

## ارزیابی آسیب پذیری و بهسازی لرزه ای پل ها به روش اجزای محدود براساس بارگذاری متمرکز و یکپارچه زلزله نورتریج

مهدی شادمند<sup>1\*</sup>، امید کهنه پوشی<sup>2</sup>

1- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج ، [Shadmand90@gmail.com](mailto:Shadmand90@gmail.com)

2- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، [Omidkohnepooshi@Gmail.com](mailto:Omidkohnepooshi@Gmail.com)

### چکیده

با توجه به واقع شدن ایران بر روی یکی از دو کمر بند زلزله خیز جهان و وجود گسل های فراوان، وقوع زلزله در فلات ایران امری طبیعی می باشد. ایران جزء ده کشور بلاخیز و ششمین کشور زلزله خیز دنیا است که زلزله سبب بیشترین تلفات انسانی در آن می باشد و کمر بند زلزله اکثر نقاط خاک کشور ما را دربر گرفته است. پلها به عنوان عناصر مهم و کلیدی در شبکه شریانی راه های کشور، نقش منحصر به فردی را به لحاظ اقتصادی، سیاسی و نظامی ایفا می کنند. طراحی و اجرای پل های بتنی در ایران، همانند دیگر کشورهای جهان، به دلیل نیاز به گسترش مسیرهای ارتباطی جاده ای افزایش یافته است. از آنجایی که این سازه ها طی عمر خود در معرض سیکل های تنش قرار دارند، می توانند دچار خرابی ناشی از خستگی گردند. از طرف دیگر به علت عدم قطعیت های موجود در بار و همچنین طراحی و اجرای سازه و با توجه به لرزه خیزی مناطق مختلف ایران، بررسی پل ها تحت زلزله های طراحی امری ضروری می باشد. همچنین موثرترین روش مطرح شده برای ارزیابی رفتار لرزه ای پلهای موجود، تحلیل دینامیکی صریح می باشد. به همین منظور در مقاله حاضر به ارزیابی آسیب پذیری و بهسازی لرزه ای پل ها به روش اجزای محدود براساس بارگذاری متمرکز و یکپارچه زلزله نورتریج پرداخته شده است و نتایج حاصل حاکی از آن است که اگرچه عمدتاً حداکثر پاسخ در زلزله مورد مطالعه تحت تحریک یکپارچه تکیه گاهی حاصل شده است اما نمی توان اظهار داشت که بارگذاری متمرکز از زلزله های دیگر یا به نحو دیگر، نتایج کمتری نسبت به تحریک یکپارچه نتیجه می دهد.

**واژه های کلیدی:** آسیب پذیری و بهسازی لرزه ای پل ها، اجزای محدود، زلزله نورتریج، تحلیل دینامیکی صریح، ABAQUS

### 1- مقدمه

ایران دارای بیش از 140 هزار کیلومتر شبکه راه و بزرگراه و 5 هزار کیلومتر خط راه آهن می باشد که در این بین پل های موجود در بزرگراه از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند. در گذشته بدلیل نامشخص بودن حرکت زمین برای بشر، در طراحی پل ها بسیاری از نکات لرزه ای در نظر گرفته نمی شد. با توجه به پیشرفت علم و دگرگونی آئین نامه ها و ضعف پل های قدیمی در برابر زلزله مقاوم سازی این سازه ها در کشور ما بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در سال های اخیر در کشور ما پیشرفت های چشمگیری در زمینه بهسازی لرزه ای ساختمانها صورت گرفته با این حال در زمینه سازه های زیر بنایی، همانند

پل ها که جزو حساس ترین و آسیب پذیرترین شریان های کشور هستند هنوز مجموعه کاملاً مدونی ارائه نشده است. تجربه حاصل از زلزله های دهه 90 میلادی در کشور آمریکا، ژاپن، ترکیه و فرو ریزش متعدد پلها نشان داد که لزوم ارزیابی آسیب پذیری و بهسازی لرزه ای این سازه ها در کشور ما باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد. با توجه به اینکه کشور ما روی کمر بند لرزه خیز آلپ - هیمالیا قرار دارد و این کمر بند از پتانسیل لرزه خیزی بالایی برخوردار است و همینطور برای بهره برداری بی وقفه از این راه های ارتباطی در زمان وقوع زلزله برای کمک رسانی، لزوم ارزیابی آسیب پذیر بودن این سازه ها در کشور ما امری مهم به شمار می آید.

ساختمان زمین شناسی فلات ایران و حواشی آن به سیستم کمر بند چین خورده دوران سوم زمین شناسی ارتباط دارد که از نظر ذخائر معدنی و اقتصادی یک عامل بالقوه و مثبت و از نظر تکان های لرزه خیزی یک عامل منفی می باشد [1]. کشور ما در قسمت میانی کمر بند کوه زایی آلپی می باشد و این حرکات هنوز به اتمام نرسیده و تعادل نهایی برقرار نشده است؛ لذا با توجه به موقعیت ایران و واقع شدن در بین دو قاره قدیمی و مقاوم یعنی اوراسیا در شمال، و آفریقا - عربستان در جنوب، پلاتفرمی تُرد و شکننده است و گسل های فعال و فراوان و زلزله های متعدد دلیل این مدعا است.

به طور کلی سه منطقه زلزله خیز در ایران وجود دارد که از آن جمله می توان به زاگرس، البرز و ایران مرکزی اشاره نمود. صفحه عربستان از جنوب غربی و هندوستان از شرق و جنوب شرقی و سیبری از شمال شرقی به ایران فشار وارد می کنند و مقاومت ایران در مقابل فشار های وارده منجر به بروز گسل ها و شکستگی های متعددی شده است و فعالیت این گسل ها باعث گردیده که ایران از مناطق مهم زلزله خیز دنیا محسوب شود. انرژی ناشی از فشار ها در مناطق گسلی ذخیره و پس از رها شدن به صورت امواج مخرب زلزله موجبات نابودی و تخریب شهرها را فراهم می سازد زلزله های ایران بیشتر به خاطر فعالیت همین گسل ها است. نتیجه نهایی آنکه چون ناهمواری های ایران جوان هستند و در قلب آثار آخرین کمر بند کوهزایی سیاره زمین (آلپی) واقع شده و در بین پلیت های تکتونیکی قرار گرفته است، بنا بر این از نظر زمین ساختی و در نتیجه حرکات لرزه ای آرام نگرفته و برای نیل به تعادل ایزوستازی خود هنوز فعال است [2].

## 2- روش های ارزیابی سازه پل ها براساس نسبت ظرفیت به تقاضا:

در این روش تقاضای لرزه ای از یک تحلیل طیفی ارتجاعی محاسبه می گردد. ظرفیت اجزا نیز بر اساس مقاومت قابل انتظار اجزا و یا براساس تغییر مکان آنها بدون اعمال ضرایب کاهش مقاومت محاسبه می گردد. در ستون های بتن مسلح و فنداسیون های متعارف که احتمال تسلیم خمشی قبل از آسیب دیدگی وجود دارد نسبت های  $C/D$  با استفاده از تقاضای لنگر ارتجاعی ضرب در شاخص های شکل پذیری جهت منظور نمودن تسلیم محاسبه می گردند. فرض بر آن است که تغییر مکان های ارتجاعی و غیر ارتجاعی برای یک بار زلزله مشخص بزرگی یکسانی دارند. لذا مقادیر واقعی تقاضای لنگر برابر است با تقاضای لنگر ارتجاعی تقسیم بر شاخص شکل پذیری. نتیجه آن است که نسبت  $C/D$  در حالت ارتجاعی با یک ضریب (همان شاخص شکل پذیری) افزایش داده می شود.

پاسخ ارتجاعی پل در برابر طیف ارتجاعی زمین لرزه باید به طور مستقل برای دو راستای متعامد طولی و جانبی پل لحاظ گردد. در نظر گرفتن اثر مؤلفه قائم زلزله نیز مطابق ضوابط فعلی صریحاً پیشنهاد نشده است. انتخاب روش تحلیل به معیار منظم یا نامنظم بودن پل که تابعی از تعداد دهانه ها و توزیع وزن و سختی می باشد، بستگی دارد. همچنین طبقه بندی لرزه ای پل ها بر اساس ضریب شتاب محل و درجه اهمیت پل ها می باشد. دستورالعمل مزبور (FHMA 1995) سه روش را جهت تحلیل ارتجاعی پل ها مدنظر قرار داده است [3 تا 10]:

## 2-1 - روش بار یکنواخت

این روش ماهیتاً روشی مبتنی بر تحلیل استاتیکی و اصطلاحاً به روش استاتیکی معادل موسوم است. این روش تنها در حالت پلهای منظم، مستوی و پلهای فاقد مفصل در میانه های دهانه هایشان قابلیت کاربرد است که توصیه میشود در حد مطالعات اولیه مورد استفاده قرار گیرد. این روش، برای پلهای دارای پایه های نسبتاً انعطاف پذیر مناسبتر از پلهای دارای پایه های سخت مانند پایه های دیواره ای شکل میباشد. در این روش عملاً سازه پیوسته فرض گردیده و نیروهای ناشی از زلزله در این روش به تمامی اعضای پل با توجه به نحوه اعمال و خواص مکانیکی و هندسی سازه و اعضا، توزیع میگردد. این روش مبتنی بر مود ارتعاش اساسی سازه در جهات عرضی یا طولی می باشد. در این روش، پیوند ارتعاش سازه معادل پیوند ارتعاش سیستم جرم و فنر تک درجه آزادی (معادل پاندول وارون) در نظر گرفته می شود. این روش اساس بارگذاری آثار ناشی از زلزله در پلهای منظم در مشخصات فنی AASHTO تا سال 1989 بوده است. این روش در هر دو امتداد طولی و عرضی و به ویژه در امتداد عرضی برای محاسبه نیروهای معادل استاتیکی و پاسخ استاتیکی پایه های میانی پلها تحت تأثیر مؤلفه عرضی زمینلرزه کاربرد داشته است.

## 2-2 - روش طیفی تک مودی:

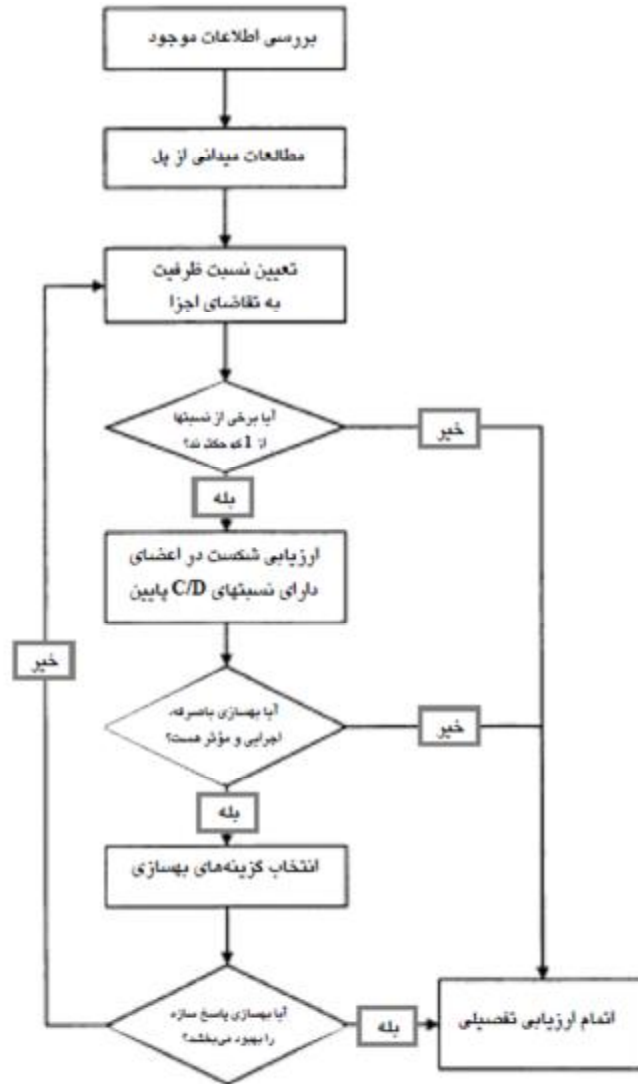
روش تک مودی طیفی بر این فرض استوار است که بارهای ناشی از زلزله را میتوان به صورت نیروی معادل استاتیکی افقی در امتداد عرضی یا طولی بر سازه پل منظور نمود. همچنین پاسخ سازه پل به زلزله عمدتاً مرتبط با مود اول ارتعاش میباشد. این امر در مورد پلهای منظم و دارای رفتار الاستیک، در حد کاربردی میتواند قابل پذیرش باشد ولی در مورد پلهای نامنظم با هندسه پیچیده، دهانه های با طول متفاوت، پایه های با سختی متفاوت، پلهای دارای قوس در پلان یا در ارتفاع و پل های دارای زاویه تورب، تقریب قابل ملاحظه ای ارائه میدهد و نمیتوان در این موارد کاربرد آن را قابل پذیرش تلقی نمود، زیرا در چنین پلهایی معمولاً برخی از مودهای دیگر ارتعاش سازه نیز در توزیع نیروها و نحوه پاسخ تغییرمکانی سازه دخالت قابل ملاحظه ای خواهند داشت.

## 2-3 - روش طیفی چند مودی:

همانطور که می دانیم پاسخ واقعی پل در خلال زمین لرزه سهمگین معمولاً از محدوده ارتجاعی فراتر خواهد رفت. پاسخ غیر ارتجاعی و یا غیر خطی سیستم ناشی از تسلیم اجزا نظیر ستونها، فنداسیونها و همچنین رفتار غیرخطی خاکریز کوله، درزهای انبساط و شمعها می باشد. اما به دلیل مشکلاتی که بر سر راه تحلیل های غیر ارتجاعی قرار دارد استفاده از این روش ها معمولاً اجباری نیست. استفاده از یک تحلیل ارتجاعی مبتنی بر اصول مکانیک سازه ها جهت شبیه سازی پاسخ واقعی سازه یک پل مبتنی بر این فرضیه است که تغییر مکانهای ارتجاعی و غیر ارتجاعی مقادیر مشابهی دارند. یکی از این دلایل این است که در مورد سیستم پل ها محل تسلیم شدن ستون تا حدودی قابل پیش بینی است. ناگفته نماند که اختلاف میان نتایج پاسخ ارتجاعی و غیر ارتجاعی برای اجزای منفرد سازه همانند مقید کننده های طولی، قابل ملاحظه و غیر قابل صرف نظر کردن است. روش آنالیز طیفی چند مودی، نسبت به روش آنالیز طیفی تک مودی، پیچیده تر بوده و روش موثری برای آنالیز پاسخ سازه های الاستیک خطی پیچیده تر، در مقابل تحریکات زلزله می باشد. این روش برای سازه های با هندسه، جرم و سختی نامنظم، مناسب می باشد.

نیروهای بدست آمده از یک تحلیل ارتجاعی تنها زمانی به واقعیت نزدیک هستند که جزء مورد نظر به تسلیم نرسد و رفتار غیر خطی از خود نشان ندهد. بر اساس دستورالعمل فوق در مناطق با لرزه خیزی بسیار بالا و برای پل های نامنظم ، استفاده از روش تحلیل طیفی چند مودی الزامی است. روند ارزیابی یک پل به روش ظرفیت به تقاضا در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1: روند ارزیابی یک پل با استفاده از روش ظرفیت به تقاضا



### 3- جزئیات مدل سازی المان محدود پل بتنی سه دهانه در نرم افزار Abaqus

#### 3-1- ایجاد هندسه مدل

مدلسازی و ایجاد هندسه مدل اولین گام در شبیه سازی مدل های سازه ای به کمک نرم افزار اجزای محدود Abaqus می باشد. برای این منظور می بایست از ماژول Part استفاده کرد. در این ماژول المان های سازه ای مورد نظر در یک مختصات محلی ساخته می شود و پس از آن در ماژول Assembly به یک مختصات کلی انتقال داده می شوند تا مدل نهایی بدست آید [11].

مدل های المان محدود سه بعدی مورد بررسی در این مطالعه شامل ستون، تیر، دال و میلگرد می باشند. تمامی این المان ها از نوع Deformable هستند. قطعات Deformable، قطعاتی می باشند که در این نرم افزار برای مدل کردن المان های شکل پذیر در فضاهای سه بعدی و دو بعدی مورد استفاده قرار می گیرد.

### 3-2- تعریف خصوصیات مصالح

برای اختصاص دادن مصالح از ماژول Property استفاده می گردد. در این ماژول مشخصات کامل مصالح مورد نظر با جزئیات دقیق تعریف خواهد شد و به قطعات ایجاد شده در ماژول Part اختصاص می یابند. از جمله مهم ترین کاربرد این ماژول می توان به موارد زیر اشاره نمود:

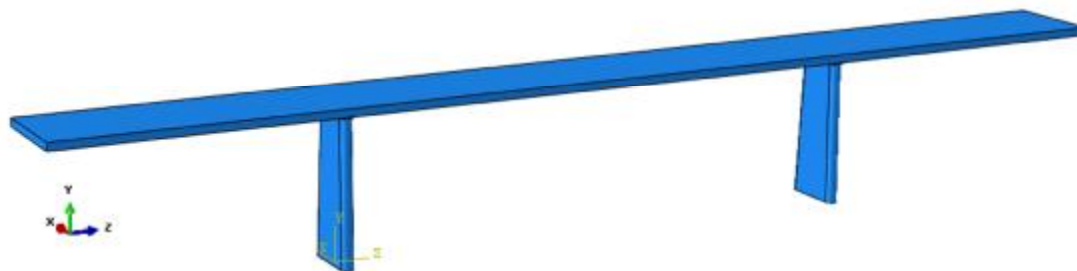
- ◆ تعریف مصالح
- ◆ تعیین پروفیل سطح مقطع تیر
- ◆ تعریف مقطع
- ◆ تعریف مشخصات لایه کامپوزیتی
- ◆ تعریف پوسته های تقویت کننده
- ◆ تعیین نیروهای اینرسی (جرم نقطه ای، اینرسی دورانی و ظرفیت حرارتی) روی یک قطعه
- ◆ تعریف انواع فنر و میراگر بین دو نقطه یا بین یک نقطه و یک پایه
- ◆ تعیین درجه بندی مصالح

در مدل های مورد نظر در این مطالعه از دو مصالح فولاد و بتن استفاده می گردد که در ادامه مشخصات مربوط به آنها به همراه نوع رفتاری که برای المان ها، در نظر گرفته شده است اشاره خواهد شد.

بتن مسلح یکی از پیچیده ترین مصالح برای مدلسازی در نرم افزارهای اجزاء محدود است. تعریف درست مصالح در مدلسازی اجزاء محدود در رفتار الاستیک و پلاستیک در قسمت های فشاری و کششی می تواند نقش تعیین کننده ای در جواب ها و خروجی ها داشته باشد. رفتار کاملاً فشاری باید شامل هر دو رفتار الاستیک و پلاستیک کامل بتن در نرم شدگی کرنشی آن باشد و همین طور در مورد کشش نیز باید خواص بتن در دو بعد الاستیک و پلاستیک که شامل نرم شدگی کششی، سخت شدگی کششی و اثر پیوستگی محلی است، تعریف شود. در نرم افزار Abaqus برای در نظر گرفتن خرابی مصالح سه نوع ترک خوردگی قابل مدلسازی است که باید در بخش خواص مصالح تعریف شود که در این مطالعه از مدلسازی ترک خوردگی Concrete damage plasticity استفاده شده است. این مدل دو فرض اصلی در مکانیزم گسیختگی را در نظر می گیرد که شامل ترک خوردگی کششی و خرد شدگی فشاری می باشد [11]. همچنین در مدلسازی عرشه از المان beam و برای میلگردهای آن نیز از المان truss استفاده شده است.

### 3-3- مونتاز و انتقال المان های ساخته شده به یک مختصات کلی

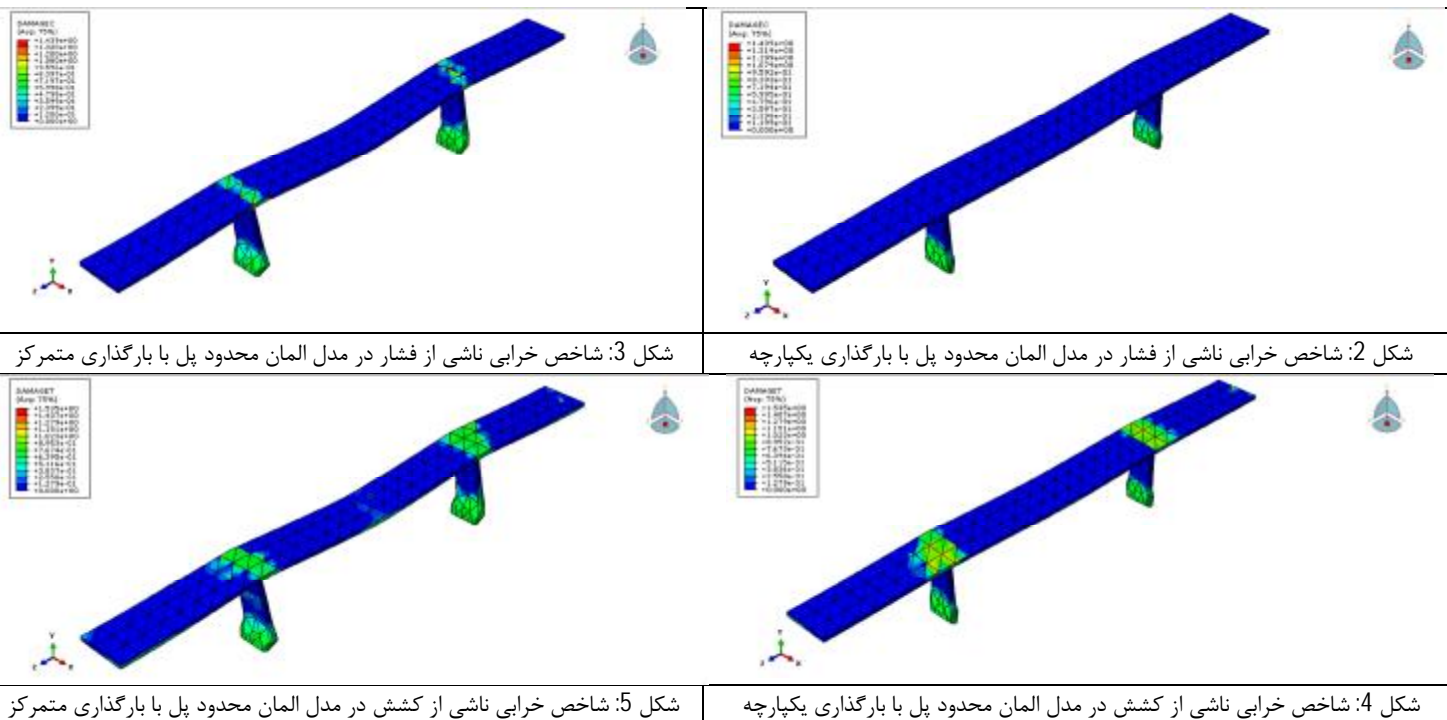
وقتی قطعه ای ساخته می شود، این قطعه در مختصات محلی می باشد و برای اینکه در مدل اصلی در کنار قطعات دیگر قرار گیرد لازم است کلیه قطعات از مختصات محلی به مختصات واحدی به نام مختصات کلی برود تا بتواند وارد عمل شده و شکل نهایی مدل را بسازند. شکل 1 مدل المان محدود سه بعدی پل سه دهانه را پس از مونتاز قطعات نشان می دهد.

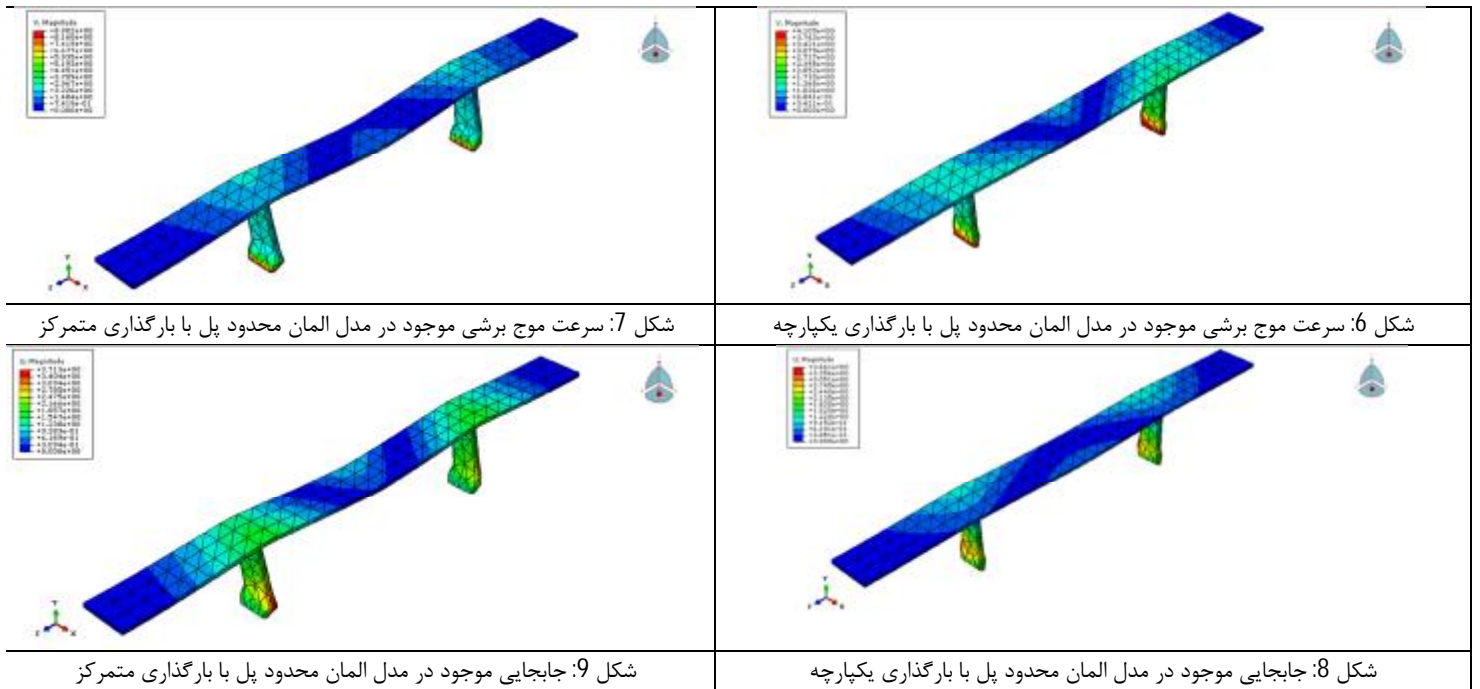


شکل 1: مدل المان محدود سه بعدی پل سه دهانه

#### 4- ارائه نتایج و خروجی های حاصل از تحلیل ها

پس از مدلسازی و تحلیل پل های مورد بررسی، نتایج حاصل از آنها در قالب اشکال شاخص خرابی ناشی از فشار، شاخص خرابی ناشی از کشش، سرعت موجود در المان، جابجایی موجود در المان و مولفه تنش در راستای قائم برای هر یک از مدل ها به صورت جداگانه در اشکال 2 تا 9 ارائه گردید.





## 5- نتایج حاصل:

- حداکثر پاسخ لرزه ای به ازای بارگذاری مطالعه شده (زلزله نورتریج) تحت تحریکات یکپارچه و متمرکز متفاوت می باشد.
- مقادیر بیشینه عمده پاسخ، تحت تحریکات یکپارچه و متمرکز تکیه گاهی، در زاویه برخورد یکسانی از امواج لرزه ای نتیجه نشده است.
- اگرچه عمدتاً حداکثر پاسخ در زلزله مورد مطالعه تحت تحریک یکپارچه تکیه گاهی حاصل شده است اما نمی توان اظهار داشت که بارگذاری متمرکز از زلزله های دیگر یا به نحو دیگر، نتایج کمتری نسبت به تحریک یکپارچه نتیجه می دهد.
- بر اساس نتایج ارائه شده در طراحی اینگونه سازه های انعطاف پذیر مطالعه تحریکات لرزه ای به صورت یکپارچه و متمرکز تکیه گاهی توصیه می گردد.

## مراجع

- [1] رضانی گورابی، ابعاد جغرافیایی زلزله 31 خرداد 1369 گیلان، مجموعه مقالات هشتمین کنگره جغرافیادانان ایران، جلد اول (طبیعی)، انتشارات دانشگاه اصفهان، 1373.
- [2] زمردیان، محمد جعفر، ژئومورفولوژی ایران، جلد اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، 1381.
- [3] FHWA. (1995). "Seismic retrofitting manual for highway bridges." FHWA-RD-95-052., Mclean: office of Engineering and Highway operations R and D, 16 ed.
- [4] AASHTO (2012) LRFD Bridge Design Specification American Association of State Highway & Transportation Officials 6th Edition Washington D.C.

- [5] معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، "آیین نامه بارگذاری پل ها" - نشریه شماره 139- معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، ویرایش دوم. (1384)
- [6] توکلی، ش.، حائری، م.، رمزی، ح.، عشقی، س. و مقدم، ح. (1370) " گزارش تحلیلی شماره 1 زلزله 31 خرداد 1369 منجیل - رودبار ( ایران ) "، شماره 1-91-70، موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران
- [7] معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی " دستورالعمل طراحی پل های فولادی " - نشریه شماره 395 - دفتر نظام فنی و اجرایی، ( 1386 )
- [8] علی اکبر معین فر، عباس مهدویان، و ابراهیم مالکی (1373)، "مجموعه اطلاعات پایه زلزله های ایران"، مؤسسه نمایشگاههای فرهنگی ایران.
- [9] سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور "دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود" - نشریه شماره 360، دفتر امور فنی و تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، 1385.
- [10] طاحونی، ش. (1390) " طراحی پل " انتشارات دانشگاه تهران
- [11] ABAQUS theory manual. Pawtucket, R.I: Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.; Version 6.11, 2011.