

تحلیل پوش آور مودال با الگوی بار بهنگام‌شونده جهت ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها

کاظم شاکری، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
محسنعلی شایانفر، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
E-mail: shayanfar@iust.ac.ir

چکیده

کاربرد تحلیل پوش آور در سال‌های اخیر توسعه فراوانی یافته و روش‌های پوش آور پیشرفته متعددی جهت ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها ارائه شده است. از آنجاکه این روش‌ها اساساً برای سازه‌های ساختمانی پیشنهاد شده‌اند و با توجه به تفاوت‌های اساسی موجود بین رفتار سازه‌های پل‌ها و ساختمان‌ها کاربرد روش‌های پوش آور موجود بر روی سازه پل‌ها با ابهاماتی روبه‌رو است. از این رو در این مقاله یک روش تحلیل پوش آور مودال با الگوی بار بهنگام‌شونده جهت ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها ارائه شده است که در آن اثرات مودهای بالاتر و تغییرات ایجاد شده در مشخصات مودال سازه‌های ناشی از تغییر شکل‌های پلاستیک در نظر گرفته شده است. همچنین برای تشکیل طیف ظرفیت سیستم یک درجه آزادی معادل در هر مود از مفهوم انرژی استفاده شده و ابهامات موجود در رابطه با انتخاب محل نقطه کنترلی (تکیه‌گاه مینا) در خصوص پل‌ها برطرف شده است. روش پیشنهادی بر روی یک مورد پل دره‌ای نامنظم با چهار دهانه مساوی تحت اثر زلزله طیس بکار رفته و مشاهده شده است که روش مذکور با دقت مناسبی توانسته پاسخ‌های حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی را تقریب بزند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل غیرخطی، پوش آور مودال، بهنگام‌شونده، ارزیابی لرزه‌ای، سازه پل

۱. مقدمه

مفاصل پلاستیک و نحوه باز پخش نیروها و ... ارائه کند که با روش‌های استاتیکی خطی قابل دستیابی نیستند. با این حال تحلیل پوش آور سنتی موجود در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های جاری از قبیل FEMA-356 [۳-۶] و ATC-40 با کاستی‌هایی روبه‌رو است، به طوری که محدود به یک شکل مود فرضی ثابت بوده و اثرات مودهای بالاتر و همچنین تغییرات ایجاد شده در مشخصات مودال سازه در طول تحلیل دینامیکی غیرخطی در آنها در نظر گرفته نمی‌شود. در نتیجه کاربرد آن در خصوص سازه‌هایی با اثرات مودهای بالاتر مناسب نیست [۷-۹]. همچنین این روش‌ها عموماً برای سازه‌های ساختمانی توسعه یافته‌اند و کاربرد آنها در سایر سازه‌ها از قبیل پل‌ها با ابهاماتی روبه‌رو است.

با توجه به فلسفه طراحی لرزه‌ای سازه‌ها و رفتار غیرخطی آنها در سطوح عملکردی پایین، کاملاً آشکار است که آسیب‌پذیری سازه‌ها در برابر زلزله توسط ظرفیت تغییر شکل غیرالاستیک المان‌های سازه‌ای کنترل می‌شود. از این رو تغییر مبنای آیین‌نامه‌ها از حالت کنترل نیرویی به حالت کنترل جابجایی، امروزه از سوی محققین مختلفی توصیه شده است [۱۰ و ۱۱] و لازمه این امر استفاده از تحلیل‌های غیرخطی است. با توجه به پیچیدگی‌های روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، امروزه روش استاتیکی غیرخطی موسوم به پوش آور به عنوان یک ابزار کاربردی مناسب توسعه فراوانی در مهندسی زلزله بر مبنای عملکرد پیدا کرده است [۳-۶] و می‌تواند اطلاعات مفیدی از رفتار غیرخطی سازه، محل تشکیل

۲. روش‌های تحلیل پوش‌آور پیشرفته

۱-۲ روش‌های تحلیل پوش‌آور مودال با الگوی بار ثابت

برای در نظر گرفتن اثرات مودهای بالاتر، روش‌های پوش‌آور پیشرفته مختلفی بر اساس مفاهیم ترکیب مودال سازه‌ای ارائه شده‌اند که سادگی روش‌های پوش‌آور سنتی در آنها حفظ شده و الگوی بار اعمالی همچنان در طول تحلیل ثابت فرض می‌شود. استفاده از مفاهیم ترکیب مودال به شیوه‌های متفاوتی در روش‌های پوش‌آور پیشنهادی صورت می‌گیرد که می‌توان آنها را به دو گروه عمده تقسیم‌بندی کرد.

الف) در گروه اول از قوانین ترکیب مودها برای تعیین الگوی بار اعمالی استفاده شده و الگوی بار از ترکیب الگوهای بار متناسب با چند مود اول تعیین می‌شود. بارهای جانبی بر اساس الگوی بار تعیین شده به صورت افزایشی در قالب یک تحلیل پوش‌آور به سازه اعمال می‌شود [۴ و ۱۲-۱۰]. در این شیوه با وجود این که اثرات مودهای بالاتر در الگوی بار اعمالی منعکس شده است با این حال شکل الگوی بار اعمالی محدود به یک شکل ثابت و یگانه بوده و منحنی پوش‌آور (طیف ظرفیت) حاصل، در نهایت همانند طیف ظرفیت یک سیستم یک درجه آزادی با شکل مود فرضی ثابت ظاهر می‌شود. در واقع همان مشکلات تحلیل پوش‌آور سنتی در این روش‌ها نیز پابرجا بوده و بدیهی است که پیش‌بینی پاسخ سیستم چند درجه آزادی از طریق پاسخ یک سیستم یک درجه آزادی نمی‌تواند به درستی صورت گیرد.

ب) در گروه دوم به جای استفاده از یک تحلیل پوش‌آور با الگوی بار ترکیبی از چندین تحلیل پوش‌آور مستقل با الگوهای بار متناسب با هر یک از مودهای مورد نظر استفاده می‌شود [۱۷-۱۳]. پاسخ‌های حاصل از هر مود با استفاده از روش‌های ترکیب مودال با هم ترکیب می‌شوند. در روش مشهور پوش‌آور مودال Modal Pushover Analysis (MPA) پیشنهاد شده توسط چوپرا و گوئل [۱۶]، در هر یک از تحلیل‌های پوش‌آور مودی، تغییر مکان هدف به طور مستقل تعیین شده و پاسخ‌های حاصل از هر مود با هم ترکیب می‌شوند. در واقع پاسخ یک سیستم چند درجه آزادی از طریق ترکیب پاسخ‌های چندین سیستم یک درجه آزادی حاصل می‌شود. از آنجا که در مودهای بالاتر افزایش جابجایی با متناسب با تغییرات جابجایی سایر طبقات نیست، در بعضی موارد حتی ممکن است به علت تشکیل مکانیزم در سیستم سازه‌ای، برای حرکت، جابجایی بام در جهت

عکس نیز بوده و با افزایش برش پایه، کاهش یابد. برای رفع این مشکل هرناندو منتر و همکارانش [۱۸] روش تحلیل پوش‌آور مودال بر اساس مفهوم انرژی را ارائه کرده‌اند.

۲-۲ روش‌های تحلیل پوش‌آور مودال با الگوی بار

بهنگام‌شونده

در همه روش‌های پوش‌آور مودال تا کنون شرح داده شده، الگوهای بار اعمالی در طول تحلیل ثابت بوده و بر اساس مشخصات دینامیکی الاستیک سازه تعیین می‌شوند. برای در نظر گرفتن اثرات تغییرات ایجاد شده در مشخصات مودال در نواحی غیر الاستیک، تحلیل‌های پوش‌آور متعددی با الگوی بار بهنگام‌شونده Adaptive ارائه شده‌اند [۲۲-۱۹].

در این روش‌ها الگوی بار اعمالی در هر مرحله از تحلیل بر اساس مشخصات مودال لحظه‌ای سازه بهنگام شده و تغییرات ایجاد شده در مشخصات دینامیکی سازه ناشی از تشکیل مفاصل و تغییر شکل‌های پلاستیک در نظر گرفته می‌شود. با این حال در هیچ یک از تحلیل‌های پوش‌آور مذکور شیوه مشخصی برای تعیین تغییر مکان هدف ارائه نشده است و در مقالات مرجع [۲۲-۱۹]، سازه تا هنگامی هل داده می‌شود که تغییر مکان بام برابر با مقدار حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی شود. در صورتی که بخواهیم تغییر مکان هدف توسط خود روش تعیین شود، ناگزیر این روش‌ها نیز متوسل به سیستم یک درجه آزادی معادل خواهند شد و همان مشکل موجود در روش‌های سنتی تک مودی یعنی پیش‌بینی پاسخ سیستم چند درجه آزادی از طریق یک سیستم یک درجه آزادی در این روش‌ها نیز پابرجاست [۲۳]. همچنین در این روش‌ها برای مقیاس کردن الگوهای بار متناسب با هر مود و ترکیب آنها در هر مرحله، از طیف الاستیک استفاده می‌شود، در حالی که کاربرد طیف الاستیک در ناحیه غیرالاستیک با ابهاماتی روبه‌روست.

برای رفع این مشکل، آیدین اوغلو یک روش پوش‌آور بهنگام‌شونده بر اساس طیف غیرالاستیک ارائه کرده است و فرآیند تحلیل تا وقتی ادامه پیدا می‌کند که در یکی از مودها مقدار تغییر مکان بام به حداکثر مقدار خود بر اساس طیف غیرالاستیک برسد [۲۳].

هر یک از روش‌های پوش‌آور مدرن پیشنهادی از نقطه نظری سعی کرده‌اند که مشکلات روش‌های پوش‌آور سنتی را بر طرف نمایند. با توجه به مزایای هر یک از آنها و به منظور تجمیع آنها

پل‌ها کاملاً انعطاف‌پذیر بوده و مودهای بالاتر بیشتری، بسته به سختی پایه‌ها در طول تحلیل دینامیکی می‌توانند تحریک شوند. در نتیجه اثرات مودهای بالاتر در سازه پل‌ها مهم‌تر است.

۴. تحلیل پوش آور مودال بهنگامشونده جهت

ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها

با توجه به تفاوت‌های اساسی موجود بین رفتار سازه‌ای پل‌ها و ساختمان‌ها و همچنین با مطالعه روش‌های پوش آور پیشرفته ارائه شده در سال‌های اخیر در مورد سازه‌های ساختمانی، در این مقاله یک روش تحلیل پوش آور مودال با الگوی بار بهنگامشونده جهت ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها ارائه شده است.

روش پیشنهادی با الهام گرفتن از ایده بکار رفته در روش ترکیب مودال بهنگامشونده (AMC) ترکیبی از روش پوش آور مودال (MPA) و روش پوش آور با الگوی بار بهنگامشونده است و مزایای هر دو روش را داراست. همچنین بخاطر تعیین مقدار مشخصه جابجایی در منحنی ظرفیت بر اساس مجموع کار انجام شده در تمام تکیه‌گاه‌ها و استفاده از مفهوم انرژی، ابهامات موجود در رابطه با انتخاب نقطه کنترل جابجایی (تکیه‌گاه مبنا) در مورد پل‌ها بر طرف شده است.

در توسعه روش پیشنهادی در واقع از سه مفهوم کلیدی استفاده شده است که عبارتند از: (۱) استفاده از مفهوم تجزیه مودال و اجرای چندین تحلیل پوش آور با الگوی بار متناسب با هر مود (۲) استفاده از الگوی بار بهنگامشونده در هر مود بر اساس مشخصات مودال لحظه‌ای سازه و در نظر گرفتن اثرات تغییرات ایجاد شده در مشخصات مودال لحظه‌ای سازه در اثر تغییر شکل‌های پلاستیک. (۳) تبدیل منحنی پوش آور سیستم چند درجه آزادی به طیف ظرفیت سیستم یک درجه آزادی معادل بر اساس مشخصات مودال لحظه‌ای و کل کار انجام شده در تمام تکیه‌گاه‌ها.

۴-۱ الگوی بار مودال بهنگامشونده

در روش پیشنهادی پاسخ سازه از ترکیب پاسخ‌های حاصل از تحلیل‌های پوش آور جداگانه با الگوهای بار متناسب با اشکال مودی مورد نظر به دست می‌آید، به طوری که تغییرات ایجاد شده در مشخصات مودال و اشکال مودی در طول تحلیل ناشی از تغییر شکل‌های پلاستیک در نظر گرفته شده و متناسب با این تغییرات، شکل الگوی بار وارده در طول هر یک از تحلیل‌های

در یک روش، اخیراً روش پوش آور پیشرفته‌ای تحت عنوان ترکیب مودال بهنگامشونده Adaptive Modal Combination (AMC) توسط کلکن و کوناس پیشنهاد شده است [۲۴] به طوری که مزیت‌های روش پوش آور مودال (MPA) و روش‌های پوش آور با الگو بار بهنگامشونده را با هم در کنار یکدیگر داراست.

۳. توسعه کاربرد تحلیل پوش آور در پل‌ها

اگر چه در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای در خصوص روش‌های تحلیل پوش آور صورت گرفته و روش‌های مدرن متعددی برای رفع کاستی‌های روش‌های پوش آور سنتی ارائه شده‌اند، با این حال اکثر این مطالعات بر روی سازه‌های ساختمانی بوده و بجز موارد بسیار معدود [۲۵-۲۸]، مطالعات عمده‌ای برای توسعه کاربرد این روش‌ها بر روی سازه پل‌ها صورت نگرفته است. از طرف دیگر با توجه به تفاوت‌های اساسی در رفتار سازه‌های بین پل‌ها و ساختمان‌ها آشکار است که نمی‌توان نتایج حاصل از مطالعات صورت گرفته بر روی سازه‌های ساختمانی را به‌طور مستقیم به سازه پل‌ها تعمیم داد. بنابراین برای توسعه کاربرد تحلیل پوش آور در خصوص پل‌ها باید به تفاوت‌های اساسی بین رفتار سازه‌ای پل‌ها و ساختمان‌ها به شرح ذیل به نقل از مراجع [۲۶-۲۵] توجه شود.

(۱) ساختمان‌ها عموماً سازه‌های چند طبقه هستند که در آنها جابجایی طبقه بام و برش پایه به ترتیب به عنوان مشخصه‌های جابجایی و نیرو در منحنی ظرفیت در نظر گرفته می‌شوند. در حالی که سیستم سازه‌ای پل‌ها در جهت عرضی اساساً متفاوت بوده و به صورت یک تیر پیوسته با تکیه‌گاه‌های انعطاف‌پذیر در یک صفحه است و شکل تغییر فرم سازه پل از قبل قابل پیش‌بینی نیست، در نتیجه در تحلیل پوش آور تعیین محل نقطه کنترلی به عنوان مشخصه جابجایی در منحنی ظرفیت با ابهاماتی روبه رو است. ارزیابی پاسخ پایه‌ها به صورت منفرد و مستقل نیز صحیح نبوده و منجر به نتایج گمراه کننده بدون در نظر گرفتن اثرات پایه‌های دیگر می‌شود.

(۲) برخلاف ساختمان‌ها که در آنها دال‌های طبقات اغلب به صورت صلب در داخل صفحه هستند، در پل‌ها دال‌های عرشه (روسازه) عموماً انعطاف‌پذیرند. از طرف دیگر المان‌های تکیه‌گاهی (پایه‌های میانی) در پل‌ها در یک صفحه واقع هستند (برخلاف توزیع فضایی ستون‌ها در ساختمان‌ها)، در نتیجه سازه

سیستم یک درجه آزادی معادل با جرم واحد از روابط (۳) و (۴) استفاده می‌شود که در واقع توسعه روابط موجود در ATC-40 [۳] برای مودهای بالاتر است.

$$F_j^* = S_{a j} = \frac{V_b}{M_j} \quad (۳)$$

$$D_j^* = S_{d j} = \frac{u_{ij}}{\Gamma_j \phi_{ij}} \quad (۴)$$

که در آن:

V_b : برش پایه،

$$M_j^* = \left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{ij} \right)^2 / \left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{ij}^2 \right)$$

u_{ij} : تغییر مکان بام در تحلیل پوش‌آور مربوط به مود j ام،

$$\Gamma_j = \sum_{i=1}^n m_i \phi_{ij} / \sum_{i=1}^n m_i \phi_{ij}^2$$

ϕ_{ij} : مقدار مولفه بام در بردار ویژه مود j ام است.

از آنجاکه در سازه‌های ساختمانی در مودهای بالاتر مقدار افزایش تغییر مکان بام متناسب با مقدار افزایش برش پایه نیست، انتخاب تغییر مکان بام به عنوان مشخصه جابجایی جهت تشکیل منحنی پوش‌آور چندان معقول نبوده و این انتخاب فقط در خصوص مود اول سازه‌های ساختمانی معنی‌دار است. همچنین در سازه پل‌ها همه تکیه‌گاه‌ها در یک سطح قرار داشته و شکل حاکم بر تغییر مکان تکیه‌گاه‌ها در اثر بارهای لرزه‌ای از قبل مشخص نیست، بنابراین انتخاب تغییر مکان هر یک از تکیه‌گاه‌های میانی به عنوان مشخصه نیرویی بحث‌انگیز بوده و انتخاب محل تکیه‌گاه میانی یکی از ابهامات موجود بر سر راه توسعه کاربرد تحلیل پوش‌آور در پل‌ها مخصوصاً در پل‌های نامنظم نیست. برای رفع این مشکل در روش پیشنهادی از مفهوم انرژی استفاده شده و جهت تعیین مشخصه جابجایی در طیف ظرفیت یک درجه آزادی از تغییر مکان همه تکیه‌گاه‌ها استفاده می‌شود. مقدار افزایش مشخصه جابجایی در منحنی طیف ظرفیت در هر مرحله از تحلیل از تقسیم مجموع کار انجام شده در تمام تکیه‌گاه در اثر مقدار بار افزایشی بر مقدار افزایش برش پایه در همان مرحله به دست می‌آید. مقدار مشخصه جابجایی در طیف ظرفیت در هر مرحله از تحلیل طبق روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید.

$$\Delta D_j^{(k)} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} dF_{ij}^{(k)} \times \Delta d_{ij}^{(k)} \right) / \Delta V_b^{(k)} \quad (۵)$$

پوش‌آور تغییر می‌کند. مقدار بار افزایشی هر طبقه در مرحله k ام از تحلیل را می‌توان به صورت ریاضی طبق رابطه (۱) بیان کرد.

$$dF_{ij}^{(k)} = C_j^{(k)} m_i \phi_{ij}^{(k)} \quad (۱)$$

که در آن:

$dF_{ij}^{(k)}$: مقدار بار افزایشی طبقه i ام در مرحله k ام از تحلیل

پوش‌آور مربوط به مود j ام است.

m_i : جرم طبقه i ام،

$\phi_{ij}^{(k)}$: مولفه i ام از بردار ویژه مود j ام و

$C_j^{(k)}$: ضریب مقایس بارهای وارده در مرحله k ام از تحلیل

مربوط به مود j ام است که طبق رابطه (۲) تعیین می‌شود.

$$C_j^{(k)} = \frac{\Delta V_b^{(k)}}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_{ij}^{(k)}} \quad (۲)$$

که در آن $\Delta V_b^{(k)}$: مقدار افزایش برش پایه در مرحله k ام است.

همان‌طورکه از روابط (۱) و (۲) مشاهده می‌شود مقدار بار افزایشی در هر طبقه متناسب با اشکال مودی لحظه‌ای بوده و طوری مقیاس می‌شود که مجموع بار افزایشی وارده در تمام طبقات در مرحله k ام برابر با $\Delta V_b^{(k)}$ باشد.

۴-۲ طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف

پس از تعیین الگوی بار جانبی، اساسی‌ترین پارامتر در تحلیل پوش‌آور تعیین تغییر مکان هدف است. در روش طیف ظرفیت توصیه شده در ATC-40 [۳] برش پایه و جابجایی بام به عنوان مشخصه‌های نیرو و جابجایی سازه چند درجه آزادی در نظر گرفته شده و منحنی برش پایه- تغییر مکان بام حاصل از اعمال بار جانبی افزایشی بر اساس شکل مود فرضی غالب (مود اول) طبق روابط مودال حاکم در ناحیه الاستیک به طیف شتاب- جابجایی سیستم یک درجه آزادی معادل تبدیل شده و با قطع دادن این منحنی با منحنی طیف نیاز، نقطه عملکرد و یا به عبارتی دیگر تغییر مکان هدف تعیین می‌شود. در روش MPA پیشنهادی چوپرا و گوئل نیز که در واقع توسعه ساده‌ای از روش پوش‌آور سنتی به صورت چند مودی است. در هر مود جهت تبدیل منحنی برش پایه- جابجایی بام سازه چند درجه آزادی به منحنی طیف شتاب- جابجایی و یا به عبارت دیگر به منحنی نیرو- جابجایی

غیرخطی، بجای استفاده از طیف پاسخ غیر الاستیک (طیف نیاز)، ماکزیمم مقدار جابجایی غیر الاستیک سیستم یک درجه آزادی معادل مربوط به هر مود مستقیماً از تحلیل دینامیکی غیرخطی سیستم یک درجه آزادی معادل دو خطی شده محاسبه می‌شود.

۴-۳ ترکیب مودها

در هر مود پس از محاسبه تغییر مکان هدف، مرحله بارگذاری متناظر با تغییر مکان هدف تعیین شده و مقادیر جابجایی، لنگرهای پلاستیک و هر نیاز لرزه‌ای مورد دلخواه دیگر متناظر با این مرحله از بارگذاری تحلیل پوش آور تعیین می‌شود. نیازهای لرزه‌ای به دست آمده در هر مود با استفاده از قوانین ترکیب مودال مانند روش جذر مجموع مربعات (SRSS) ترکیب شده و به عنوان شبه نیاز لرزه‌ای سیستم چند درجه آزادی تعیین می‌شوند.

۴-۴ مراحل مختلف انجام روش پیشنهادی در گام‌های

متوالی زیر به طور خلاصه بیان شده است.

(۱) انجام تحلیل مقادیر ویژه و محاسبه مشخصات مودال وضع موجود سازه از قبیل اشکال مودی $\varnothing_j^{(k)}$ ، فرکانس طبیعی $\omega_j^{(k)}$ در مرحله k

(۲) محاسبه مقدار افزایش نیروهای جانبی طبقات متناظر با مود \bar{z}_m مورد نظر بر اساس رابطه (۱) بطوریکه مقدار و نحوه توزیع بارهای وارده در هر مرحله از بارگذاری با توجه به مشخصات مودال محاسبه شده در گام قبل بهنگام می‌شود.

(۳) محاسبه $D_j^{(k)}$ و $F_j^{*(k)}$ با استفاده از روابط (۵) تا (۸) و تشکیل منحنی نیرو-جابجایی غیرخطی $(F_j^* - D_j)$ سیستم یک درجه آزادی معادل متناظر با مود مورد نظر \bar{z}_m .

(۴) منحنی نیرو-جابجایی غیرخطی $(F_j^* - D_j)$ سیستم معادل متناظر با هر مود به صورت دو خطی ایده آل شده و از قطع دادن آن با طیف پاسخ غیر الاستیک شتاب-جابجایی، نقطه عملکرد و یا به عبارتی تغییر مکان هدف مشخص می‌شود. در مطالعه حاضر جهت ارزیابی دقت روش پیشنهادی و به منظور جلوگیری از ورود خطاهای ناشی از خطای طیف غیر الاستیک، تغییر مکان هدف مستقیماً از تحلیل دینامیکی غیرخطی سیستم یک درجه آزادی معادل محاسبه می‌شود.

$$D_j^{(k)} = D_j^{(k-1)} + \Delta D_j^{(k)} \quad (6)$$

که در آن:

$dF_{ij}^{(k)}$: مقدار بار افزایشی تکیه‌گاه میانی \bar{z}_m در مرحله k ام از

تحلیل پوش آور مربوط به مود \bar{z}_m می‌باشد.

$\Delta d_{ij}^{(k)}$: مقدار تغییرات جابجایی تکیه‌گاه میانی \bar{z}_m ناشی از

بار اعمالی $dF_{ij}^{(k)}$ در مرحله k ام،

$\Delta V_b^{(k)}$: مقدار افزایش برش پایه در مرحله k ام و

$D_j^{(k)}$: مقدار مشخصه جابجایی در مرحله k ام از تحلیل

پوش آور مربوط به مود \bar{z}_m نیست.

به منظور تبدیل برش پایه کل سیستم چند درجه آزادی به طیف شتاب یا به عبارت دیگر به نیروی مشخصه سیستم یک درجه آزادی با جرم واحد همانند روش MPA از مفهوم جرم موثر استفاده می‌شود، با این تفاوت که با توجه به تغییرات صورت گرفته در اشکال مودی در طول تحلیل از جرم موثر لحظه‌ای استفاده می‌شود و مقدار نیروی معادل در طیف ظرفیت سیستم یک درجه آزادی معادل از روی روابط (۷) و (۸) به دست می‌آید. روابط (۷) و (۸) در واقع بیان رابطه (۳) بصورت بهنگام‌شونده است.

$$\Delta F_j^{*(k)} = \Delta S_{aj}^{(k)} = \frac{\Delta V_b^{(k)}}{M_j^{*(k)}} \quad (7)$$

$$F_j^{*(k)} = F_j^{*(k-1)} + \Delta F_j^{*(k)} \quad (8)$$

که در آن:

$\Delta V_b^{(k)}$: مقدار افزایش برش پایه در مرحله k ام و

$M_j^{*(k)}$: جرم موثر مود \bar{z}_m در مرحله k ام است.

با استفاده از روابط (۵) تا (۸) منحنی نیرو-جابجایی غیرخطی سیستم یک درجه آزادی معادل با جرم واحد و یا به عبارتی دیگر طیف ظرفیت متناظر با هر مود تشکیل می‌شود. حال هر یک از این منحنی‌ها به صورت دو خطی ایده آل تبدیل شده و در برابر طیف پاسخ غیر الاستیک شتاب-جابجایی (طیف نیاز) ترسیم می‌شود. از قطع دادن طیف ظرفیت و طیف نیاز، نقطه عملکرد متناظر با هر مود پیدا می‌شود. در این مقاله به منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادی و مقایسه آن با نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی

ارائه شده است و به راحتی در وبگاه <http://peer.berkeley.edu/smcat> قابل دسترسی است.

۵-۱ مدل سازه‌ای

نمونه مورد مطالعه، یک پل دره‌ای چهار دهانه با پایه‌های میانی تکی است که به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. طول تمام دهانه‌ها یکسان و برابر با ۵۰ متر بوده و ارتفاع پایه‌های میانی به ترتیب برابر با ۷، ۱۴ و ۲۱ متر است که به صورت ستون‌های بتنی تکی با ابعاد تقریبی ۴×۲ متر در نظر گرفته شده‌اند. هندسه پل مورد مطالعه از نظر ارتفاع پایه‌ها، طول عرشه و تعداد دهانه‌ها مشابه یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی مطالعه شده توسط پیتسو [۱۳] در راستای توسعه استاندارد Eurocode 8/2 است که برای جامعه مهندسی زلزله شناخته شده بوده و توسط محققین دیگری نیز به عنوان نمونه پل نامنظم مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۶ و ۲۸]. عرشه پل مذکور در برنامه کامپیوتری تهیه شده به صورت یک تیر سراسری الاستیک دو سر مفصل با تکیه‌گاه‌های میانی مدل شده است. تکیه‌گاه‌های میانی به صورت فنرهایی با رفتار دو خطی مدل شده‌اند. جرم سازه به صورت جرم‌های نقطه‌ای متمرکز برابر با ۱۲۵۰ تن در هر یک از تکیه‌گاه‌های میانی اعمال شده‌اند. در شکل (۲) مشخصات دینامیکی مودال و اشکال مودی الاستیک مدل مذکور نشان داده شده است.

(۵) تعیین مقادیر نیاز لرزه‌ای مورد دلخواه از قبیل جابجایی، لنگر و... در مرحله بارگذاری از متناظر با تغییر مکان هدف در تحلیل پوش‌آور و معرفی آنها به عنوان نیازهای لرزه‌ای مورد نیاز.

(۶) تکرار گام‌های (۱) تا (۵) برای هر یک از چند مود اول منظور شده در تحلیل.

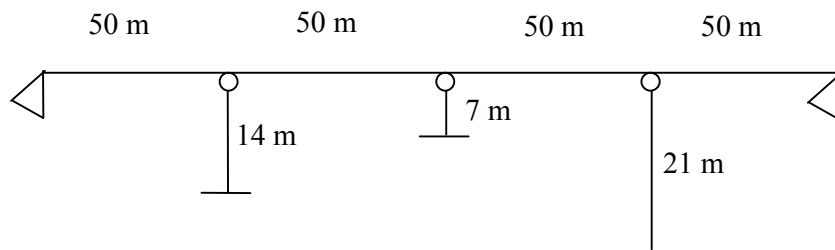
(۷) ترکیب نیازهای لرزه‌ای محاسبه شده در مودهای مختلف با استفاده از روش ترکیب جذر مجموع مربعات (SRSS) و معرفی آن به عنوان شبه نیاز لرزه‌ای سازه چند درجه آزادی.

۵. ارزیابی روش پیشنهادی

الگوریتم ارائه شده در روش پیشنهادی با استفاده از محیط برنامه نویسی نرم افزار Matlab [29] و قابلیت‌های تحلیل سازه غیرخطی نرم DRAIN-2DX [30] به صورت یک برنامه کامپیوتری درآمده و به راحتی قابل اجرا بر روی انواع سازه‌هاست. به منظور بررسی دقت و کارایی روش پیشنهادی، برنامه رایانه ای تهیه شده بر روی یک نمونه پل دره‌ای تحت اثر زلزله طیس اعمال شده و پاسخ‌های حاصل از روش تحلیل پوش‌آور مودل بهنگام‌شونده و پاسخ‌های حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی با هم مقایسه شده‌اند. مشخصات رکورد زلزله طیس مورد استفاده در تحلیل دینامیکی غیرخطی در جدول (۱)

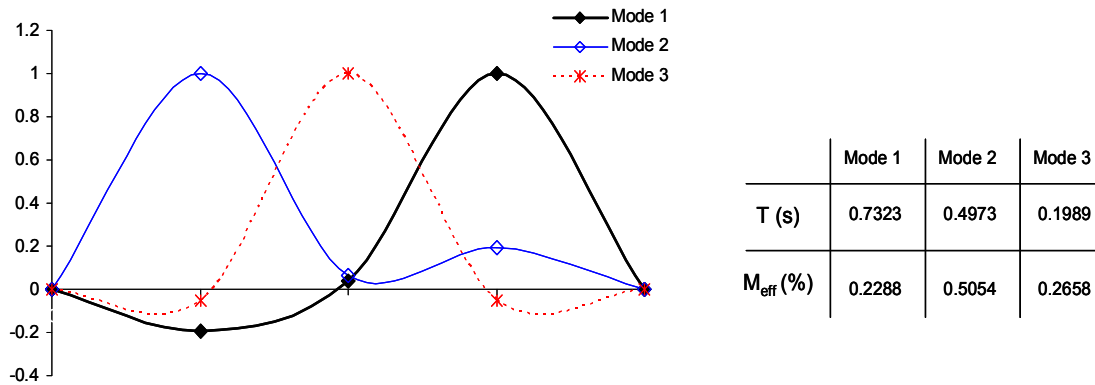
جدول ۱. مشخصات رکورد زلزله مورد استفاده در تحلیل ها

زلزله	سال	بزرگ (M)	بزرگ (Ms)	ایستگاه	مولفه	PGA(g)	PGV(cm/s)	شرایط خاک (CWB)
طیس	۱۹۷۸	۷٫۴	۷٫۴	9101 Tabas	LN	0.836	97.8	C

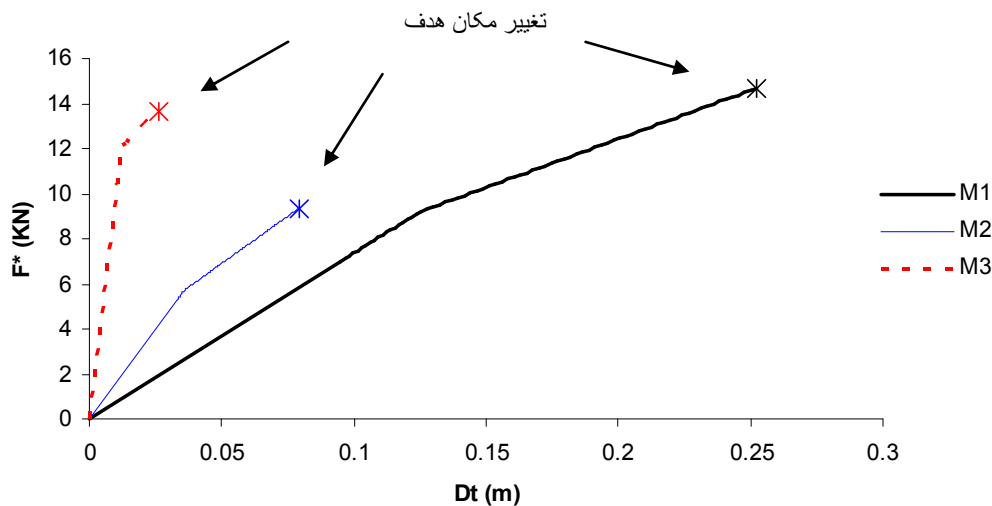


شکل ۱. طرح شماتیک و ابعاد هندسی پل مورد مطالعه

تحلیل پوش آور مودال با الگوی بار بهنگام‌شونده جهت ارزیابی لرزه‌ای پل‌ها



شکل ۲. مشخصات دینامیکی مودال و اشکال مودی پل مورد مطالعه



شکل ۳. منحنی طیف ظرفیت سیستم‌های یک درجه آزادی متناظر با هر مود

پاسخ‌های حاصل از هر یک از مودها تقریب زده می‌شود. حداکثر جابجایی پیش‌بینی شده توسط روش پوش آور مودال بهنگام‌شونده Adaptive Modal (AM) و تحلیل دینامیکی غیرخطی Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) در شکل ۴) نشان داده شده است.

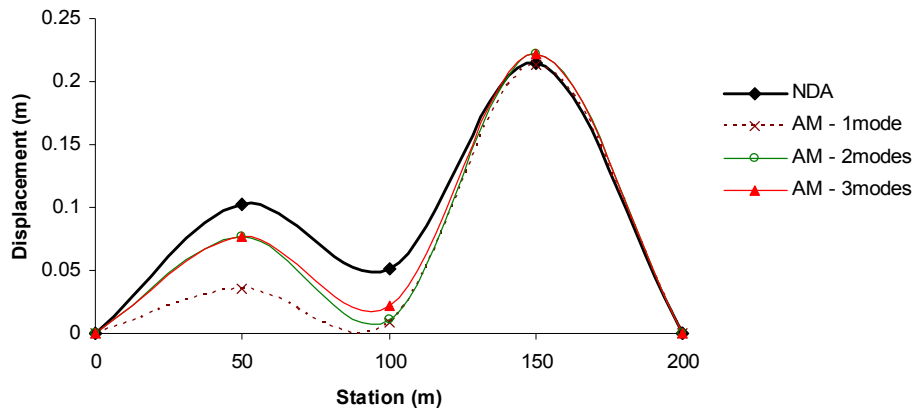
با توجه به تعداد مودهای در نظر گرفته شده در روش پیشنهادی AM، پاسخ‌های حاصل در سه حالت مختلف و در نظر گرفتن ترکیب دو یا سه مود اول و همچنین بر اساس مود اول تنها در شکل ۴ داده شده است. تعداد مودهای در نظر گرفته شده در هر

۲-۵ پیش‌بینی جابجایی عرشه در محل تکیه‌گاه‌های میانی

روش پوش آور پیشنهادی بر روی پل نمونه مورد مطالعه اعمال شده و منحنی‌های طیف ظرفیت سیستم‌های یک درجه آزادی معادل مربوط به هر مود در شکل ۳ نشان داده شده است. تغییر مکان هدف و یا به عبارتی حداکثر تغییر مکان هر یک از سیستم‌های یک درجه آزادی تحت اثر رکورد طیس و همچنین مقادیر جابجایی هر یک از تکیه‌گاه‌ها در مرحله بارگذاری متناظر با تغییر مکان هدف هر یک از مودها در جدول (۲) نشان داده شده است. پاسخ کلی سازه با استفاده از ترکیب جذر مجموع مربعات

جدول ۲. جابجایی تکیه‌گاه‌ها متناظر با تغییر مکان هدف در هر مود

مود	تغییر مکان هدف (m) Dt	جابجایی تکیه‌گاه اول	جابجایی تکیه‌گاه دوم	جابجایی تکیه‌گاه سوم
مود ۱	۰/۲۵۲۳	-۰/۰۳۵۷۴	۰/۰۰۸۵۳	۰/۲۱۳۳۸
مود ۲	۰/۰۷۹۱	۰/۰۶۷۳۶	۰/۰۰۶۶۵	۰/۰۶۲۵۵
مود ۳	۰/۰۲۶	۰/۰۰۴۰۷	۰/۰۱۹۴۶	۰/۰۰۵۳۷



شکل ۴. مقایسه پاسخ تحلیل دینامیکی غیرخطی و تحلیل پوش‌آور AM با تعداد مودهای لحاظ شده مختلف

۷. مراجع

- Priestley, M. J. N. (2000) "Performance based seismic design", Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.
- Fajfar, P. and Krawinkler, H. (1997) "Seismic design methodologies for the next generation of codes", Balkema, Rotterdam.
- Applied Technology Council (1996) "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", ATC-40, Volume 1, Redwood City.
- American Society of Civil Engineers (2000) "Pre standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- European Committee for Standardization (2002) "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance", Part 1, European standard pr EN 1998-1-1, Draft No.5, May 2002, CEN, Brussels, Belgium.
- Otani, S. Hiraishi, H. Midorikawa, M. and Teshigawara, M. (2000) "New seismic design provisions in Japan", Uzumeri Symposium, ACI Annual Convention, Toronto.
- Krawinkler, H. and Seneviratna, G.D.P.K. (1998) "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation", Engineering Structures, Vol. 20, No. 4-6, pp. 452-464.

حالت با عدد نوشته شده در سمت راست AM در شکل ۴ مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش AM از دقت مناسبی برخوردار بوده و با افزایش تعداد مودهای منظور شده، دقت روش مذکور افزایش یافته و پاسخ‌های حاصل نزدیک به پاسخ‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

به منظور توسعه کاربرد تحلیل پوش‌آور در خصوص پل‌ها یک روش تحلیل پوش‌آور مودال با الگوی بار بهنگام‌شونده ارائه شده است که اثرات مودهای بالاتر و تغییرات ایجاد شده در مشخصات مودال ناشی از تغییر شکل‌های پلاستیک را در نظر می‌گیرد. همچنین در تشکیل منحنی‌های ظرفیت مودال از مفهوم انرژی و کار صورت گرفته در تمام تکیه‌گاه‌ها استفاده شده و ابهامات موجود در رابطه با انتخاب محل نقطه کنترلی (تکیه‌گاه مینا) در منحنی پوش‌آور پل‌ها برطرف شده است. در واقع در تشکیل منحنی ظرفیت از تغییر مکان ایجاد شده در همه تکیه‌گاه‌ها استفاده می‌شود. دقت و کارایی روش پیشنهادی در پیش‌بینی پاسخ‌های لرزه‌ای با مطالعه بر روی یک پل نمونه نشان داده شده است.

20. Elnashai, A.S. (2001) "Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 12, No. 1, pp. 51-69.
21. Antoniou, S. and Pinho, R. (2004) "Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 497-522.
22. Antoniou, S. and Pinho, R. (2004) "Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 643-661.
23. Aydinoglu, M.N. (2003) "An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 1, pp. 3-36.
24. Kalkan, E. and Kunnath, S.K. (2006) "Adaptive modal combination procedure for nonlinear static analysis of building structures". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 11, pp. 1721-1731.
25. Fischinger, M., Beg, D., Isakovi, C. T., Tomazevi, C. M. and Arni, C. R. (2004) "Performance based assessment-from general methodologies to specific implementations", *Proceedings of the International Workshop on Performance-based Seismic Design*, Bled, Slovenia.
26. Isakovi, C. T. and Fischinger, M. (2006) "Higher modes in simplified inelastic seismic analysis of single column bent viaducts", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 1, pp. 95-114.
27. Paraskeva, T. S., Kappos, A. J. and Sextos, A. G. (2006) "Extension of modal pushover analysis to seismic assessment of bridges", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, pp. 1269-1293
28. Pinho, R., Casarotti, C. and Antoniou, S. (2007) "A comparison of single-run pushover analysis techniques for seismic assessment of bridges", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (in press)
29. Math Works Inc. (2005) "MATLAB, the language of technical computing", Version 7.1.0.246 (R14), Natick Massachusetts.
30. Prakash, V. and Powell, G. H. (1993) "DRAIN-2DX Base Program Description and User Guide", Version 1.10, Report No. UCB/SEMM-93/17, University of California at Berkeley.
31. Pinto, A.V [ed.] (1996) "Pseudo-dynamic and shaking table tests on R.C. bridges". ECOEST and PREC8 Report No. 5.
8. Kim, S. and D'Amore, E. (1999) "Push-over analysis procedures in earthquake engineering", *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 3, pp. 417-434.
9. Applied Technology Council (2005) "Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures", (ATC-55 Project), FEMA-440. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
10. Matsumori, T. Otani, S. Shiohara, H. and Kabeyasawa, T. (1999) "Earthquake member deformation demands in reinforced concrete frame structures", *Proceedings of the US-Japan Workshop on performance-based earthquake engineering methodology for RC building structure*.
11. Jan, T.S., Liu, M.W. and Kao, Y.C. (2004) "An upper-bound pushover analysis procedure for estimating the seismic demands of high-rise buildings", *Engineering Structures*, Vol. 26, pp.117-128.
12. Kunnath, S.K. (2004) "Identification of modal combination for nonlinear static analysis of building structures", *Computer-aided Civil Engineering*, Vol. 19, pp. 246-259.
13. Paret, T.F. Sasaki, K.K., Elibeck, D.H. and Freeman, S.A. (1996) "Approximate inelastic procedures to identify failure mechanism from higher mode effects", *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*.
14. Sasaki, K.K. Freeman, S.A. and Paret, T.F. (1998) "Multi-mode pushover procedure (MMP) – a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis", *Proceedings of the Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.
15. Moghadam, A.S. (2002) "A pushover procedure for tall buildings", *Proceedings of the twelfth European conference on earthquake engineering*.
16. Chopra, A.K. and Goel, R.K. (2002) "A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 561-582.
17. Shakeri, K. Shayanfar, M.A. and Moghadam, A.S. (2007) "An efficient method for optimum combination of modes required for pushover analysis", *Proceedings of the Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering*.
18. Hernandez-Montes, E. Kwon, O. S. and Aschheim, M.A. (2004) "An energy-based formulation for first-and multiple-mode nonlinear static (Pushover) analyses", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, pp. 69-88.
19. Gupta, B. and Kunnath, S.K. (2000) "Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures", *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 2, pp. 367-391.