بررسی رفتار پل های مورب دارای سیستم جداسازی لرزه ای در برابر زلزله های افقی و قائم

علیرضاگل تبار روشن
استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران
alirezagoltabar@gmail.com

افشین رضوی فر
کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، چالوس، ایران
afshinrazavifar@gmail.com

صادق سام دلیری
کارشناس ارشد زلزله ، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ، چالوس، ایران
mohamadsam0055@yahoo.com

کلید واژه‌ها: *پل، جداسازی پایه، زلزله، افقی، قائم*

چکیده

امروزه به دلیل محدودیت روزافزون فضا و صرفه جویی های اقتصادی برای جلوگیری از طولانی تر شدن مسیر و افزایش ایمنی راه استفاده از پل های مورب اجتناب ناپذیر است. موضوع مورب بودن پل باعث ایجاد رفتار متفاوت و بعضاً پیچیده در پل تحت اثر نیروهای وارد برآن خواهد شد. در این تحقیق اثر همزمان مورب بودن پل و استفاده از جداساز لرزه ای هسته سربی، در پاسخ لرزه ای پل ها مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج نشان می‌دهد استفاده از جداساز لرزه ای در پل های مورب می‌تواند بسیار مفید باشد و اثر فزاینده پاسخ لرزه ای پل های مورب را کاهش می‌دهد. به عبارتی دیگر تاثیر جداساز در کاهش پاسخ های لرزه ای پل های مورب به مراتب بیشتر از پل های غیر مورب می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد در نظر گرفتن مؤلفه قائم درتحلیل پل های مورب و نامنظمی‌که دارای دهانه قابل ملاحظه می‌باشند، می‌تواند باعث افزایش پاسخ لرزه ای چنین پل هایی شود که استفاده از جداساز توانسته است از این افزایش تا حدود زیادی بکاهد.

مقدمه

امروزه به دلیلتوسعه ارتباطات و لزوم استفاده بهینه از فضاهای شهری و همچنین محدودیتهای هندسی در هنگام عبور از عوارض طبیعی سبب گردیده است که پلهای مورب بخش مهمی‌از سیستم حمل و نقل شهری و بین شهری را تشکیل دهند. در حقیقت پلهای مورب در زمین لرزه‌های گذشته تحت اثر بارهای لرزه ای آسیب پذیرتر از پلهای مستقیم بوده اند (پورنداف، ۱۳۸۸).

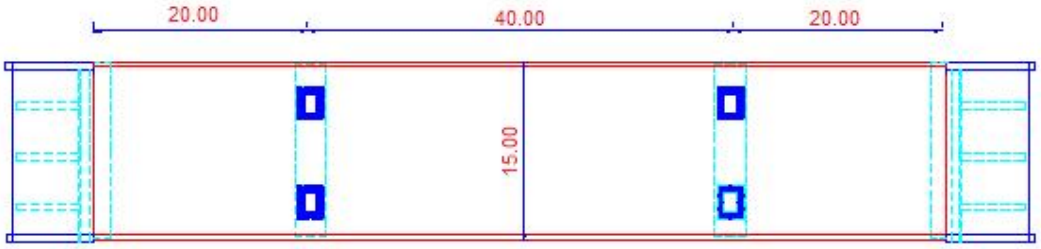
توانایی و مزایای جداگرهای لرزه ای بعنوان ابزار کنترل غیرفعال نیروهای زلزله که به طراحان اجازه می‌دهد نیروهای زلزله وارد بر پایه ها و کوله‌های پل را کاهش داده و یا متعادل کنند، به خوبی به اثبات رسیده است. با توجه به انواع خسارت های وارد بر پلها در زلزله های گذشته که بواسطه تخمین نادرست نیروهای زلزله می‌باشد، با استفاده از جداگرها می‌توان به نحو موثری در بهسازی پل های موجود و یا طراحی پل های جدید واقع در نواحی لرزه خیز بهره برد (زهرایی و همکاران، ۱۳۸۵). در این تحقیق اثر همزمان مورب بودن پل و استفاده از جداساز لرزه ای هسته سربی(LRB)، در پاسخ لرزه ای پل ها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در این مقاله یکی از پلهای غیرمورب که در شهرستان چالوس براساس ضوابط لرزه ای آشتو(AASHTO,1999) طراحی شده است به عنوان پل نمونه انتخاب شده است. به منظور بررسی تاثیر زاویه تورب در پل های مورب، با ثابت نگه داشتن طول و عرض و مقاطع پل، مدل های پل در زوایای تورب ۰ تا ۵۰ درجه (با رشد ۱۰ درجه)به کمک نرم افزار SAP2000V14.2.2 مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی قرار گرفته و پاسخ لرزه ای پلها ارزیابی شده است.

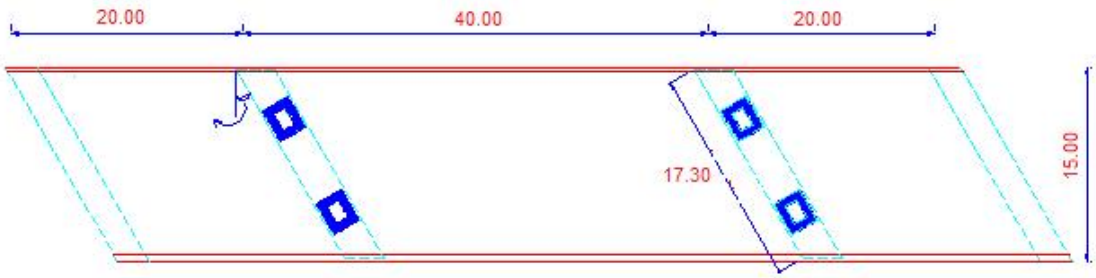
مشخصات سازه ای

پل مورد بررسی دارای ۳ دهانه به طول های ۲۰ ،۴۰ و ۲۰ متر می‌باشد که روسازه پل از ۷ تیرورق فولادی تشکیل شده است. ضخامت دال عرشه ۲۲ ساتیمترمی‌باشد. عرشه پل به صورت پیوسته اجرا شده است. پلان پل غیرمورب و پل مورب با زاویه تورب ۳۰ درجه به صورت شماتیک به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است. طبق نقشه های اجرایی، سایر مشخصات پلهای بررسی شده عبارتند از:

۱- سیستم سازه ای پل : عرشه (پیوسته)فولادی ، پایه بتنی
۲- عرض پل : ۱۵ متر
۳- فاصله میان شاه تیرها : ۲/۲۰ متر
۴- ارتفاع شاه تیرها : ۲/۰۰ متر
۵- نوع کوله ها : بسته با دیوار برگشتی (بدلیل سختی زیاد، کوله ها در مدلسازی صلب فرض شده اند)
۶- نوع پایه ها : بتن مسلح با مقطع مستطیل (مقطع ستون ۲/۲۰ در ۲/۷۰ مترمربع می‌باشد که فضای ۱/۰۰ در ۱/۲۰ مترمربع در داخل آن با یونولیت پر شده است).
۷- تعداد پایه ها در قاب عرضی : ۲ عدد
۸- ارتفاع پایه ها : ۱۲ متر



شکل ۱ :پلان پل غیر مورب به همراه دیوار های پشت بند در کوله ها



شکل ۱: پلان پل مورب با زاویه تورب ۳۰ درجه

مشخصات مصالح

۱- تمامی‌میله گرد های مسلح کننده مورد استفاده در طراحی پل از نوع A3 و تنش تسلیممیله گردها $fy= ۴۰۰۰ kg/cm^2$ می‌باشد.
۲- برای طراحی فونداسیون،ستون هاو تیر سرستون از بتن با مقاوت فشاری $fc=۲۵۰ kg/cm^2$و برای طراحی دال از بتن با مقاومت فشاری $fc=۲۱۰ kg/cm^2$ استفاده شده است.

انتخاب روش تحلیل

با توجه به تعریف پل های نامنظم در آیین نامه طرح پلهای راه و راه آهن در برابر زلزله، پل مذکور جزو پلهای نامنظم (نسبت طول دهانه‌های متوالی بزرگتر و یا مساوی۲) تقسم بندیمی‌شود. همچنینآیین نامه بهسازی لرزه ای پل ها، در مورد انتخاب روش تحلیل،در مورد پلهای نامنظم دارای دهانه های قابل ملاحظه، روش تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی را مناسب دانسته است (نشریه۵۱۱، ۱۳۹۰) . در این تحقیق پل های مورب به روش تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی به صورت تحریک دو جهته (با اعمال همزمان شتابنگاشت های افقی هر زلزله) و تحریک سه جهته (با اعمال همزمان شتابنگاشت های افقی و قائم هر زلزله)مورد ارزیابی قرار گرفته اند.

مشخصات مدل ها

پلهای مورد مطالعه به صورت سه بعدی به کمک نرم افزارSAP2000V14.2.2 با زوایای تورب ۰ تا ۵۰ درجه (با رشد ۱۰ درجه) یکبار بدون جداساز و بار دیگر با جداساز لرزه ای هسته سربی، (در مجموع ۱۲ حالت پل) مدل شده اند. مشخصات جداساز و همچنین پارامتر های تحلیلی آن که در پل های مورب جداسازی شده استفاده شده است به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. جزئیات المان های بکار رفته در مدل به شرح زیر می‌باشد:

۱- جهت مدلسازی شاه تیر های فولادی، تیر سرستون، پایه ها و دیافراگم های پل از المانFRAME استفاده شده است.
۲- دال بتنی پل با استفاده از المان پوسته ایSHELL مدلسازی شده است.
۳- جداگرهای لرزه ای هسته سربی با استفاده از المان غیرخطیNLLINK و با لحاظ نمودن مشخصات جداگرها، مدلسازی شده اند.

جدول۱:مشخصات جداساز لاستیکی هسته سربی(زهرایی و همکاران، ۱۳۸۵)

وزن	۲/۵ کیلونیوتن
ابعاد	۰/۴ در ۰/۳ در ۰/۳ متر
تعداد	۲۸

جدول۲ : پارامترهای جداساز لاستیکی هسته سربی(زهرایی و همکاران، ۱۳۸۵)

درجه آزادی	سختی مؤثر در حالت خطی (KN/m) یا (KN.rad/m)	سختی اولیه در حالت غیر خطی (KN/m)	مقاومت جاری شدن (KN)	نسبتسختیپس از جاری شدن
U1	۲۰۰۰۰	-	-	-
U2	۸۰۰	۸۰۰	۴۰	۰/۱
U3	۸۰۰	۸۰۰	۴۰	۰/۱
R1	۲۰۰۰۰	-	-	-
R2	۲۰۰۰	-	-	-
R3	۲۰۰۰	-	-	-

اختصاص مفاصل پلاستیک به پل های بدون جداساز

براساس جداول تعریف شده(FEMA356(Nov 2000، مفاصل پلاستیک در نرم افزارSAP2000V14.2.2 به پایه پل های بدون جداساز اختصاص داده شده است. در مورد پل های جداسازی شده به دلیلبکارگیری جداسازهای لاستیکی هسته سربی (LRB) انتظار می‌رود که زیرسازه پل ها در مرحله خطی باقی مانده و وارد مرحله غیرخطی نشوند. بنابراین در مدلسازی این پلها تنها المان غیر خطی، جداساز های بکار رفته می‌باشند.

انتخاب شتاب نگاشت ها و هم پایه کردن آن ها

در این تحقیق از سه شتاب نگاشت زلزله های طبس، منجیل و السنترو جهت انجام آنالیز دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی استفاده گردید. نحوه مقیاس کردن بدین صورت است که برای هر زلزله، طیف پاسخ با ۵ درصد میرایی مؤلفه های افقی آن تهیه می‌شود. سپس طیف SRSS برای آن زلزله با گرفتن جذر مجموع مربعات طیف‌های دو مؤلفه افقی عمود بر هم ساخته می‌شود. سپس یک طیف با متوسط گیری از طیف‌های SRSS همه زلزله های مستقل تشکیل داده می‌شود. این طیف به گونه ای مقیاسمی‌شود که در محدوده۰/۲T تا۱/۵T از ۱/۴ برابر طیف پایه طرح با میرایی ۵ درصد (مطابق آیین نامه ۲۸۰۰و با توجه به ساختگاه سازه که در خاک نوع دومی‌باشد) کمتر نشود. بنابراین با فرض T برابر ۱/۲۵ ثانیه که میانگین دوره تناوب پلهای مورب جداسازی شده می‌باشد، طیف میانگین مقیاس شده است. مشخصات شتاب نگاشت های افقی و ضریب مقیاسافقی در جدول ۳ نشان داده شده است.

در پل‌های بدون جداساز نیز شتابنگاشت‌های مورد استفاده برابر همان شتابنگاشت های مقیاس شده جداسازی شده می‌باشد؛ علت کار این است که اگرچه روش مقیاس کردن شتابنگاشت در حالت جداسازی نشده، طبق آیین‌نامه آشتو اندکی با حالت جداسازی شده متفاوت می‌باشد، ولی چون در اینجا هدف مقایسه نتایج بوده و قصد طراحی پل وجود نداشته همان شتابنگاشت‌های حالت جداسازی شده به پل‌های جداسازی نشده اعمال شده است(زهرایی و همکاران، ۱۳۸۵). لازم به ذکر است که میانگین دوره تناوب مد اول پل های مورب بدون جداساز، ۰/۲۳ ثانیه می‌باشد.

جدول۳: مشخصات شتاب نگاشت افقی و ضریب مقیاس بدست آمده

نوع زلزله		طبس	منجیل	السنترو
PGA (g)مقیاسنشده مولفه های افقی	طولی	۰/۳۲۸	۰/۵۱۵	۰/۳۱۳
	عرضی	۰/۴۰۶	۰/۴۹۶	۰/۲۱۵
ضریب مقیاسافقی		۱/۷۵		

به منظور بدست آوردن ضریب مقیاس مؤلفه های قائم، ابتدا برای هر زلزله، طیف پاسخ با ۵ درصد میرایی مؤلفه قائم آن تهیه شد و باتوجه به اینکه زلزله‌های انتخابی از زلزله های دور از گسل انتخاب شده اند، به همین دلیل طیف طرح قائم از ضرب طیف طرح افقی در ضریب ۲/۳ (۰/۶۷) بدست آمده است و طیف پاسخ میانگین مولفه های قائم زلزله با طیف طرح قائم مقایسه شده است و عدد مقیاس طوری بدست آمده است که در محدوده فرکانسی مهم، طیف پاسخ از طیف طرح قائم کمتر نشود(کمالی صالح آباد، اسلاجقه، ۱۳۸۷).

جدول۴:مشخصات شتاب نگاشت قائم و ضریب مقیاس بدست آمده

نوع زلزله	طبس	منجیل	السنترو
PGA (g) مقیاس نشده مولفه هایقائم	۰/۱۸۳	۰/۵۳۸	۰/۱۱
ضریب مقیاس قائم	۱/۳		

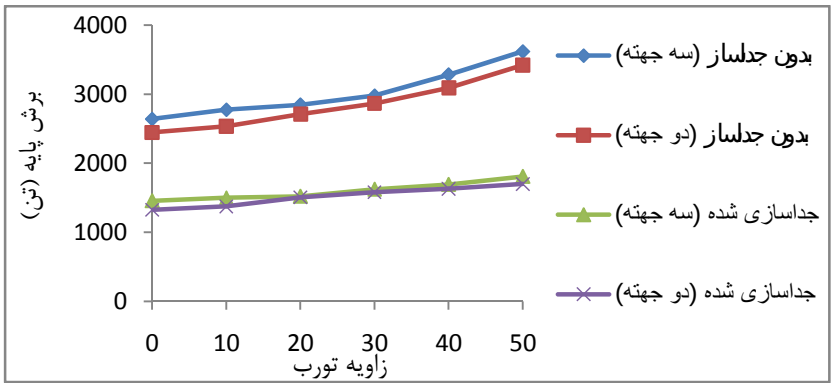
نتایج حاصل از تحلیل پل ها

پس از انجام تحلیل تاریخچه زمانی پل های مورب، بیشترین پاسخ لرزه ای پل های جداسازی شده و بدون جداساز در دو حالت تحریک دو جهته (مولفه های افقی) و تحریک سه جهته (مولفه های افقی و قائم)، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است و پاسخ‌های لرزه‌ای از قبیل بیشترین برش پایه و بیشترین برش در کوله ها در جهات طولی و عرضی پل ها، بیشترین پیچش پای ستون ها و بیشترین نیروی محوری ستون‌ها، مقایسه شده است. لازم به ذکر است که منظور از جهات طولی و عرضی به ترتیب جهات موازی و عمود بر محور راه می‌باشد.

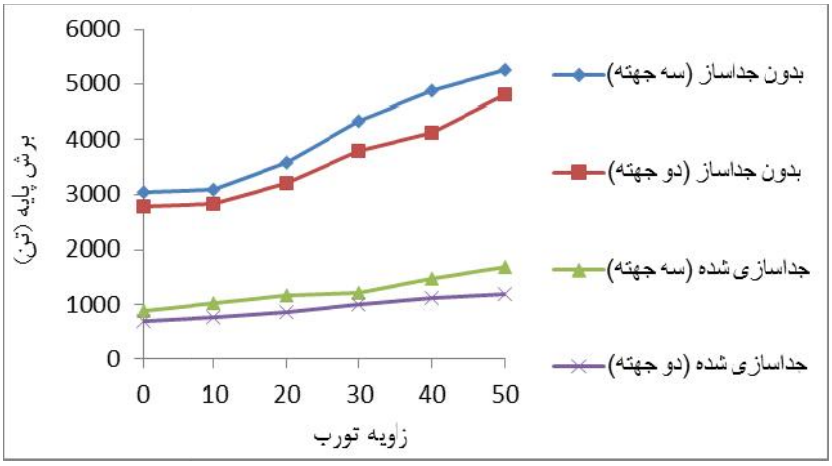
به منظور مقایسه نتایج، بیشترین پاسخ لرزه ای برای سه زلزله میانگین گرفته شد و سپس دو حالت تحریک مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.در حقیقت زمانیمی‌توان در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، از بیشترین پاسخ های لرزه ای میانگین گیری کرد که از تعداد هفت رکورد زلزله برای تحلیل استفاده شود و زمانی که از سه رکورد زلزله استفاده می‌شود بیشترین پاسخ از میان پاسخ‌های سه زلزله ملاک قرار می‌گیرد (والامنش،استکانچی، ۱۳۸۷). ولی به دلیل اینکه هدف در اینجا صرفا مقایسه دو حالت تحریکمی‌باشد و قصد طراحی وجود ندارد، از میانگین بیشترین پاسخ ها برای مقایسه دو حالت تحریک، استفاده شده است.

مقایسه بیشترین برش پایه

نتایج تحلیل ها در شکل های ۱ و ۲ نشان می‌دهد بیشترین برش پایه در حالت جداسازی شده نسبت به حالت بدون جداساز کاهش چشمگیری داشته است.در هر دو حالت جداسازی شده و بدون جداساز با افزایش زاویه تورب از ۰ تا ۵۰ درجه مقدار برش پایه در جهت طولی (موازی محور راه) و جهت عرضی (عمود بر محور راه) رو به افزایشمی‌باشد. شیب این افزایش در حالت بدون جداساز نسبت به حالت جداسازی شده بیشتر می‌باشد با اضافه شدن مؤلفه قائم، بیشترین برش پایه کمی‌افزایش پیدا کرده است که می‌توان گفت این افزایش در حالت جداسازی شده تقریبا ناچیز بوده است. همچنین همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در زوایای تورب بالاتر اختلاف برش پایه جهت عرضی در دو حالت تحریک دو جهته و سه جهته رو به افزایش است.



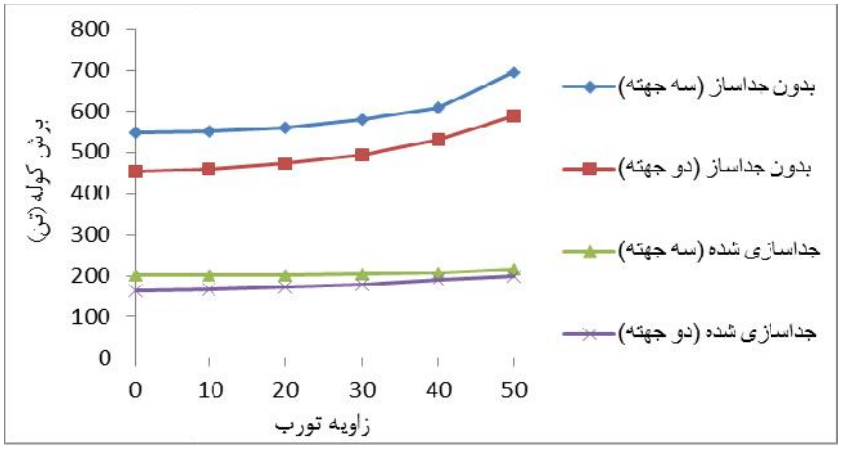
شکل ۱: نمودار مقایسه بیشترین برش پایه جهت طولی در دو حالت تحریک دو جهته و سه جهته



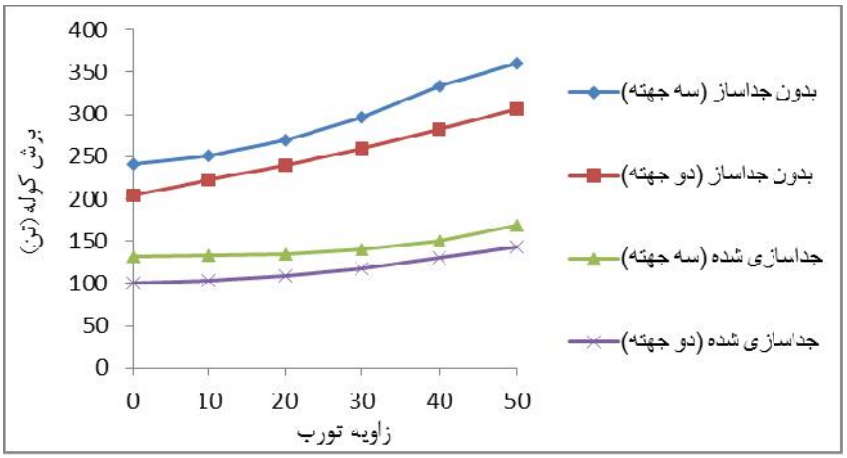
شکل ۲ نمودار مقایسه بیشترین برش پایه جهت عرضی در دو حالت تحریک*دو جهته و سه جهته*

مقایسه بیشترین برش کوله

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد با افزایش زاویه تورب، روند افزایش بیشترین برش کوله در پل های مورب بدون جداساز، در حالت تحریک سه جهته تقریبا مشابه تحریک دو جهتهمی‌باشد. همانطور که در شکل‌های۳ و ۴ مشاهده می‌شود با اضافه شدن مؤلفه قائم بیشترین برش کوله افزایش پیدا کرده است که این افزایش در حالت جداسازی شده نسبت به حالت بدون جداساز کمتر بوده است و این موضوع نشان می‌دهد استفاده از جداساز می‌تواند از تاثیر افزایش برش کوله که بدلیل اضافه شدن مؤلفه قائم می‌باشد، تا حدود زیادی بکاهد.



شکل۳:نمودار مقایسه بیشترین برش کوله جهت طولی در دو حالت تحریک دو جهته و سه جهته

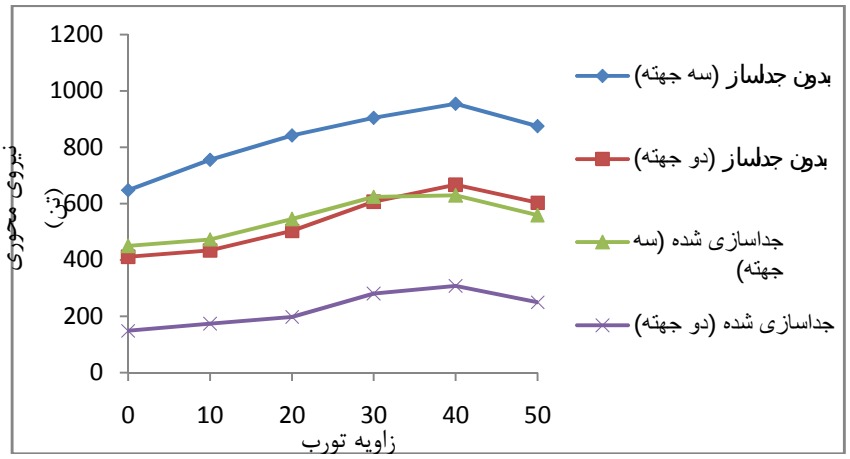


شکل۴:نمودار مقایسه بیشترین برش کوله جهت عرضی در دو حالت تحریک دو جهته و سه جهته

مقایسه بیشترین نیروی محوری ستون

نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که با اعمال جداساز در پل، نیروی محوری ستون نسبت به پل های بدون جداساز کاهش پیدا کرده است. همچنین همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش زاویه تورب پل از ۰ تا ۴۰ درجه، اختلاف در نیروی محوری ستون در حالت جداسازی و بدون جداساز رو به افزایش است.همچنین در هر دو حالت جداسازی شده و بدون جداساز، با افزایش زاویه تورب پل، نیروی محوری ستون تا زاویه ۴۰ درجه رو به افزایش است و بعد از آن کاهش می‌یابد. که به نظر می‌رسد زاویه بحرانی برای بیشترین نیروی محوری در پل های مورب، زاویه تورب ۴۰ درجه می‌باشد.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با اضافه شدن مؤلفه قائم، در حالت بدون جداساز، بیشترین نیروی محوری ستون افزایش قابل ملاحظه ای داشته است. همچنینمی‌توان گفت با افزایش زاویه تورب نیروی محوری پل های بدون جداساز (در هر دو حالت تحریک) نسبت به پل‌های جداسازی شده، با شیب بیشتری رو به افزایشمی‌باشد.

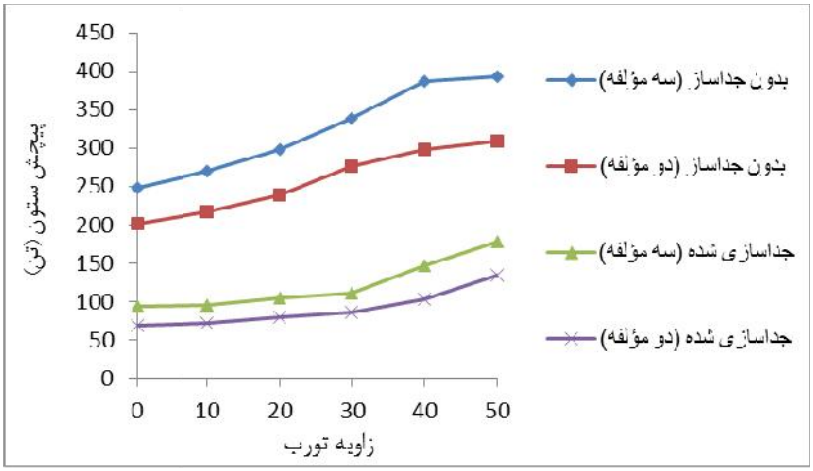


شکل۵:نمودار مقایسه بیشترین نیروی محوری ستون در دو حالت تحریک دو جهته و سه جهته

مقایسه بیشترین پیچش پای ستون

نتایج تحلیل ها در شکل ۶ نشان می‌دهد بیشترین پیچش پای ستون در حالت جداسازی شده نسبت به حالت بدون جداساز کاهش چشمگیری داشته است. در هر دو حالت جداسازی شده و بدون جداساز با افزایش زاویه تورب از ۰ تا ۵۰ درجه (با رشد ۱۰ درجه) مقدار پیچش پای ستون رو به افزایشمی‌باشد.همچنین در حالت پل های بدون جداساز در زوایای تورب پایین نیز پیچش پای ستون افزایش قابل ملاحظه ای داشته است این در صورتی است که در پل های جداسازی شده (در هر دو حالت تحریک) در زوایای تورب ۰ تا ۳۰ درجه، پیچش پای ستون افزایش چندانی نداشته است و تاثیر تورب پل در افزایش پیچش بعد از زاویه ۳۰ درجه می‌باشد.

تاثیر اضافه شدن مؤلفه قائم بر بیشترین پیچش پای ستون در پل‌های مورب دارای جداساز لرزه ای به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از پل‌های بدون جداساز می‌باشد.



شکل۶:نمودار مقایسه بیشترین پیچش پای ستون در دو حالت تحریک دو جهته و سه جهته

نتیجه گیری

با مرور بررسی مطالب ارائه شده در این مقاله، در مورد پل های مورب نتایج زیر را می‌توان خاطر نشان کرد :

۱- در پل های مورب با افزایش زاویه تورب (کجی)، پاسخ های لرزه ای این گونه پل ها عموما رو به افزایش می‌باشد.

۲- در پل های مورب بدون جداساز در زوایای تورب کمتر از ۳۰ درجه نیز شاهد افزایش برخی پاسخ های لرزه ای مانند برش پایه، بیشترین پیچش پای ستون، و ... بوده ایم که با استفاده از جداساز لرزه ای در پل های با زوایای تورب کمتر از ۳۰ درجه، این افزایش را تقریبا می‌توان ناچیز فرض کرد.

۳- برش پایه جهت طولی در پل‌های مورب جداسازی شده (نسبت به حالت جداسازی شده)، بدلیل سختی کم (ارتفاع زیاد ستون) نسبت به برش پایه جهت جانبی، کاهش کمتری داشته است. درحالیکه برش پایه جهت جانبی کاهش چشمگیری داشته است.

۴- اختلاف پاسخ های لرزه ای مانند برش پایه، پیچش پای ستون و بخصوص بیشترین نیروی محوری ستون ها، در دو حالت تحریک دو جهته و سه جهته در پل های مورب بدون جداساز بیشتر از پل های مورب دارای جداساز می‌باشد، به عبارت دیگر سیستم جداسازی توانسته است از اثرات نامطلوب مؤلفه قائم در افزایشبرخی از پاسخ های لرزه ای، بکاهد.

مراجع

پورنداف م (۱۳۸۸) رفتار لرزه‌ای پل های مورب دو دهانه بتنی، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشگاه زلزله شناسی و مهندسی زلزله

زهرائی س م، انوار س ا و طباطبایی م (۱۳۸۵) آشنایی با جداساز های لرزه ای و تاثیر آن‌ها بر عملکرد پل ها ، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری پژوهشکده حمل و نقل، دانشگاه تهران

کمالی صالح آباد، رضا. اسلاجقه، عیسی، (۱۳۸۷)، محاسبه و رسم طیف بازتاب قائم، *چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران*، اردیبهشت

نشریه ۵۱۱ (۱۳۹۰) راهنمای بهسازی لرزه ای پل ها، معاونت نظارت راهبردی دفتر نظام فنی اجرایی

- والامنش و و استکانچی ه (۱۳۸۷) بررسی ضوابط تحلیل لرزه‌ای چند جهته سازه‌ها، *مجله مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی*، سال اول،شماره سوم

American Association of State Highway and Transportation Officials (1999)AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition, Division I-A: Seismic Design.

FEMA 356 (Nov 2000)Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings,FederalEmergency Management Agency,Washington D.C