به جای ماتریس سختی مماسی استفاده می‌شود کاهش یافته که نهایتا سبب افزایش دقت نتایج به ویژه در گام‌های با رفتار غیرخطی می‌شود. در این شبیه‌سازی، در روش MOS اختلاف جابه‌جایی پیش‌بینی شده و جابه‌جایی نهایی به طور میانگین در طول شبیه‌سازی برابر با ۰/۰۲٤ میلی‌متر و در روش OS برابر با ۰/۱٤٦ میلی‌متر بوده است که در روش MOS به میزان قابل ملاحظه ای کمتر است. هم‌چنین در روش MOS به طور متوسط در هرگام ۰/۷ درصد نیروی بازگشتی در گام اصلاح شونده و با تقریب ماتریس سختی اولیه محاسبه می‌شود در حالی که مقدار متناظر آن در روش OS برابر با ٤/٦ درصد است.

برای ارزیابی دقت نتایج روش MOS و نیز انجام مقایسه کمی بین نتایج دو روش MOS و OS از دو اندیس خطای زیر استفاده می‌شود:

- اندیس خطای ε^{max} که برای نشان دادن ماکزیمم خطای جابه‌جایی روش بررسی شده نسبت به حل مرجع در طول شبیه‌سازی به کار گرفته می‌شود و به صورت زیر تعریف می شود [۱٤]:

$$\varepsilon^{max} = \frac{MAX|d_r - d|}{MAX|d_r|} \times 100 \qquad (۱۰)$$

که در آن ε^{max} ماکزیمم خطای جابه‌جایی نرمال شده، d جابه‌جایی به دست آمده از روش بررسی شده و d_r جابه‌جایی به دست آمده از حل مرجع است.

- اندیس خطای εrms که در واقع متوسط خطاهای جابه‌جایی در طول آزمایش را منعکس می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱٤]:

$$\varepsilon^{rms} = \frac{RMS|d_r - d|}{MAX|d_r|} \times 100 \qquad (۱۱)$$

که در آن ε^{rms} جذر میانگین مربعات (RMS) خطای جابه‌جایی نرمال شده است.

در شبیه‌سازی انجام شده، مقدار اندیس خطای ε^{max} برای دو روش MOS و OS به ترتیب برابر با ۰/۸ و ۹/۲ درصد و مقدار اندیس خطای ε^{rms} به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۱/۷ درصد است. این مقادیر اندیس خطا تایید کننده نتایج به دست آمده در بالا بوده و نشان می‌دهند که نه تنها نتایج روش MOS دارای هماهنگی بسیار بالایی با حل مرجع است ، بلکه هر دو خطای

www.SID.ir

Archive of SID

لحظه‌ای و نیز میانگین خطاها در طول شبیه‌سازی در روش MOS بهبود یافته‌اند. هم چنین در مقایسه با روش صریح نیومارک که به صورت گسترده در شبیه‌سازی هیبرید استفاده می‌شود نیز روش پیشنهادی دقت بالاتری را تامین کرده است که اندیس‌های خطای ε^{max}=۱۳/۲ و ε^{rms}=۳/۹ درصد برای روش صریح، موید این امر است.

٤- مطالعات عددی برای بررسی دقت روش انتگرال‌گیری MOS

برای بررسی درستی نتایج روش MOS در شبیه‌سازی هیبرید و نیز بررسی بهبود دقت آن در مقایسه با روش OS، محدوده وسیعی از سازه‌ها در سه نمونه به شرح زیر مطالعه شده‌اند: نمونه ۱، که در آن برای محدوده وسیعی از زمان تناوب‌ها، ارتعاش آزاد یک سیستم یک درجه آزادی بررسی می‌شود؛ نمونه ۲، که در آن برای سیستم یک درجه آزادی بخش قبل، عملکرد روش MOS برای درجات شکل‌پذیری مختلف مطالعه می‌شود و نمونه ۳، که در آن برای بررسی پایداری روش MOS در حضور مدهای با فرکانس بالا، سیستم‌های چند درجه آزادی بررسی می‌شود.

نمونه ۱– در این نمونه عملکرد روش MOS در مقایسه با روش OS برای محدوده وسیعی از زمان‌های تناوب بررسی می‌شود. سازه مورد نظر یک سیستم یک درجه آزادی بدون میرایی است که در حالت ارتعاش آزاد با جابه‌جایی اولیه ۱۰۰mm مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه برای نشان دادن این موضوع که کاهش طول مرحله اصلاح کننده در روش MOS چه اثری بر دقت نتایج شبیه‌سازی دارد، فرض بر این است که در همه گام‌ها سختی واقعی سازه (که در مرحله پیش‌بینی کننده مبنای محاسبات است) برابر با ۰/۱ kN/mm بوده و در مرحله اصلاح کننده که از تقریب ماتریس سختی اولیه استفاده می‌شود مقدار سختی برابر با ۱ kN/mm است. در این نمونه حل مرجع به صورت دقیق از روابط تحلیلی ارتعاش آزاد محاسبه شده و مبنای ارزیابی دقت نتایج قرار می‌گیرد:

$$d_r(t) = 100\cos(\omega t) \qquad (۱۳)$$

که در آن d_r جابه‌جایی مرجع بر حسب میلی‌متر و ω فرکانس ارتعاش سیستم است. در سازه‌های بررسی شده، مقدار $\omega_n \times \Delta t$ برابر با ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/٤، ۰/۵ و ۰/٦ در نظرگرفته شده و این سازه‌ها به ترتیب S-I، S-II، S-III، S-IV، S-V و S-VI نامگذاری شده‌اند. در شکل (٦) به عنوان نمونه پاسخ ارتعاش آزاد سیستم S-III برای روش‌های MOS، OS و پاسخ مرجع نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که پاسخ به دست آمده از روش MOS دارای هماهنگی بسیار بالایی با حل مرجع است؛ درحالی که نتایج روش OS به دلیل کشیدگی دوره تناوب به تدریج از حل مرجع فاصله گرفته و سبب کاهش درستی پاسخ‌های به دست آمده از این روش می‌شود. این موضوع با افزایش $\omega_n \times \Delta t$ بیشتر قابل ملاحظه خواهد بود که اندیس‌های خطای ε^{max} و ε^{rms} که در شکل (۷) نشان داده شده‌اند موید این نتیجه‌گیری است.

شکل ٦- مقایسه پاسخ ارتعاش آزاد روش MOS و OS در مقایسه با حل مرجع برای سازه S-III

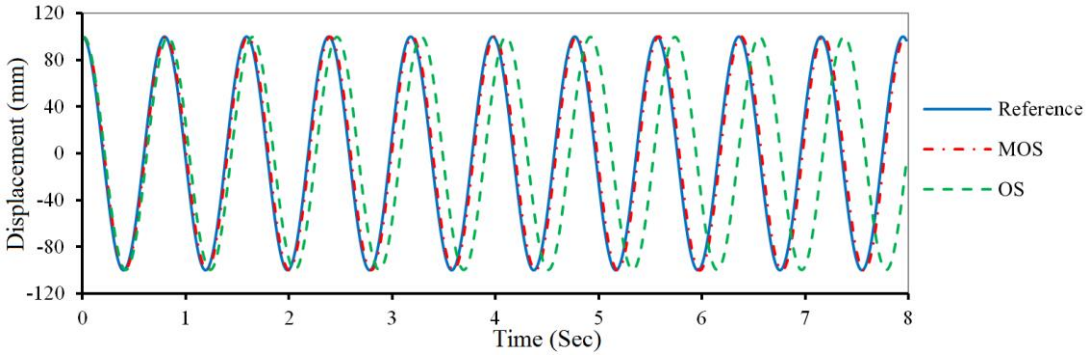

Fig. 6. Comparison of free vibration response of MOS and OS methods with reference solution for S-III system

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۷- اندیس‌های خطای ε^{max} و ε^{rms} در روش‌های MOS و OS

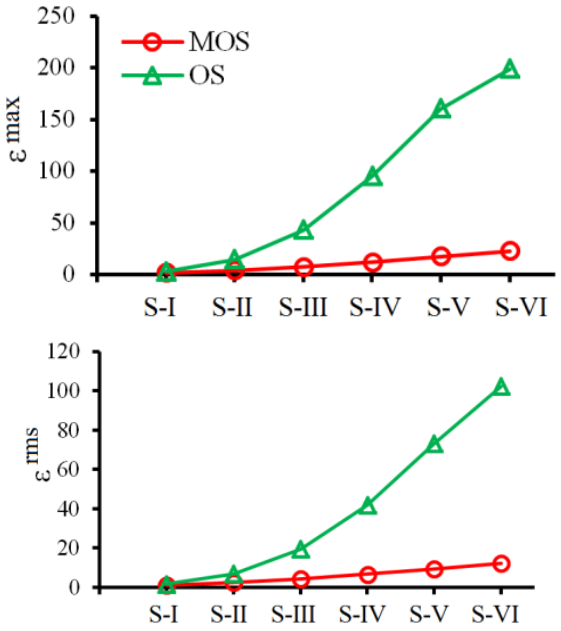

Fig. 7. ε^{max} and ε^{rms} error indicators for MOS and OS methods

شکل (۷) نشان می‌دهد که گرچه خطاهای ماکزیمم و متوسط در طول شبیه‌سازی با افزایش مقدار $\omega_n \times \Delta t$ در هر دو روش افزایش می‌یابد، ولی روند صعودی آن در روش OS قابل ملاحظه است. بنابراین نتیجه‌ای که حاصل می‌شود این است که پروسه‌ای که در مرحله پیش‌بینی کننده روش MOS به کار گرفته شده است نه تنها طول گام اصلاح کننده را کاهش داده و دقت نتایج را افزایش داده است بلکه موجب کاهش حساسیت نتایج این روش به گام زمانی انتگرال‌گیری شده است.

نمونه ۲- هدف از این نمونه بررسی عملکرد روش انتگرال‌گیری پیشنهادی برای سطوح مختلف شکل‌پذیری (شکل‌پذیری= نسبت جابه‌جایی بیشینه به جابه‌جایی جاری شدگی) است. سازه مورد نظر در این بخش همان سیستم یک درجه آزادی بخش ۳ مقاله است؛ با این تفاوت که در آن رکورد زلزله طبس به گونه‌ای مقیاس می‌شود که شکل پذیری‌های ۲ تا ۱۰ که رنج معمول در علم مهندسی عمران است، به دست آید. در شکل (۸) اندیس‌های خطای ε^{max} و ε^{rms} برای دو روش MOS و OS برای سطوح مختلف شکل‌پذیری رسم شده است. این نمودارها نشان می‌دهد که برای تمام سطوح شکل‌پذیری نتایج روش MOS دارای خطای بسیار پایینی است. بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که روش انتگرال‌گیری MOS با دقتی تقریبا در حد روش ضمنی نیومارک موفق به حل معادلات تعادل دینامیکی سیستم هیبریدی شده است و به علاوه نسبت به روش ضمنی دارای این مزیت است که نیاز به انجام تکرار روی زیرسازه آزمایشگاهی به منظور همگرایی معادلات حرکت نیست. به علاوه در مقایسه با روش OS نیز روش پیشنهادی سبب افزایش قابل ملاحظه دقت نتایج شده است که دلیل اصلی آن همان‌گونه که اشاره شد، کاهش اثر تقریب استفاده از ماتریس سختی اولیه به جای ماتریس سختی مماسی در گام‌های با رفتار غیرخطی است.

نمونه ۳- هدف از این نمونه بررسی پایداری روش MOS در حضور مدهای با فرکانس بالا است. یکی از مزیت‌های روش انتگرال‌گیری OS که استفاده از آن را برای شبیه‌سازی هیبرید مناسب می‌سازد این است که این روش برای سازه‌هایی که در آنها سختی پس از جاری شدن کمتر از سختی اولیه است، دارای پایداری بدون شرط است [۱۵]. این موضوع به ویژه برای سازه‌های با تعداد درجات آزادی بالا و نیز در شرایط آزمایشگاهی شبیه‌سازی هیبرید که نویزهای با فرکانس بالا ممکن است سبب ناپایداری پاسخ شوند، دارای اهمیت بالایی است. برای بررسی ویژگی پایداری روش MOS در حضور مدهای با فرکانس بالا، یک سیستم پنج درجه آزادی در نظر گرفته شده است. مشخصات این سیستم به‌گونه‌ای انتخاب شده است که شرایط سخت‌گیرانه‌ای برای بررسی پایداری برقرار باشد؛ به‌این‌معنی که جرم و سختی سیستم به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که باتوجه به گام‌زمانی انتگرال‌گیری (Δt=۰/۰۲) فقط برای مد اول ارتعاش شرط دقت برقرار است و به علاوه فرکانس مدهای ٤ و ٥ نیز فراتر از حد پایداری روش صریح نیومارک قرار گرفته است. برای این منظور جرم هریک از درجات آزادی برابر با ۱۵ کیلوگرم و سختی اولیه آنها برابر با ۰/۱kN/mm در نظر گرفته شده است. رفتار غیرخطی سیستم نیز به وسیله‌ی یک مدل دوخطی با سختی پس از جاری‌شدگی ۱۰٪ سختی‌اولیه مدل شده‌است.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۸- اندیس‌های خطای ε^{max} و ε^{rms} برای دو روش MOS و OS برای سطوح مختلف شکل‌پذیری

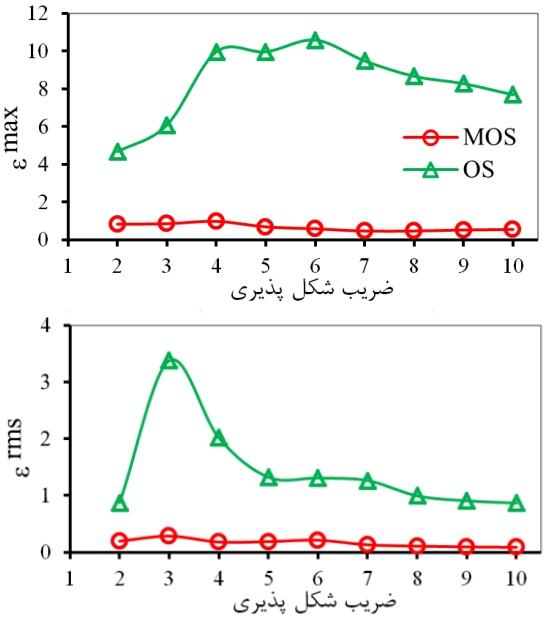

Fig. 8. ε^{max} and ε^{rms} error indicators for MOS and OS methods for different ductility ratios

در شکل (۹) پاسخ طبقه اول سازه، به دست آمده از روش MOS و نیز حل مرجع رسم شده است. در این نمونه نیز روش ضمنی نیومارک با β=۰/۲۵ به عنوان حل مرجع درنظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که با وجود تاثیر مدهای با فرکانس بالا، روش MOS به صورت صحیح و پایدار پاسخ سیستم را به دست آورده است. لازم به گفتن است که در این حالت نیز پاسخ روش MOS دقیق‌تر از روش OS است، به گونه‌ای که اندیس خطای ε^{max} برای دو روش MOS و OS به ترتیب برابر با ۳/۲ و ۱۰/۹ و اندیس خطای ε^{rms} نیز به‌ترتیب برابر با ۰/۷ و ۲/٤ است. به‌علاوه در این شبیه‌سازی پاسخ‌های به‌دست آمده از روش صریح نیومارک (EXP) که یکی از پرکاربردترین روش‌ها در شبیه‌سازی هیبرید است، کاملا ناپایدار است.

پایداری روش MOS برای رنج وسیعی از سیستم‌های چند - درجه‌آزادی بررسی، و ملاحظه شد که تاوقتی‌که گام‌زمانی انتگرال‌گیری به گونه‌ای انتخاب شود که دقت روش برای مدهای مهم برقرار باشد، که معمولا در تحلیل‌های دینامیکی برقرار است، هیچ‌گونه نگرانی درمورد پایداری روش وجود نخواهد داشت. در جدول (۱) به عنوان نمونه برای سیستم‌های سه، پنج، ده و پانزده درجه آزادی برای دو حالتی که پاسخ روش صریح نیومارک در مرز ناپایداری باشد و یا ناپایدار شده باشد، نتایج روش‌های MOS، OS و EXP ارائه شده‌است. مشاهده می‌شود که در همه این‌موارد روش MOS دارای پاسخی کاملا پایدار و نیز دقیق‌تر از هر دو روش OS و EXP است.

جدول ۱- مقایسه پایداری و دقت روش های MOS، OS و EXP

تعداد درجات آزادی	زمان تناوب مدهای اول و آخر		ε^{rms}		
	T_1	T_N	MOS	OS	EXP
۳	۰/۲۲	۰/۰۵۵	۲/۷۷	۲/۲۱	ناپایدار
۳	۰/۲۸	۰/۰۷۰	۱/۵۷	۲/۱۸	۱۱/٤۵
۵	۰/۳۵	۰/۰۵۲	۰/۷۰	۲/٤۱	ناپایدار
۵	۰/٤٤	۰/۰٦۵	۱/۳۹	۳/۱۸	۵/٦۷
۱۰	۰/٦٦	۰/۰۵۰	۰/٤۱	۰/۷۳	ناپایدار
۱۰	۰/۸٤	۰/۰٦٤	۰/۲۰	۰/۳۹	۱/۲۱
۱۵	۰/۹۸	۰/۰۵۰	۰/۰۹	۰/٤۱	ناپایدار
۱۵	۱/۲٤	۰/۰٦۳	۰/۱۲	۰/۳۹	۰/۸۵

Table 1- Comparison of stability and accuracy of MOS, OS and EXP methods

شکل ۹- پاسخ طبقه اول سیستم پنج درجه آزادی مطالعه شده به دست آمده از روش MOS و حل مرجع

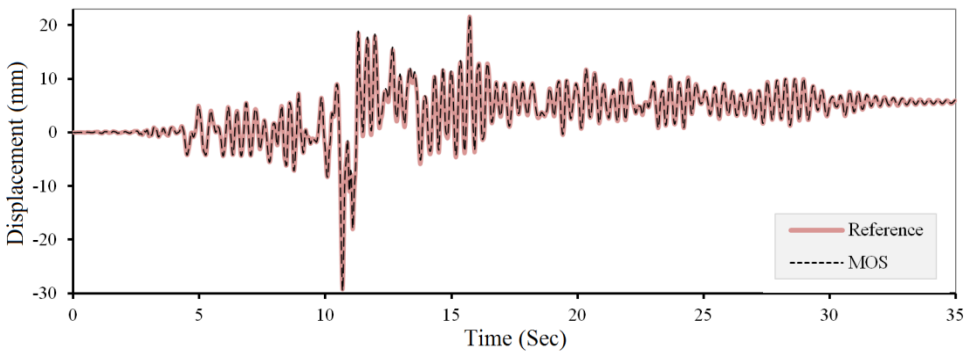

Fig. 9. First story displacement response of the considered five DOF system, from MOS method and reference solution

www.SID.ir

Archive of SID

۵- بررسی کارایی روش انتگرال گیری MOS در شرایط شبیه سازی شده آزمایشگاهی

مطالعات عددی انجام شده در بالا نشان داد که روش MOS دارای دقت بالاتری نسبت به روش پرکاربرد OS در به‌دست آوردن پاسخ سیستم در شبیه سازی هیبرید است. به علاوه نشان داده شد که این روش از نظر پایداری نیز قابل مقایسه با روش OS است.

ولی در شرایط واقعی شبیه‌سازی هیبرید که در آن قسمتی از سازه به صورت آزمایشگاهی تست می‌شود، خطاهای آزمایشگاهی نیز بر دقت و پایداری نتایج تاثیر گذار است که این امر در مطالعات بالا منظور نشده است. با فرض استفاده از تجهیزات مناسب آزمایشگاهی و کالیبره کردن آن‌ها، تاخیر سیستم جک هیدرولیکی به عنوان یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین منبع‌های خطا شناخته می‌شود. تاخیر با ایجاد یک میرایی منفی سبب ایجاد خطا در شبیه‌سازی هیبرید می‌شود [٦] که هدف این بخش پژوهش، این است که این خطا به شکل مناسبی شبیه‌سازی شده، با شرایط واقعی آزمایشگاه کالیبره شده و اثر آن بر نتایج روش MOS بررسی شود.

برای بررسی کارایی روش انتگرال گیری MOS در به دست آوردن پاسخ سازه در شرایط شبیه‌سازی هیبرید از مدل خطای موسکودا و همکاران [١٤] استفاده شده است که نمودار بلوکی آن در شکل (١٠) نشان داده شده است. در این نمودار، خطای مربوط به تاخیر جک در بلوک "خطای جابه‌جایی" مدل شده است که قبل از اعمال جابه‌جایی به زیرسازه آزمایشگاهی به جابه‌جایی دستور اضافه می‌شود. جزئیات این خطا در شکل (١١) نشان داده شده است. تاخیر جک به صورت یک سیگنال رندوم با توزیع نرمال شبیه‌سازی شده است ("سیگنال خطا" در شکل ١١) که در نمو جابه‌جایی ضرب می‌شود. با استفاده از اطلاعات کالیبراسیون مرجع [١٤] که با آزمایش‌های واقعی هماهنگ شده‌اند، میانگین و واریانس توزیع نرمال "سیگنال خطا" برابر با ٠/٥- و ٠/٠٠٠١ در نظر گرفته می‌شوند که این مقادیر تاخیری برابر با ٥ میلی‌ثانیه را موجب می‌شود.

در شکل (١٠)، پروسه مربوط به مرحله پیش‌بینی کننده روش MOS در بلوک "انتگرال گیر١" و پروسه مربوط به مرحله تصحیح‌کننده در بلوک "انتگرال‌گیر٢" انجام می‌شوند. هم‌چنین در بلوک "جبران تاخیر"، مانند یک شبیه‌سازی هیبرید واقعی پروسه مربوط به جبران تاخیر و محاسبه سیگنال دستور انجام می‌شود [١٦]. در این مدل فرض شده است که نیروهای اینرسی و میرایی کاملا به صورت عددی محاسبه شده‌اند و نیروی بازگشتی به صورت آزمایشگاهی و از بلوک "مدل دوخطی" به‌دست آمده است.

شکل ١٠- نمودار بلوکی پروسه شبیه‌سازی هیبرید برای روش انتگرال‌گیری MOS

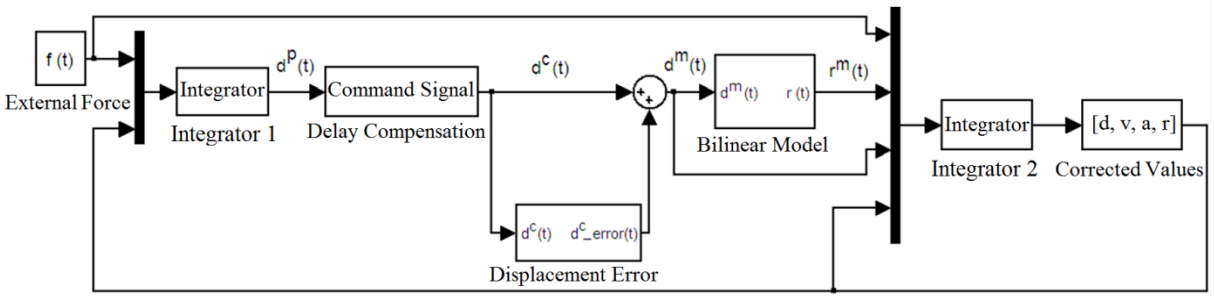

Fig. 10. Block diagram of hybrid simulation algorithm for MOS method

شکل ١١- نمودار بلوکی خطای ناشی از تاخیر جک هیدرولیکی

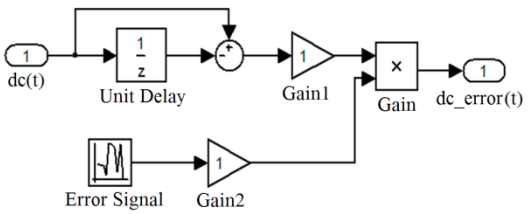

Fig. 11. Block diagram of actuator delay error

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۲- پاسخ سازه در شرایط شبیه‌سازی هیبرید در مقایسه با حل مرجع تحت زلزله طبس

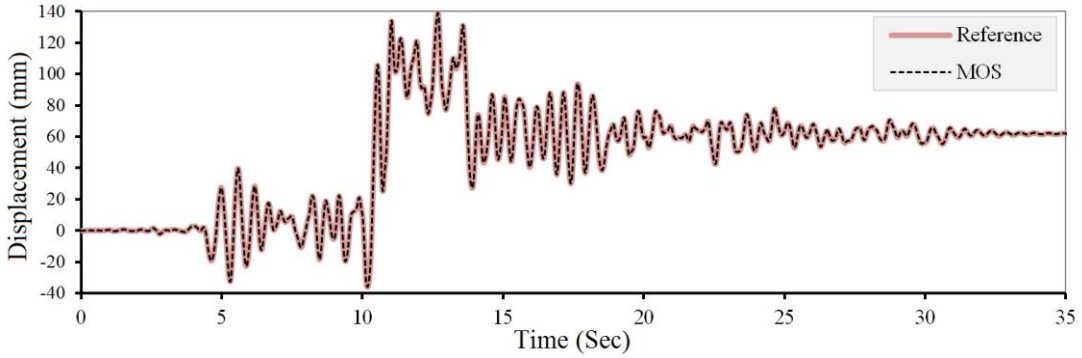

Fig. 12. Displacement history of system in hybrid simulation situation from MOS in comparison with reference solution

سازه مطالعه شده یک سیستم یک درجه آزادی با زمان تناوب اولیه ۰/۵ ثانیه و میرایی ۵٪ میرایی بحرانی است. ویژگی‌های زیرسازه آزمایشگاهی به گونه‌ای انتخاب شده است که مشابه ویژگی‌های زیرسازه آزمایشگاهی مرجع [۱٤] بوده تا بتوان پارامترهای مدل‌های خطا را مشابه آن پژوهش استفاده کرد. برای این منظور سختی اولیه زیرسازه آزمایشگاهی برابر با ۰/٤۹ kN/mm در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی سازه از مدل الاستو–پلاستیک استفاده شده است که در آن مقدار نیروی جاری شدگی برابر با ۱۷kN است.

در شکل (۱۲) جابه‌جایی سازه بر اساس روش MOS و با در نظر گرفتن خطا گفته‌ی شده رسم شده است. برای انجام مقایسه، پاسخ سازه با استفاده از روش کاملا ضمنی نیومارک با β=۰/۲۵ و بدون هیچ خطایی نیز رسم شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود پاسخ به دست آمده از روش MOS دارای هماهنگی بسیار بالایی با حل مرجع است به طوری که مقدار اندیس‌های خطای ε^{max} و ε^{rms} به ترتیب برابر با ۰/۲٤ و ۰/۱۱ است که مقادیر بسیار پایینی هستند. این نمودار نشان می‌دهد که روش انتگرال‌گیری پیشنهادی در شرایط شبیه سازی هیبرید نیز به صورت بسیار دقیق و پایدار موفق به حل معادلات تعادل دینامیکی شده و تا زمانی که تاخیر به درستی تخمین زده و جبران شود، این خطای آزمایشگاهی دارای اثر قابل توجهی بر نتایج به دست آمده از روش MOS نیست.

٦- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش انتگرال‌گیری عددی برای حل معادلات حرکت حاکم بر سیستم شبیه‌سازی هیبرید پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی که روش انتگرال‌گیری جداسازی عملگرهای بهبود یافته (MOS) نامگذاری شده است بر پایه روش معمول جداسازی عملگرها (OS) بوده که در آن مرحله پیش بینی کننده به گونه‌ای اصلاح شده است که دقت بالاتری برای این مرحله حاصل شود. روش انتگرال‌گیری پیشنهادی نسبت به روش‌های پرکاربرد در شبیه سازی هیبرید دارای مزایای زیر است:

– روش MOS نسبت به روش پرکاربرد OS دارای دقت بالاتری است. دلیل آن افزایش دقت مرحله پیش‌بینی کننده و کاهش طول مرحله اصلاح کننده که در آن از تقریب ماتریس سختی اولیه استفاده می‌شود، است.

– روش MOS نسبت به روش‌های ضمنی دارای این مزیت است که به کارگیری آن برای شبیه‌سازی هیبرید بسیار ساده‌تر است. چراکه در این روش برخلاف روش‌های ضمنی نیاز به انجام تکرار روی زیرسازه آزمایشگاهی برای همگرا شدن معادلات حرکت و یا تخمین آنلاین ماتریس سختی مماسی که امری مشکل در شبیه سازی هیبرید است، نیست.

– روش MOS نسبت به روش صریح نیومارک پایداری و دقت بیش تری را تامین می‌کند. این دقت و پایداری بیشتر به دو دلیل افزایش دقت مرحله پیش‌بینی کننده و نیز اصلاحاتی که در مرحله اصلاح کننده روی نیروی بازگشتی انجام می‌شود، است.

– عملکرد روش MOS برای محدوده وسیعی از سازه‌ها شامل زمان تناوب‌ها، شکل پذیری‌ها و درجات آزادی مختلف به صورت عددی بررسی شد و نتایج به دست آمده نشان داد که برای تمامی سازه‌های مطالعه شده، دقت روش MOS بیشتر از روش OS بوده و پروسه ارائه شده در مرحله پیش‌بینی کننده

References

www.SID.ir

Archive of SID

روش MOS به صورت موفقیت آمیزی موجب بهبود نتایج این روش شده است. به علاوه مشاهده شد که نتایج روش MOS در حضور مدهای با فرکانس بالا نیز صحیح و پایدار بوده و تا زمانی که دقت شبیه‌سازی برای مدهای با اهمیت سازه تامین شود، مشکلی از نظر پایداری روش وجود نخواهد داشت.

- برای بررسی عملکرد روش انتگرال‌گیری MOS در شرایط شبیه‌سازی هیبرید، پروسه آزمایش در شبیه‌سازی هیبرید به همراه خطای آزمایشگاهی تاخیر به صورت عددی مدل‌سازی شده و با اطلاعات آزمایش‌های واقعی کالیبره شده است. نتایج به دست آمده از این مدل نیز نشان داد که پاسخ‌های به دست آمده از روش MOS دارای هماهنگی بسیار بالایی با حل مرجع بوده و در صورتی که تاخیر به درستی تخمین زده شده و جبران شود، روش MOS به صورت دقیق و پایدار قادر به حل معادلات حاکم بر سیستم است.

مراجع:

1. Mahin SA and Shing PSB. Pseudodynamic method for seismic testing. Journal of Structural Engineering 1985; 111(7): P 1482-1503.
2. Takanashi K and Nakashima M. Japanese activities on on-line testing. Journal of Engineering Mechanics 1987; 113(7): 1014–1031.
3. Nakashima M, Kato H and Takaoka E. development of real-time pseudo dynamic testing. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 1992; 21(1): 79-92.
4. Shing PSB, Nakashima M and Bursi O. Application of pseudodynamic test method to structural research. Earthquake spectra 1996, 12:29-56.
5. Nakashima M. Development, potential, and limitations of real-time online (pseudodynamic) testing. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences 2001; 359(1786): 1851-1867.
6. Ahmadizadeh M. "real-time seismic hybrid simulation procedures for reliable structural performance testing" PhD Dissertation in Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, 2007, University at Buffalo.
7. Nakashima M, Kaminoso T, Ishida M and Kazuhiro A. Integration techniques for substructure online test. 4th US National Conference of Earthquake Engineering, Palm Springs, CA 1990; 515-524.
8. Ahmadizadeh M and Mosqueda G. Hybrid simulation with improved operator-splitting integration using experimental tangent stiffness matrix estimation. Journal of Structural Engineering 2008, 134(12):1829-1838.
9. Hung CC and El-Tawil S. A method for estimating specimen tangent stiffness for hybrid simulation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2009; 38(1): 115-134.
10. Hung CC and El-Tawil S. Full operator algorithm for hybrid simulation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2009; 38: 1545-1561.
11. Wu B, Xu G, Wang Q and Williams MS. Operator-splitting method for real-time substructure testing. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 2006; 35(3): 293-314.
12. Newmark NM. A method of computation for structural dynamics. Journal of Engineering Mechanics 1959, 85(3):67–94.
13. Bathe KJ. Finite Element Procedures in Engineering Analysis. Prentice-Hall 1982.
14. Mosqueda G, Stojadinovic B and Mahin SA. Real-time error monitoring for hybrid simulation. II: structural response modification with error. Journal of Structural Engineering 2007; 133(8): 1109-1117.
15. Combescure D, Pegon P. α-Operator splitting time integration technique for pseudodynamic testing error propagation analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 1997; 16(7–8):427–443.
16. Ahmadizadeh M, Mosqueda G and Reinhorn AM. Compensation of actuator delay and dynamics for real-time hybrid structural simulation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2008, 37(1): 21-42.

www.SID.ir

Archive of SID

Modified Operator Splitting Integration Algorithm for Application to Hybrid Simulation

M. Zakersalehi[1], A. A. Tasnimi[2*], M. Ahmadizadeh[3]

1- PhD Candidate, Faculty of civil and environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2- Professor, Faculty of civil and environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
3- Assistant Professor, School of civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

tasnimi@modares.ac.ir

Abstract:
Hybrid simulation which combines experimental and numerical modeling is a powerful and relatively new test method for evaluating the seismic performance of structural systems. In this method only critical components of structure are tested experimentally while the rest of the structure is numerically modeled in the computer. In this method the response of the structure is achieved by numerically integrating the equation of motion of the whole system. Among numerical integration methods, operator splitting (OS) method is of great interest for hybrid simulation, since not only its results are more accurate and stable in comparison with explicit methods but also its application for hybrid simulation is much more easier than implicit methods; the reason is that in OS method it is not required to conduct iteration on experimental element or estimate its tangent stiffness matrix during the simulation, the tasks which limit the application of implicit methods for hybrid simulation. But OS method suffers from the shortcoming that the use of initial stiffness matrix in its corrector step decreases the accuracy of results in nonlinear range. This paper presents a modified form of OS method which is termed MOS integration method in which by proposing a new procedure in the predictor step, the accuracy of this step is increased. When the accuracy of the predictor step increases, the difference between predictor and corrector displacements decreases and as a result the effect of initial stiffness approximation becomes less important. This would finally result in the improved accuracy of the whole simulation, as is shown in the paper.
The performance, accuracy and stability characteristics of the proposed integration method were studied through numerical simulations, where it was assumed that the restoring force of the system is achieved experimentally and no information about the experimental stiffness is available. The results showed that for the wide range of considered systems including various natural periods, various ductility ratios and various degrees of freedom, MOS results are more accurate than OS method. This shows that the employed method of the predictor step of MOS method has successfully decreased the length of the corrector step with initial stiffness assumption. All the employed error indices also verified that not only the results of MOS are in great harmony with the reference solution but also its accuracy is improved over regular OS method, especially in simulations involving severe nonlinearity. Furthermore results of multi degree of freedom systems with high frequency modes show that MOS results are quite stable as long as the accuracy of important modes of the system is maintained, which is usually the case.
As in a real hybrid simulation, experimental errors also affect the accuracy and stability of integration methods, in this paper a hybrid simulation algorithm is numerically modeled and the effect of actuator time delay on the performance of MOS method is investigated. It was observed that in the presence of actuator delay, which is known to be one of the most important sources of experimental errors in hybrid simulation, MOS integration method has solved the equation of motion in an accurate and stable manner with very small level of errors in comparison with the reference solution.

Keywords: Hybrid simulation, numerical integration, Error index, Accuracy, Stability, Seismic response

www.SID.ir