

بررسی توزیع فضایی زلزله بر منحنی‌های شکنندگی اجزای پل‌های بزرگراهی با نشیمن مورب در حوزه دور و نزدیک زلزله

حمیدرضا نوری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله،
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین
محمد مهدی معمارپور*، استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین
منصور یخچالیان، استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

Email: memarpour@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۲/۱۳ - پذیرش: ۹۶/۰۶/۱۹

چکیده

در این مطالعه، اثر عدم قطعیت زاویه برخورد زلزله به سازه در افزایش تقاضای مهندسی اجزای پل‌های بزرگراهی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، تحلیل‌های دینامیک غیرخطی با استفاده از ۸۰ شتاب‌نگاشت (۴۰ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک و ۴۰ شتاب‌نگاشت حوزه دور) در ۱۲ جهت مختلف (از صفر تا ۱۸۰ درجه) بر مدل‌های عددی پل‌های با نشیمن مورب^۱ (از صفر تا ۶۰ درجه) انجام گرفت. اجزای منحنی‌های شکنندگی به‌دست‌آمد و پاسخ فوق با نتایج تحلیل با اعمال زلزله در راستاهای اصلی مقایسه گردید. میزان اختلاف تا ۶۵٪ مشاهده شد. همچنین، با استفاده از دوران محورهای دریافت پاسخ، تقاضای ایجاد شده در راستاهای مختلف صفحه (از صفر تا ۳۶۰ درجه) محاسبه شد تا اثر دوران محور دریافت پاسخ بر پاسخ پل بررسی گردد. نتایج نشان داد که بین شدت‌های نظیر زلزله در احتمال خرابی ۵۰٪ در ستون پل، در حالتی که زلزله در راستاهای مختلف به سازه اعمال شود و محور دریافت پاسخ برای ثبت بیشینه پاسخ دوران داده شود، با حالتی که راستای اعمال زلزله و ثبت تقاضا منطبق بر محورهای طولی و عرضی پل باشد، ۳۹٪ اختلاف وجود دارد. همچنین، این اختلاف، با افزایش زاویه نشیمن مورب پل رابطه مستقیم دارد.

واژه‌های کلیدی: رفتار لرزه‌ای پل، زاویه برخورد، نشیمن مورب، منحنی شکنندگی.

¹ - Skewed bridges

۱. مقدمه

در مطالعات مربوط به رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، توزیع فضایی زلزله برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای و ثبت پارامترهای تقاضای سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه یک رویداد لرزه‌ای ممکن است در تمام درجات آزادی سازه را تحریک نماید، با این‌حال، در رویه فعلی تحلیل و طراحی، اثر اعمال زلزله در دو راستای افقی و یک راستای قائم رواج بیشتری دارد. سؤالی که در مورد این رویه مطرح می‌شود این است که آیا مؤلفه‌های پاسخ حرکت زمین یک زلزله در زوایای مختلف، تقاضای یکسانی را در اجزای مختلف پل ایجاد می‌کنند؟ همچنین، آیا تمامی پارامترهای تقاضای مهندسی پل بیشترین مقدار محتمل را در راستای محور طولی و عمود بر آن اختیار می‌کنند؟ در این مطالعه، تلاش شده است تا با پاسخ به سؤالات مطرح شده، به اهمیت زاویه برخورد زلزله و راستای دریافت پاسخ از سازه در منحنی‌های شکنندگی اجزای پل‌های با نشیمن مورب پرداخته شود.

در بین مطالعات لرزه‌ای پل‌ها در ادبیات فنی، پل‌های با نشیمن مورب تیر سرستون و کوله، به دلیل وجود نوعی نامنظمی هندسی، مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. در سال ۱۹۷۴، نوعی مدل‌سازی مبتنی بر مدل‌سازی هندسه عرشه و ستون‌های پل‌های با نشیمن مورب به صورت قاب توسط محققین انجام شد. نتیجه این تحقیق نشان داد که خرابی پل به وسیله حرکات هم‌زمان خمشی-پیچشی عرشه و یا افزایش بیش از حد نیروهای محوری فشاری ستون روی می‌دهد (غباراه و تسو، ۱۹۷۳). مدل‌سازی عناصر پل با استفاده از نوعی مدل رفتاری ساده‌شده برای تیرها، نشان داد که زاویه کوله پل و ضربه بین عرشه و کوله، پاسخ پل‌های با نشیمن مورب را به طور جدی تحت تأثیر قرار می‌دهد (ماراگاکیس و جنینگ، ۱۹۸۷). همچنین، محققین دریافتند که اتصال عرشه به کوله به صورت صلب،

موجب می‌شود پاسخ دینامیک پل به جای دوران عرشه، تحت تأثیر تغییر شکل‌های خمشی و پیچشی باشد (ویکفیلد و همکاران، ۱۹۹۱). در مطالعه‌ای دیگر، رفتار لرزه‌ای یک پل با عرشه جعبه‌ای و دارای نشیمن مورب با ملاحظات اثر انعطاف روسازه و شرایط مرزی اتصال پل به تکیه‌گاه‌ها مورد مطالعه قرار داده شد. نتیجه این مطالعه نشان داد که پاسخ لرزه‌ای پل به شدت به نحوه اتصال ستون به تکیه‌گاه و همچنین زاویه نشیمن پل وابسته است (منگ و لویی، ۲۰۰۰). در مطالعاتی مشابه، با اصلاح مدل عرشه پل، مشخص شد که دوران عرشه در پل‌های با زاویه نشیمن عمدتاً به رفتار اجزا در کوله بستگی دارد (منگ و لویی، ۲۰۰۲). در سال ۲۰۰۸، محققین با استفاده از تحلیل غیرخطی استاتیک، پاسخ لرزه‌ای پل سه دهانه بتنی با عرشه جعبه‌ای و با نشیمن مورب بین صفر تا ۶۰ درجه را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از مدل‌های همراه جزئیات و مدل‌های ساده‌سازی شده، مطالعات خود را انجام دادند و نتیجه گرفتند که در مدل‌های ساده‌سازی شده، امکان ثبت پاسخ پیچشی-جانبی برای پل‌های با نشیمن مورب وجود دارد (عادل محتی و پکن، ۲۰۰۸). به منظور تعیین فرکانس طبیعی پل‌های با نشیمن مورب، محققین از یک مدل سه درجه آزادی استفاده کردند. در این مطالعه، شکل مود و نیروهای داخلی نیز مورد مطالعه قرار گرفت (کلانتری و امجدیان، ۲۰۱۰). محققین نشان دادند که تمایل به دوران در عرشه پل‌های دارای نشیمن مورب، به زاویه نشیمن، نسبت طول به عرض پل و ضریب اصطکاک بین عرشه و کوله نیز بستگی دارد (دیمیتراکوپولوس، ۲۰۱۱).

در مطالعاتی که برای پل‌های با نشیمن مورب انجام شده است همچنین می‌توان به مطالعه کاویانی و همکاران (۲۰۱۴) اشاره کرد. آن‌ها سه نمونه پل که نماینده پل‌های دارای زاویه نشیمن در منطقه کالیفرنیا بودند را مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها سه پارامتر

بعدی، اثر برخورد توأمان مؤلفه‌های زلزله به سازه مورد بررسی قرار گرفت. محققین، مؤلفه‌های زلزله را یکبار به صورت تک‌به‌تک و بار دیگر به صورت هم‌زمان به سازه اثر دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که روش ۱۰۰-۳۰ پیشنهادی آئین‌نامه‌ها، برای تعیین اثر هم‌زمانی بارها، به مقدار ۲۵ درصد پاسخ سازه را دست‌کم تخمین می‌زند (داویلا و کروز، ۲۰۰۴).

در مطالعاتی که برای زاویه بحرانی سازه انجام شده است، پژوهشگران فرمولی برای پیدا کردن پاسخ بحرانی حاصل از سه مؤلفه شتاب‌نگاشت ارائه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مقدار نیروها در المان‌ها و تغییر مکان‌ها می‌تواند تا ۸۰ درصد نسبت به حالتی که اثر زاویه برخورد در نظر گرفته نشود متفاوت باشد (آتاناتوپولو، ۲۰۰۵). در بررسی سازه‌هایی با پلان نامتقارن، با در نظر گرفتن اثر تحلیل اعمال زلزله در راستاهای مختلف، مشخص شد که مقدار تقاضای شکل‌پذیری بین ۱۰ تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد (ریگاتو و مدینا، ۲۰۰۷).

مسئله زاویه برخورد مؤلفه‌های زلزله برای پل‌ها نیز بررسی شده است. محققین در پلی یک دهانه، با در نظر گرفتن اثر غیرخطی فنرهای کوله، تحلیل‌های دینامیک غیرخطی در زوایای مختلف پل انجام داده و نتایج را با حالت مدل‌سازی خطی مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه بحرانی برای سازه در حالت خطی و غیرخطی متفاوت است. همچنین، مدل‌های غیرخطی حساسیت بیشتری به تغییر زاویه برخورد زلزله دارند. آن‌ها در نهایت نتیجه گرفتند که روش آیین‌نامه آشتو^۲ برای اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های زلزله پاسخ سازه را دست‌کم تخمین می‌زند (بیسدی و هد، ۲۰۱۰). در سال ۲۰۱۱، پژوهشگران با روشی تحلیلی و با این فرض که ترکیب پاسخ‌های دو راستای اصلی سازه با روش جذر مجموع مربعات مقدار بیشینه را خواهد

تغییر مکان نسبی دو سرستون، دوران عرشه و لغزش عرشه از روی نشیمن^۱ را در این پل‌ها مورد مطالعه قرار دادند و در مورد دوران عرشه به این نتیجه رسیدند که دوران عرشه به‌طور قابل توجهی به خرابی کلیدهای برشی بستگی دارد. در بررسی لغزش عرشه از روی کوله، بررسی‌ها نشان داد که مشخصات هندسی پل مثل آرایش دهانه‌ها و یا زاویه نشیمن مورب، تأثیر قابل توجهی بر مقدار تغییر مکان نسبی عرشه از روی کوله ندارد. بلکه تغییرات ارتفاع ستون عامل مؤثری در این مورد بوده است. همچنین، بررسی مقدار تغییر مکان نسبی دو انتهای ستون مشاهده شده در پل مشخص نمود که در پل‌های با نشیمن مورب، به‌واسطه ایجاد دوران در عرشه، تغییر مکان نسبی دوسر ستون‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به اهمیت رفتار کوله در رفتار لرزه‌ای پل، محققین مطالعاتی روی تغییر مکان خاک پشت کوله در هنگام زلزله انجام داده‌اند. آن‌ها با ایجاد مدل اجزای محدود کوله یک رابطه نیرو و تغییر مکان برای کوله‌ها ارائه دادند (شمس‌آبادی و همکاران، ۲۰۰۷). از دیگر مطالعاتی که با رویکرد احتمالاتی به مسئله پل‌های با نشیمن مورب پرداخته شده می‌توان به مطالعه ذاکری و قدرتی امیری (۲۰۱۴) اشاره کرد. در این مطالعه، آن‌ها کوله پل را به دو صورت یکپارچه و نشیمن مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد که مدل‌سازی کوله به‌صورت یکپارچه، اثر نشیمن مورب پل را کاهش می‌دهد.

بررسی اثر زاویه برخورد زلزله به سازه در ادبیات فنی دارای سابقه‌ای ۵۰ ساله است. در اولین تلاش‌ها، تمرکز روی تعیین شدت زلزله و مؤلفه‌های آن معطوف بوده است. محققین با در نظر گرفتن سه مؤلفه زلزله به‌صورت هم‌زمان، جهت بحرانی برای شدت زلزله را ارائه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین شدت زلزله در جهت کانون زلزله و کمترین شدت در جهت قائم آن به دست می‌آید (پنزین و واتابه، ۱۹۷۴). در مطالعات

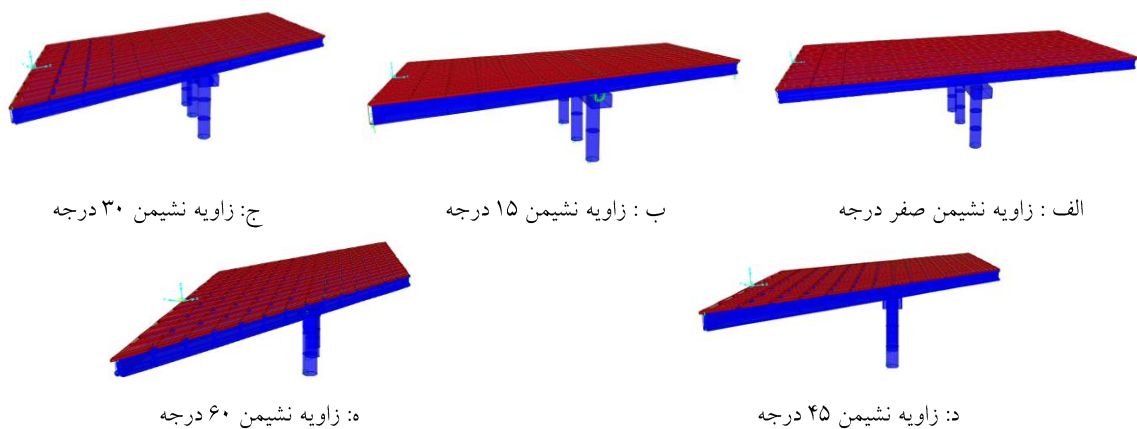
²- AASHTO

¹- Abutment unseating

دریافت پاسخ از سازه و اعمال زلزله در راستاهای مختلف در افزایش پاسخ مؤثر خواهد بود. با توجه به اینکه مکانیزم انتقال بارهای جانبی در سازه پل در دو راستای سازه کاملاً متفاوت است، چگونگی اعمال تحریک لرزه‌ای برای مطالعه رفتار پل از نظر جهت زاویه مؤلفه‌های ورودی حرکت زمین می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای تقاضای مهندسی سازه پل داشته باشد. بعلاوه، در تحقیقات رایج این فرض مستتر است که بیشینه تقاضا حتماً در یکی از دو راستای محور طولی پل و یا عمود بر آن ثبت خواهد گردید و صحت این فرض کمتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر همین اساس، در این مطالعه، تلاش شده است تا با اعمال زلزله در راستاهای متفاوت و دریافت پاسخ سازه در تمامی راستاها در صفحه، اثر رویکردهای فوق بر تقاضای لرزه‌ای اجزای پل مورد ارزیابی قرارگیرد. لازم به یادآوری است که بررسی اهمیت زاویه اعمال زلزله و راستای ثبت پاسخ، برای سازه پل‌ها تاکنون انجام نگرفته است و با توجه به وجود نامنظمی در پل‌های با نشیمن مورب، این امر اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند. به منظور بررسی نتایج از چارچوب مبتنی بر مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای و منحنی‌های شکنندگی برای ارائه نتایج استفاده شده است.

داشت، زاویه بحرانی برخورد مؤلفه‌های متعامد زلزله به پل را محاسبه نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که در صورت برخورد زلزله به سازه پل با زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه، پاسخ سازه بیشینه خواهد بود. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که اعمال مؤلفه‌های زلزله به صورت هم‌زمان، تقاضای اجزای سازه را شدیداً افزایش می‌دهد (باسو و شینوزوکا، ۲۰۱۱). همچنین، با بررسی منحنی‌های شکنندگی شاخص تقاضای شکل-پذیری ستون در زوایای مختلف می‌تواند از ۲۲ تا ۶۳ درصد متفاوت باشد و زاویه بحرانی برای حالت‌های حدی مختلف متفاوت می‌باشد (توربول و شینوزوکا، ۲۰۱۲). محققین در بررسی تأثیر اعمال زلزله در راستاهای مختلف پل را برای منحنی‌های شکنندگی کلی پل و اجزای پل، به این نتیجه رسیدند که تغییر زاویه اعمال زلزله روی منحنی‌های شکنندگی اجزای پل تأثیر قابل توجهی دارد؛ هرچند این اثر با این شدت در منحنی‌های شکنندگی کلی پل مشاهده نمی‌شود (تسکاری و سکستوس، ۲۰۱۵).

در تحقیقاتی که با موضوع اعمال زلزله در راستاهای مختلف انجام شده، کمتر به موضوع دوران محور دریافت پاسخ توجه شده است. امامی و حلییان (۲۰۱۵)، با استفاده از رویکردی مبتنی بر دریافت پاسخ از سازه در تمام زوایای ممکن، به این نتیجه رسیدند که



شکل ۱. نمای سه‌بعدی پل‌های مورد بررسی

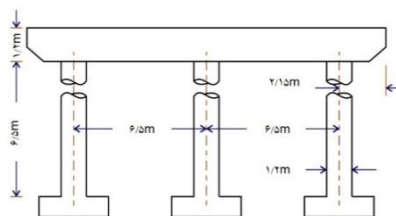
۲. معرفی مدل‌سازی عددی پل‌های مورد

بررسی

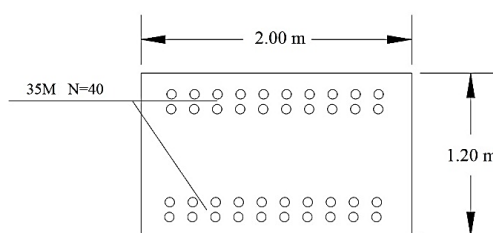
در این مطالعه، از پنج نمونه پل با عرشه پیش‌ساخته و پیش‌تینیده بتنی دو دهانه دارای زاویه نشیمن مورب صفر تا ۶۰ درجه مورد استفاده قرار گرفت. طول دهانه هر پل ۱۹ متر، عرض آن ۱۷/۳ متر و ارتفاع ستون پل ۶/۵ متر است. نمایی از تصویر سه‌بعدی پل‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

قاب عرضی پل یک قاب دارای سه ستون دایره‌ای به قطر ۱/۴ متر و تیر سرستون به ابعاد ۱/۲ ارتفاع در ۲ متر عرض می‌باشد. عرشه پل متشکل از ۸ تیر پیش‌تینیده به همراه ۲۰ سانتی‌متر دال بتنی و دیافراگم عرضی به فواصل حداکثر ۶ متر است. عرشه پل به منظور درنظر

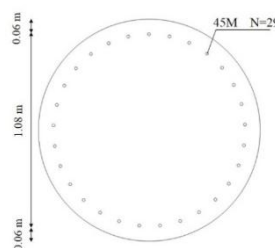
گرفتن اثر زاویه نشیمن پل به صورت شبکه‌ای از تیرهای متعامد با رفتار خطی مدل‌سازی شده است. اتصال ستون‌های پل به تکیه‌گاه به صورت صلب و اتصال تیر سرستون به عرشه به صورت مفصلی درنظر گرفته شد. طراحی مقاطع تیرهای پیش‌تینیده و ستون و تیر سرستون پل با استفاده از نرم‌افزار **CSI Bridge** انجام شده است که نرم‌افزاری رایج برای طراحی پل‌ها می‌باشد (SAP, 2008). طراحی به گونه‌ای انجام شد که برای هر پنج پل از مقاطع یکسانی استفاده شود. در شکل ۲، مقاطع مورد تیر سرستون، ستون و عرشه پل نشان داده شده است. ستون‌ها در نرم‌افزار آپنسیز با استفاده از المان **dispBeamColumn** مدل‌سازی شدند.



الف) قاب عرضی و عرشه پل

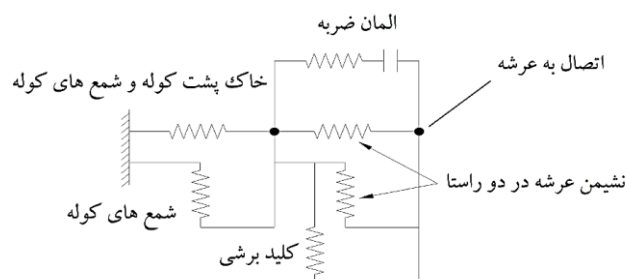


ب) مقطع تیر سرستون



ب) مقطع ستون

شکل ۲. الف) نمای قاب عرضی، ب) مقطع ستون پل و پ) مقطع تیر سرستون پل



شکل ۳. آرایش قرار گرفتن فنرهای انتهایی کوله

این منظور، از مصالح با رفتار دوخطی همراه ناحیه‌ی با نیرو صفر^۱ در مدل‌سازی استفاده شد (متکومار، ۲۰۰۳). رفتار قسمت خاک پشت کوله با استفاده از مصالح Material Hyperbolic Gap در نرم‌افزار آپنسیز مدل‌سازی شده است. این مصالح که مشخص‌کننده رفتار خاک پشت کوله است، بر اساس مطالعات شمس آبادی و همکاران (۲۰۰۷) مبتنی بر آزمایش به نرم‌افزار آپنسیز اضافه شده است. کوله پل‌ها دارای شمع‌هایی است که نقش انتقال بارهای ثقلی عرشه را دارند و در باربری جانبی پل‌ها نیز مشارکت می‌نمایند. برای مدل‌سازی رفتار شمع‌های کوله از دو منحنی رفتاری سه‌خطی، یکی در راستای عرضی و دیگری در راستای طولی، استفاده شد (چوی، ۲۰۰۲). مدل‌سازی میرایی در مدل‌ها، براساس میرایی متناسب با جرم و سختی روش رایلی با میرایی بحرانی ۵٪ برای مودهای اول و دوم سازه در نظر گرفته شد. همچنین، ماتریس سختی در تحلیل دینامیک غیرخطی در پایان هر گام زمانی برای محاسبه میرایی به‌روز شده است. این روش پیش از این برای مدل‌سازی پل‌های با نشیمن مورب توسط آویرام و همکاران (۲۰۰۸) و همچنین کاویانی و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده است.

۳. دوران شتاب‌نگاشت‌ها و تعریف مفهوم

سویه‌گی^۲

منظور از تحلیل سویه‌گی اعمال جفت مؤلفه‌های متعامد زلزله در زوایای مختلف سازه و بررسی بیشینه پاسخ ثبت شده از سازه در تمام زوایای ممکن در صفحه به ازای هر بار اعمال زلزله در زوایای خاص می‌باشد. این رویکرد پیش از این توسط امامی و حلبیان (۲۰۱۵) برای مطالعه رفتار سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفت. برای تبیین این روش، لازم است تفاوت سه

رفتار غیرخطی به صورت گسترده برای ستون‌های پل با استفاده از مقاطع غیرخطی فایبر در نظر گرفته شد. به طوری که هر ستون به پنج قسمت و در هر قسمت شش مقطع غیرخطی جایگذاری شود. در مقاطع فایبر، با تقسیم مقطع به قسمت‌های کوچکتر و محاسبه کرنش و تغییرشکل در آنها و نهایتاً محاسبه برآیند تنش و کرنش برای مقطع، رفتار غیرخطی در مفاصل محاسبه شد. برای مدل‌سازی رفتاری بتن محبوس شده و غیر محبوس شده، از مصالح Concrete01 استفاده شد. این مصالح، رفتار بتن مسلح را بر اساس مدل پیشنهادی کنت و پارک (۱۹۷۱) در نظر می‌گیرد. همچنین، برای مدل‌سازی فولاد میلگردها از مصالح Steel01 در نرم-افزار آپنسیز استفاده گردید.

در قسمت انتهایی عرشه و محل اتصال به کوله، وجود اجزای مختلف نظیر کلیدهای برشی، نشیمن عرشه، المان ضربه، شمع‌های کوله و خاک پشت کوله سبب ایجاد رفتارهای پیچیده غیرخطی خواهد شد. علت این امر، آرایش قرارگیری فنرهای غیرخطی مدل‌کننده اجزای فوق است. در این مطالعه، آرایش قرارگیری فنرهای غیرخطی در قسمت انتهایی کوله براساس تحقیقات پیشین به‌کار گرفته شده است (کاویانی و همکاران، ۲۰۱۴؛ نیلسون، ۲۰۰۵؛ راماناتان، ۲۰۱۲). شکل ۳، آرایش قرار گرفتن فنرها را نشان می‌دهد.

برای مدل‌سازی رفتار نشیمن عرشه، از منحنی رفتاری دوخطی استفاده شد (چوی، ۲۰۰۲). ابعاد نشیمن برای هر تیر پیش‌تنیده ۲۵۰×۶۲۰ میلی‌متر با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر لحاظ گردید. در این مطالعه، صرفاً کلیدهای برشی خارجی در نظر گرفته شد و مدل‌سازی آنها با استفاده از منحنی رفتاری سه‌خطی مبتنی بر آزمایش‌های تجربی انجام گرفت (بزرگزاده و همکاران، ۲۰۰۷). با توجه به اینکه پل‌ها در قسمت انتهایی عرشه مستعد برخورد به کوله می‌باشند، این رفتار در مدل‌سازی با استفاده از فنری غیرخطی لحاظ گردید. به

^۱ Gap

^۲ Directionality

در این مطالعه، منحنی‌های شکنندگی برای اجزای مختلف پاسخ پل ترسیم شده است. به این منظور، از ۸۰ جفت شتاب‌نگاشت (۴۰ جفت شتاب‌نگاشت حوزه دور و ۴۰ جفت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک) استفاده شد. این دو مجموعه شتاب‌نگاشت توسط مرکز تحقیقات مهندسی زلزله اقیانوس آرام^۱ به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای پل‌ها انتخاب شده است (بکر و همکاران، ۲۰۱۱). برای تحلیل‌های غیرخطی شتاب‌نگاشت‌ها بدون مقیاس شدن مورد استفاده قرار گرفتند. میانگین لگاریتمی و انحراف معیار استاندارد لگاریتمی شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور متناسب با زلزله‌ای با بزرگای ۷ و مکانیسم گسلش امتداد لغز در فاصله ۱۰ کیلومتری از محل وقوع زلزله باشد. سرعت موج برشی در خاک به‌طور میانگین برای عمق تا ۳۰ متری خاک بستر، ۲۵۰ متر بر ثانیه است. انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها به‌گونه‌ای بوده است که در بین بازه زمان تناوبی صفر تا ۵ ثانیه، منطبق بر طیف حاصل از مدل پیشنهادی مطالعه بور و آتکینسون (۲۰۰۸) باشد.

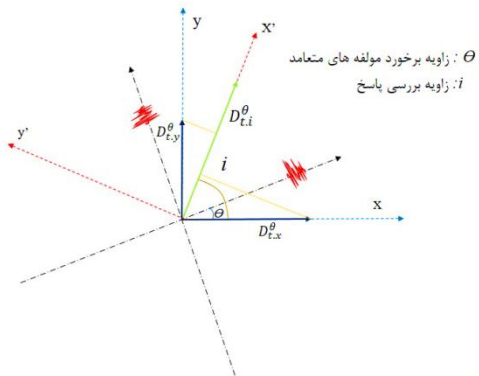
مجموعه دیگر متشکل از ۴۰ شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک است که دارای پالس قوی در تاریخچه زمانی سرعت خود با زمان تناوب‌های پالس مختلف می‌باشند. این شتاب‌نگاشت‌ها قابلیت ایجاد شکافت در گسل را به دلیل اثر جهت‌پذیری زلزله در حوزه نزدیک دارند. برای در نظر گرفتن مطالعات سویه‌گی در تحلیل‌های تاریخچه زمانی، شتاب‌نگاشت‌های فوق با استفاده از ماتریس دوران پادساعتگرد، دوران داده شده‌اند.

۴. مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای و حالت‌های حدی

با توجه به اهمیت سنجه شدت مناسب در ایجاد مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای، در این مطالعه، کارایی

راستا که در ادامه بیان می‌شود مشخص گردد: راستای قرار گرفتن محورهای مختصات، راستای اعمال بار لرزه‌ای نسبت به راستای محور مختصات و راستای دریافت پاسخ از سازه نسبت به راستای محور مختصات.

برای درک بهتر این مفهوم فرض می‌شود $D_{t,x}^{\theta}$ و $D_{t,y}^{\theta}$ که در شکل ۴ با بردارهای آبی رنگ نشان داده شده‌اند، به‌ترتیب تصویر پاسخی از سازه روی محور X و Y مختصات در لحظه t تاریخچه زمانی زلزله به ازای اعمال زلزله در راستای θ باشد.



شکل ۴. مفهوم دوران محور دریافت پاسخ

در صورتی که محورهای مختصات با زاویه i دوران داده شود، در این صورت، برآیند برداری این پاسخ در راستای i (محور افقی مختصات بعد از دوران؛ X') از رابطه (۱) محاسبه خواهد شد:

$$D_{t,i}^{\theta} = D_{t,x}^{\theta} \cos i + D_{t,y}^{\theta} \sin i \quad (1)$$

در مطالعه حاضر، پاسخی که به‌عنوان حاصل تحلیل گسی می‌شود، پیشینه پاسخ به‌دست‌آمده از سویه دوران زاویه θ بین صفر تا ۱۸۰ درجه (با افزایش گام به گام ۱۵ درجه) و دوران زاویه دریافت پاسخ بین صفر (با افزایش گام به گام ۱۰ درجه) می‌باشد. تا ۳۶۰ درجه باید توجه شود که منظور از اعمال زلزله در راستای θ ، اعمال جفت مؤلفه‌های متعامد از زلزله است که یکی از می‌سازد. زاویه θ را مختصات X مؤلفه‌های آن با محور

^۱- Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)

زلزله‌های حوزه دور و بیشینه میانگین هندسی شبه شتاب طیفی در زمان تناوب مود اول سازه دو مؤلفه زلزله $(Sa(T_1))$ برای شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک بهترین کارایی را برای مدل‌های این مطالعه داشت. همچنین، چهار پارامتر تقاضای مهندسی پل مربوط به اجزای مختلف پل در نظر گرفته شد. در جدول ۱، پارامترهای تقاضای مهندسی در نظر گرفته شده در این مطالعه آمده است.

سنجه شدت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. چهار سنجه شدت بیشینه میانگین هندسی شتاب دو مؤلفه زلزله (PGA)، بیشینه میانگین هندسی سرعت دو مؤلفه زلزله (PGV)، بیشینه میانگین هندسی تغییرمکان دو مؤلفه زلزله (PGD) و بیشینه میانگین هندسی شبه شتاب طیفی در زمان تناوب مود اول سازه دو مؤلفه زلزله $(Sa(T_1))$ برای بررسی در نظر گرفته شد. در بین سنجه‌های شدت در نظر گرفته شده، سنجه شدت بیشینه میانگین هندسی سرعت دو مؤلفه زلزله (PGV) برای

جدول ۱. پارامترهای تقاضای مهندسی پل در این مطالعه

نام	شرح
شکل‌پذیری انحنای ستون پل	تقاضای انحنای ثبت شده در تحلیل نسبت به انحنای تسلیم
لغزش عرشه از روی کوله	تغییر شکل نسبی عرشه نسبت به کوله پل
تغییر شکل کلیدهای برشی	تغییر شکل المان کلید برشی در پل
تغییر شکل نشیمن عرشه	تغییر شکل المان نشیمن عرشه در پل

جدول ۲. مقادیر شیب (b)، عرض از مبدأ (a) و پراکندگی اختلاف تقاضای ثبت شده با نتایج پیش‌بینی شده از منحنی IM-EDP. $(Var(e))$ در زلزله‌های حوزه دور. سنجه شدت PGV.

زاویه نشیمن	شکل‌پذیری انحنای ستون			لغزش عرشه از روی کوله			تغییر شکل کلیدهای برشی			تغییر شکل نشیمن عرشه		
	Var[e]	b	a	Var[e]	b	a	Var[e]	b	a	Var[e]	b	a
۰	۰/۳۴	۱/۱۳	-۲/۳۷	۰/۳	۰/۷۷	-۰/۳۴	۰/۲۴	۰/۴	۰/۳۶	-۰/۹۴	۰/۸۵	۰/۴۷
۱۵	۰/۳۴	۱/۰۳	-۲/۴۲	۰/۳۳	۰/۷۳	-۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۳۴	۰/۲۸	-۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۴۶
۳۰	۰/۳۸	۱/۰۲	-۲/۳۷	۰/۳	۰/۷۴	-۰/۳۸	۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۳۸	-۰/۷	۰/۷۶	۰/۴۴
۴۵	۰/۳۴	۰/۹۵	-۲/۱۰	۰/۲۸	۰/۷۶	-۰/۵۹	۰/۲	۰/۴	۰/۳۷	-۰/۸۸	۰/۷۹	۰/۴۴
۶۰	۰/۲۶	۰/۹۶	-۲/۱۱	۰/۲۳	۰/۶	-۰/۱۵	۰/۲	۰/۴	۰/۳۷	-۰/۳۵	۰/۶۸	۰/۴۳

محاسبه می‌گردد. رابطه (۲) مختصات نقاط ثبت شده از تحلیل دینامیک غیرخطی در نمودار پارامتر تقاضای مهندسی حسب سنجه‌های شدت را نشان می‌دهد.

$$\ln EDP = a + b \ln IM + e \quad (2)$$

اختلاف بین مقادیر ثبت شده در تحلیل غیر e که خطی با خط برازش داده شده در نمودار می‌باشد، ثابت

برای ایجاد مدل‌های احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای، لگاریتم نتایج ثبت شده از تحلیل دینامیک غیرخطی $(LnEDP)$ در برابر لگاریتم سنجه‌های شدت مربوط به هر شتاب‌نگاشت $(LnIM)$ در یک نمودار ترسیم می‌شود. سپس به صورت خطی یک برازش انجام شده و اختلاف مقادیر برازش داده شده و مقادیر ثبت شده

شتاب‌نگاشت i ، im_i سنجه شدت شتاب‌نگاشت i و n تعداد شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل می‌باشد. با توجه به انحراف از معیار مقادیر اختلاف می‌توان کارایی سنجه‌های شدت را مورد بررسی قرار داد. جداول ۲ و ۳ ضرایب منحنی برازش و مقدار پراکندگی برای سنجه شدت‌های انتخابی در حوزه دور و نزدیک را بیان می‌نمایند.

ضریب شیب خط برازش هستند. b عرض از مبدأ و a اگر مقادیر اختلاف بین مشاهدات و پیش‌بینی حاصل از برازش دارای انحراف از معیار ثابتی باشد، انحراف از معیار مقادیر اختلاف از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}[e] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln \text{edp}_i - (a + b \ln im_i))^2}{n-2}} \quad (3)$$

که $\text{Var}[e]$ انحراف از معیار مقادیر اختلاف، edp_i تقاضای مهندسی ثبت شده در ازای تحلیل با

جدول ۳. مقادیر شیب (b)، عرض از مبدأ (a) و پراکندگی اختلاف تقاضای ثبت شده با نتایج پیش‌بینی شده از منحنی IM-EDP (Var(e)) در زلزله های حوزه نزدیک. سنجه شدت Sa(T1)

زاویه نشیمن	شکل پذیری انحنای ستون			لغزش عرشه از روی کوله			تغییر شکل کلیدهای برشی			تغییر شکل نشیمن عرشه		
	Var[e]	b	a	Var[e]	b	a	Var[e]	b	A	Var[e]	b	Var[e]
۰	۰/۴۸	۱/۳۲	-۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۴۳	۰/۶۴	-۰/۱۳	۰/۲۹	۱/۲۷	۰/۵۴
۱۵	۰/۴۸	۱/۱۱	-۰/۱۴	۰/۴۶	۰/۹۶	۰/۹۲	-۰/۰۷	۰/۹۲	-۰/۰۸	۰/۳۲	۱/۳۸	۰/۴۶
۳۰	۰/۴۳	۱/۲۳	-۰/۳۸	۰/۳۹	۱/۰۷	۰/۵۳	-۰/۰۴	۰/۹۴	-۰/۲	۰/۳۰	۱/۳۹	۰/۴۵
۴۵	۰/۳۶	۱/۳۲	-۰/۶۳	۰/۳۵	۱/۰۷	۰/۴۵	-۰/۴۲	۱/۱۷	-۰/۳۸	۰/۳۷	۱/۴۵	۰/۴۴
۶۰	۰/۳۳	۱/۳۲	-۰/۶۶	۰/۳۳	۱/۰۵	۰/۳۸	-۰/۴۵	۱/۸۲	-۰/۳۶	۰/۳۷	۱/۵۱	۰/۴۵

برای حد مشخصی از خرابی سازه تهیه می‌گردد. لذا، این مسئله که چه حدی از خرابی برای ترسیم منحنی-های شکنندگی باید مد نظر قرار گیرد امری کلیدی است. تعیین حالت‌های حدی در این مطالعه بر اساس مطالعات انجام شده در ادبیات فنی انتخاب شد (راماناتان، ۲۰۱۲). در جدول ۳، حالت‌های حدی استفاده شده در این مطالعه بیان شده است. با توجه به جدول، حالت‌های حدی پل به دو دسته حالت‌های حدی اصلی و حالت‌های حدی ثانویه طبقه‌بندی می‌شود. حالت‌های حدی اصلی مربوط به اجزایی از پل است که خرابی کامل در آنها منجر به بسته شدن کامل جریان ترافیک در پل خواهد شد. ولی در حالت‌های حدی ثانویه، خرابی منجر به کندی جریان ترافیک خواهد شد. متناظر با وضعیت کیفی خرابی در پل، برای

با فرض توزیع نرمال برای احتمال لگاریتم مقادیر پارامتر تقاضا و سنجه شدت، احتمال تجاوز تقاضا از مقدار مشخص y به ازای شدت مشخصی از زلزله طبق رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود:

$$P(\text{EDP} > y | \text{IM}) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln y - (a + b \ln \text{IM})}{\sqrt{\text{Var}[e]}}\right) \quad (4)$$

که P احتمال عبور تقاضا از مقدار حالت حدی y به شرط شدت زلزله IM و $\Phi(\cdot)$ تابع توزیع تجمعی توزیع استاندارد نرمال هستند. ترسیم نمودار تابع احتمال رابطه (۴) برای مقادیر im منحنی‌های شکنندگی را به دست می‌دهد. روش بیان شده در ترسیم منحنی‌های شکنندگی پیش از این توسط بکر و کرنل (۲۰۰۶) مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به موارد بیان شده، مدل‌های احتمالاتی

بررسی توزیع فضایی زلزله بر منحنی‌های شکنندگی اجزای پل‌های بزرگراهی با نشیمن مورب در حوزه دور و نزدیک زلزله

حالت‌های حدی اصلی چهار وضعیت و برای تعریف کیفی این وضعیت‌ها در جدول ۴ آمده است. حالت‌های حدی ثانویه دو وضعیت قابل تعریف است.

جدول ۳. حالت‌های حدی در نظر گرفته شده برای ترسیم منحنی‌های شکنندگی

نام اجزای پل	شاخص خرابی	واحد	مقدار میانگین لگاریتمی حالت حدی				انحراف از معیار
			CDT-3	CDT-2	CDT-1	CDT-0	
حالت‌های حدی اصلی							
ستون	شکل‌پذیری انحنا [*]		۱	۴	۸	۱۲	۰/۳۵
لغزش عرشه نسبت به کوله	تغییر مکان نسبی عرشه نسبت به کوله ^{**}	cm	۲/۵	۱۵/۲	۳۵/۶	۵۳/۳	۰/۳۵
\times نسبت انحنای ثبت شده در تحلیل دینامیک غیرخطی نسبت به انحنای تسلیم در مقطع و $\times\times$ تغییر مکان نسبی در راستای عمود بر محور کوله							
حالت‌های حدی ثانویه							
کلیدهای برشی	تغییر شکل المان کلید برشی	cm	۳/۸	۱۲/۷	*	*	۰/۳۵
نشیمن عرشه	تغییر شکل المان نشیمن عرشه	cm	۲/۵	۱۰/۱	*	*	۰/۳۵

جدول ۴. تعریف کیفی حالت‌های حدی

علامت اختصاری حالت حدی	شرح کیفی آسیب به اجزای اولیه	شرح کیفی آسیب به اجزای ثانویه
CDT-0	آسیب ظاهری	آسیب ظاهری / خرابی جزئی قابل تعمیر
CDT-1	خرابی جزئی قابل تعمیر	خرابی عمده قابل تعمیر/نیاز به جایگزینی مجدد
CDT-2	خرابی عمده قابل تعمیر	-
CDT-3	نیاز به جایگزینی مجدد	-

جدول ۵. زمان تناوب مودهای ارتعاشی پل‌های مورد مطالعه (بر حسب ثانیه)

شماره مود ارتعاشی	زاویه نشیمن			
	۰	۱۵	۳۰	۴۵
اول	۰/۵۹	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۶۰
دوم	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۲۰
سوم	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۸
چهارم	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۵

۵. نتایج و بحث

۵-۱. نتایج تحلیل مودال

نتایج آنالیز مودال نشان می‌دهد که شکل مود اول همه پل‌ها در تمام زوایای نشیمن در راستای محور اصلی پل می‌باشد. در حالت پل بدون زاویه نشیمن و زاویه تا ۳۰ درجه، شکل مود دوم پل، در راستای عرضی پل می‌باشد. هرچه قدر زاویه نشیمن بیشتر باشد، اهمیت شکل مود دوران عرشه افزایش پیدا کرده است. به طوری که مود دوم پل با زوایای نشیمن ۴۵ و ۶۰ درجه، دوران صلب عرشه را نشان می‌دهد. جدول ۵ زمان تناوب مودهای ارتعاشی پل‌ها را نشان می‌دهد.

۵-۲. نتایج تحلیل‌های شکنندگی

نتایج تحلیل‌های احتمالاتی به صورت منحنی‌های شکنندگی ارائه می‌شود. در این منحنی‌ها، احتمال رسیدن به سطح مشخصی از خرابی به ازای شدت مشخصی از زلزله نشان داده می‌شود. شکل ۵ منحنی‌های شکنندگی برای ۱۲ جهت مختلف اعمال زلزله در پل با زاویه نشیمن صفر درجه و برای پارامترهای تقاضای مختلف ترسیم شده است. برای ترسیم این منحنی‌ها، در پارامتر شکل‌پذیری انحنای ستون و لغزش عرشه از روی کوله حالت حدی CDT-3 و برای تغییرشکل کلیدهای برشی و نشیمن عرشه حالت حدی CDT-1 در نظر گرفته شده است. در این شکل، منحنی‌ها برای پاسخ بیشینه در راستای محوره‌های مختصات به ازای اعمال زلزله در راستایی مشخص ترسیم شده‌اند. بر اساس این شکل، مشاهده می‌شود که منحنی‌های شکنندگی در زوایای مختلف متفاوت می‌باشند. همچنین، اثر تحلیل در زوایای مختلف برای اجزای مختلف پل متفاوت است. با توجه به شکل ۵ مشخص می‌شود که در بین تقاضاهای در

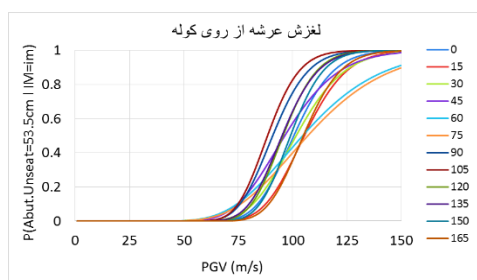
نظر گرفته شده، ملاحظات اعمال زلزله در راستاهای مختلف بیشترین اثر را در تغییرشکل کلیدهای برشی خواهد داشت. همچنین، کمترین اثر در تغییرشکل نشیمن عرشه رخ داده است. با توجه به نمودار شکنندگی تغییرشکل کلیدهای برشی کمترین حساسیت در این جزء از سازه مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، به ازای افزایش شدت زلزله، کمترین افزایش در بین تقاضاهای مهندسی اجزا در این جزء روی داد. همچنین، بیشترین تغییرات به ازای افزایش شدت زلزله نیز در نشیمن عرشه اتفاق افتاده است. با توجه به شکل ۶ مشخص می‌شود که الگوی مشاهده شده در زلزله‌های حوزه دور در زلزله‌های حوزه نزدیک نیز مشاهده می‌شود.

در بررسی پارامترهای تقاضای مهندسی سازه، مهندسین و محققین به مطالعه بیشینه پاسخ ثبت شده از تحلیل علاقه‌مند هستند. لذا، در این مطالعه سعی شده است بیشترین پاسخی که از سازه تحت اثر اعمال زلزله در راستاهای مختلف به دست می‌آید محاسبه گردد. بدین منظور، سه رویکرد دریافت پاسخ از سازه باید مورد توجه قرار گیرد. این سه رویکرد در جدول ۶ آمده است. حالت اول (NN) حالتی است که شتاب‌نگاشت‌ها در راستای محوره‌های مختصات به سازه اعمال می‌شود. به عبارت دیگر، در این حالت، مؤلفه عمود بر امتداد گسل زلزله در راستای طول پل (و متناظر با مود اول ارتعاشی سازه) و مؤلفه موازی با گسل در راستای عرضی پل به سازه اعمال می‌گردد و پاسخ سازه نیز صرفاً در همین دو راستا ثبت و بیشینه این دو پاسخ گزارش می‌شود. پس از تهیه این پاسخ برای چهل شتاب‌نگاشت، منحنی‌های شکنندگی بر اساس مطالب گفته شده در بند ۴ ترسیم می‌گردد.

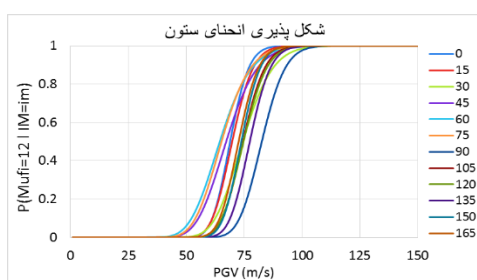
در حالت دوم دریافت پاسخ (DN)، شتاب‌نگاشت‌ها در ۱۲ جهت به سازه اعمال می‌شوند به طوری که مؤلفه عمود بر گسل زلزله با محور طولی پل زاویه θ را

در این حالت، به ازای اعمال شتاب‌نگاشت در زاویه θ محورهای مختصات از صفر تا 360° درجه با افزایش مرحله‌ای 10° درجه دوران داده می‌شود. در هر مرحله از دوران، پاسخ سازه روی محور X دوران یافته، طبق رابطه (۱)، تصویر شده و ثبت می‌گردد. بعد از اعمال زلزله در تمام زوایای صفر تا 360° درجه و دوران در تمام صفحه، بیشینه پاسخ‌های ثبت شده روی محور دوران یافته به عنوان پاسخ نهایی گزارش می‌شود.

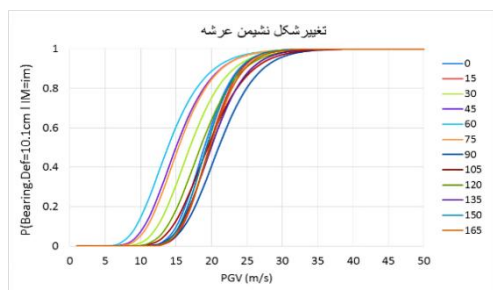
بسازد (زاویه θ از صفر تا 180° درجه با افزایش 15° درجه‌ای در هر گام متغیر است). بعد از اعمال زلزله، پاسخ‌ها در راستاهای طولی و عرضی پل برداشت شده و بیشینه این پاسخ برای 12 جهت اعمال زلزله و دو راستای دریافت پاسخ گزارش می‌شود. در حالت سوم دریافت پاسخ (DD)، شتاب‌نگاشت-ها مانند حالت DN، در 12 جهت به سازه اعمال می‌شود. ولی دریافت پاسخ با حالت DN متفاوت است.



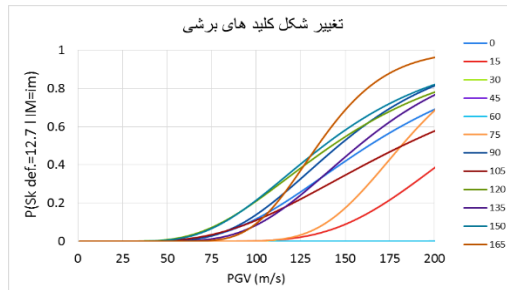
ب) لغزش عرشه از روی کوله



الف) شکل‌پذیری انحنا



د) تغییر شکل نشیمن عرشه

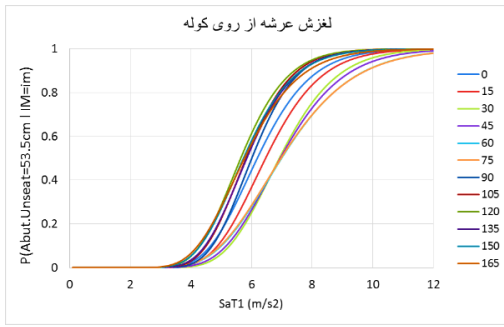


ج) تغییر شکل کلیدهای برشی

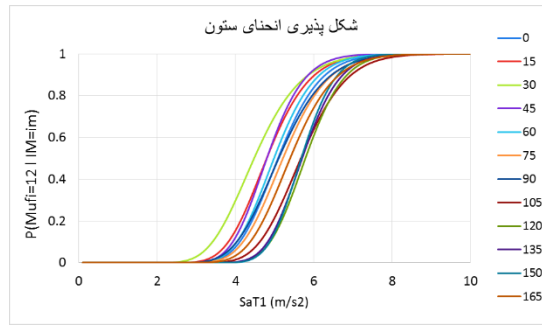
شکل ۵. نتایج تحلیل‌های شکنندگی برای اعمال زلزله در 12 جهت برای پل با زاویه نشیمن صفر درجه در حوزه دور زلزله. الف) شکل‌پذیری انحنا، ب) لغزش عرشه از روی کوله، ج) تغییر شکل کلیدهای برشی و د) تغییر شکل نشیمن عرشه

جدول ۶. معرفی روش‌های دریافت پاسخ با ملاحظات سوییچی

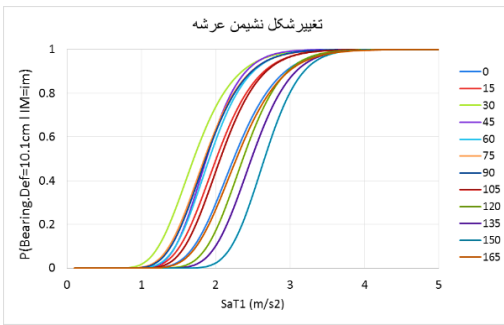
علامت اختصاری	شرح نحوه محاسبه پاسخ
NN	اعمال شتاب‌نگاشت در راستای محورهای مختصات و دریافت بیشینه پاسخ در راستای محورهای مختصات
DN	اعمال شتاب‌نگاشت در تمام زوایا در صفحه (صفر تا 180° درجه) و دریافت بیشینه پاسخ در راستای محورهای مختصات
DD	اعمال شتاب‌نگاشت در تمام زوایا در صفحه (صفر تا 180° درجه) و دریافت بیشینه پاسخ در تمام زوایا در صفحه (صفر تا 360° درجه)



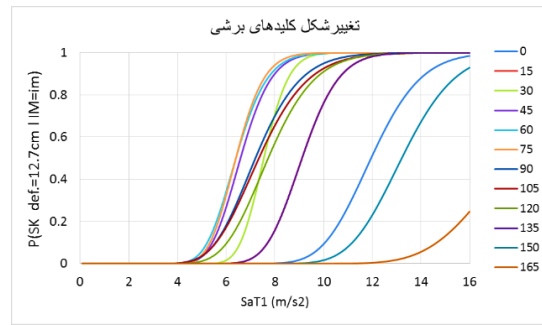
الف: لغزش عرشه از روی کوله



ب: شکل پذیری انحنا



ج: تغییر شکل نشیمن عرشه



د: تغییر شکل کلیدهای برشی

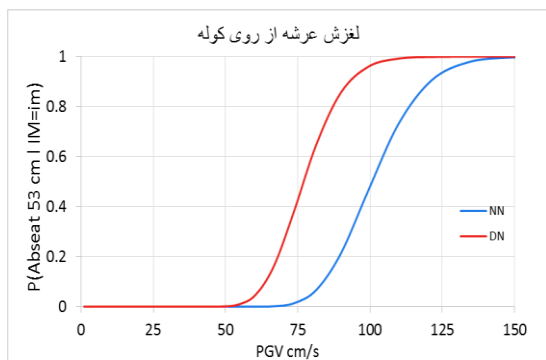
شکل ۶. نتایج تحلیل‌های شکنندگی برای اعمال زلزله در ۱۲ جهت برای پل با زاویه نشیمن صفر در حوزة نزدیک. الف) شکل پذیری انحنا، ب) لغزش عرشه از روی کوله، ج) تغییر شکل کلیدهای برشی و د) تغییر شکل نشیمن عرشه.

شدت کمتری می‌تواند سطح خرابی یکسانی را نسبت به حالتی ایجاد کند که شتاب‌نگاشت در راستای محور پل و عمود بر آن به سازه اعمال می‌شود. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در المان نشیمن عرشه کمترین اثر ناشی از تحلیل در زوایای مختلف و در کلیدهای برشی بیشترین اثر مشاهده می‌شود.

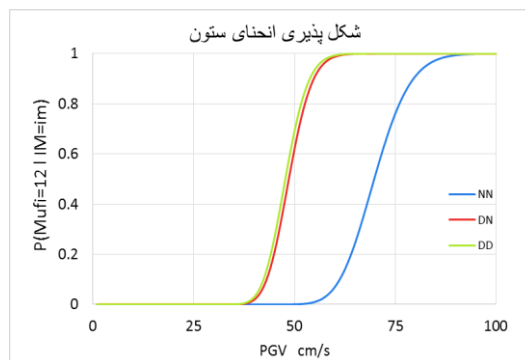
در منحنی‌های مربوط به شکل‌پذیری انحنا، خط سبز رنگ نشان دهنده حالت دریافت پاسخ DD است که منطبق بر خط قرمز رنگ نیست. به عبارت دیگر، وجود فاصله بین این دو منحنی نشان‌دهنده اثر دوران محور مختصات برای دریافت پاسخ می‌باشد. با توجه به اینکه شکل ۷ نشان دهنده نتایج تحلیل در مورد پل با زاویه نشیمن صفر درجه است، این سؤال پیش می‌آید که اثر اعمال زلزله در راستاهای مختلف و دوران محور دریافت پاسخ با افزایش زاویه نشیمن پل تا چه اندازه تغییر خواهد کرد؟

در شکل ۷، منحنی‌های شکنندگی سه حالت دریافت پاسخ تعریف شده در بالا برای چهار پارامتر تقاضای مهندسی نمایش داده شده است. در نمودار شکل‌پذیری انحنا، سه نمودار متناظر با سه حالت دریافت پاسخ NN، DN و DD ترسیم شده است و در دیگر پارامترهای تقاضا دو نمودار شکنندگی مشاهده می‌شود. علت آن است که برای این پارامترها دوران محور دریافت پاسخ قابل تعریف نیست. به عبارت دیگر، در تغییر شکل کلیدهای برشی و نشیمن عرشه، تغییر مکان در محور محلی عضو تعریف می‌شود و در لغزش عرشه از روی کوله تغییر مکان نسبی عرشه نسبت به کوله در راستای عمود بر امتداد کوله معنی پیدا می‌کند.

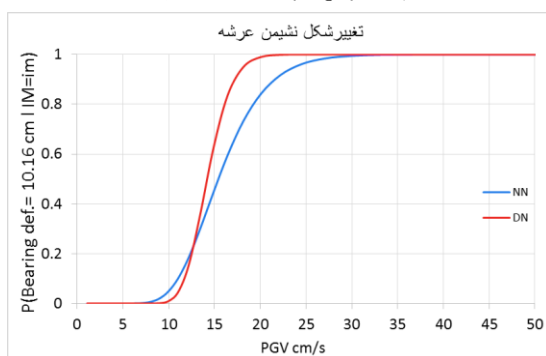
با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که در حالتی که زلزله در تمام زوایا به سازه برخورد کند (حالت DN، منحنی قرمز رنگ) حساسیت سازه بالاتر رفته و زلزله با



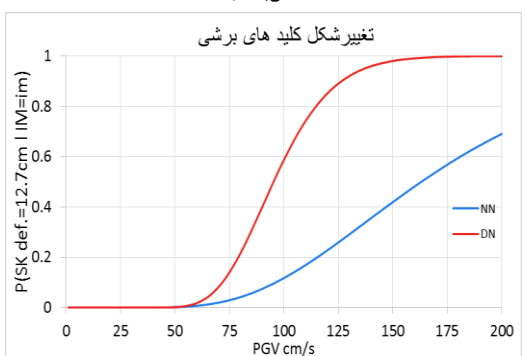
ب) لغزش عرشه از روی کوله



الف) شکل‌پذیری انحنا



د) تغییر شکل نشیمن عرشه



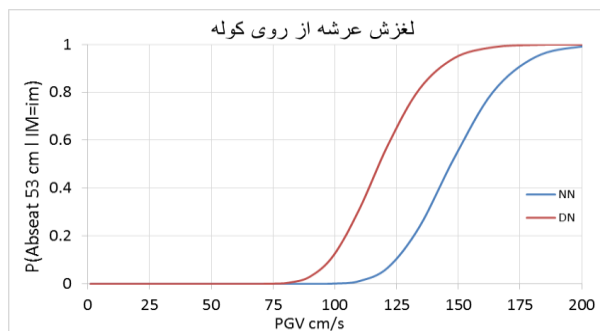
ج) تغییر شکل کلیدهای برشی

شکل ۷. نتایج تحلیل‌های شکنندگی برای اعمال زلزله در ۱۲ جهت برای پل با زاویه نشیمن صفر درجه در حوزه دور. الف) شکل‌پذیری انحنا، ب) لغزش عرشه از روی کوله، ج) تغییر شکل کلیدهای برشی و د) تغییر شکل نشیمن عرشه

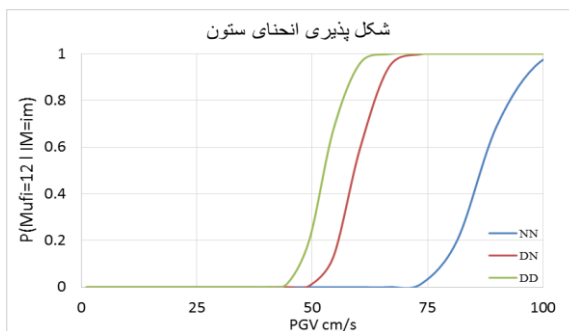
زلزله در زوایای مختلف کاهش یا افزایش می‌یابد. این روند نوسانی در حالت حوزه دور در تغییر شکل کلیدهای برشی نیز مشاهده می‌شود. با این حال، در حوزه نزدیک، اثر اعمال زلزله سیری کاهشی دارد. در پارامتر تغییر شکل نشیمن عرشه نیز اختلاف بین دو حالت NN و DN در حوزه دور و نزدیک دارای نوسان است.

همچنین، با توجه به اختلاف شدت مربوط به حالت‌های DD (ستون سبزرنگ) و DN (ستون قرمز رنگ) در شکل‌پذیری انحنا پل، مشخص می‌شود که این فاصله با افزایش زاویه نشیمن پل افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، اثر دوران محورهای مختصات برای دریافت پاسخ با افزایش زاویه نشیمن پل افزایش می‌یابد.

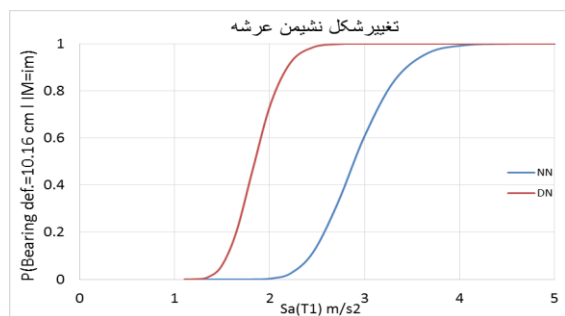
شکل ۸ نمونه‌ای از منحنی‌های شکنندگی پارامترهای تقاضای مهندسی پل را برای پل‌های با زوایای نشیمن مختلف نشان می‌دهد. در شکل ۹ نمودارهای میله‌ای مشخص کننده شدت زلزله در احتمال خرابی ۵۰٪ برای حوزه دور و نزدیک ترسیم شده است. در این شکل، روند تغییرات شدت با افزایش زاویه نشیمن پل و برای اجزای مختلف پل قابل مشاهده است. با دقت در شکل ۹ مشاهده می‌شود که اختلاف PGV نظیر ۵۰٪ در دو حالت DN (ستون آبی رنگ) و NN (ستون قرمز رنگ)، در شکل‌پذیری انحنا ستون در حال افزایش است. این مشاهده حاکی از آن است که اثر اعمال زلزله در زوایای مختلف با افزایش زاویه نشیمن پل سیری افزایشی دارد. در پارامتر لغزش عرشه از روی کوله و در حوزه دور، این روند کاهشی است. ولی در حوزه نزدیک با توجه زاویه نشیمن، اثر اعمال



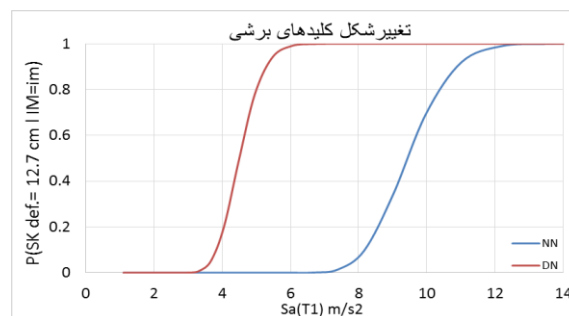
ب) لغزش عرشه، زاویه نشیمن ۳۰ درجه، حوزه دور



الف) شکل پذیری انحنا، زاویه نشیمن ۶۰ درجه، حوزه دور



د) نشیمن عرشه، زاویه نشیمن ۴۵ درجه، حوزه نزدیک



ج) کلیدهای برشی، زاویه نشیمن ۱۵ درجه، حوزه نزدیک

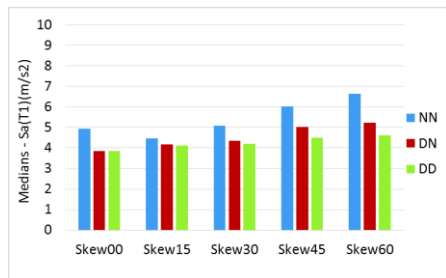
شکل ۸. نمونه‌هایی از منحنی‌های شکنندگی برای اجزای مختلف در زوایای متفاوت نشیمن مورب

محورهای مختصات در تمام راستاهای صفحه دوران یابند دو مؤلفه زلزله با ۱۰٪ شدت ضعیف‌تر نسبت به زلزله ضعیف شده، خرابی یکسانی را نسبت به حالتی که پاسخ صرفاً در راستای طولی و عرضی پل دریافت شود ایجاد خواهند نمود ($\Delta 2$). به طور کلی در صورتی که اثر اعمال زلزله در راستاهای مختلف و دوران محور دریافت پاسخ به شکل همزمان در نظر گرفته شود، زلزله‌ای با ۳۹٪ شدت ضعیف‌تر خرابی مشابهی را نسبت به حالتی ایجاد می‌کند که زلزله با تمام شدت در راستای طولی و عرضی پل به سازه برخورد کند و راستای پاسخ‌های بیشینه صرفاً منطبق بر محور طولی یا عمود بر آن فرض شود ($\Delta 3$).

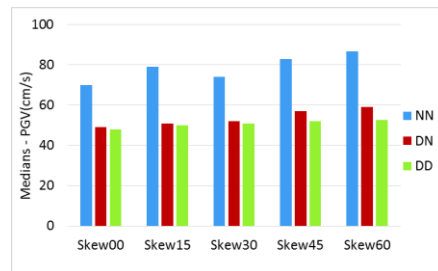
جدول ۷ اختلاف شدت زلزله نظیر احتمال خرابی ۵۰٪ در سه حالت $\Delta 1$ ، $\Delta 2$ و $\Delta 3$ برای تقاضای مهندسی شکل‌پذیری انحنا در حوزه‌های نزدیک و دور زلزله را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱، نمودار روند این اختلاف‌ها با افزایش زاویه نشیمن پل نشان داده شده است.

علی‌رغم اینکه در شکل ۹ اختلاف ارتفاع ستون‌های مربوط به روش‌های محاسبه پاسخ (NN، DN و DD)، به صورت کیفی مشخص کننده اثر اعمال زلزله در زوایای مختلف به سازه و دوران محور دریافت پاسخ است. به منظور بررسی کمی میزان این دو اثر، به نظر می‌رسد که تعیین شاخصی کمی مفید باشد. برای این منظور، شدت زلزله در احتمال ۵۰٪ رسیدن به حالت حدی برای سه حالت دریافت پاسخ (NN، DN و DD) در نظر گرفته شد و اختلاف این شدت‌ها بین این سه حالت محاسبه شد. شکل ۱۰ به صورت شماتیک و با یک مثال، نحوه محاسبه این اختلاف‌ها را نشان می‌دهد. از شکل ۱۰ این مفهوم برداشت می‌شود که در صورتی که دو مؤلفه زلزله در راستاهای محور پل و عمود بر آن بر سازه اعمال شود احتمال خرابی برابر با حالتی است که آن دو مؤلفه زلزله با ۳۲٪ شدت ضعیف‌تر و با امکان اعمال در راستایی غیر از محور پل و عمود بر آن بر سازه اعمال شود ($\Delta 1$). همین طور، در صورتی که برای دریافت پاسخ بیشینه از سازه

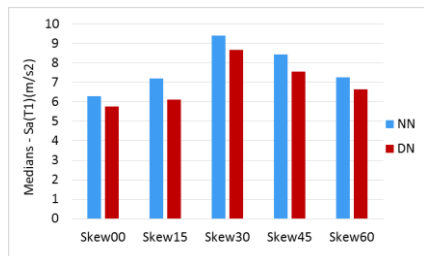
بررسی توزیع فضایی زلزله بر منحنی‌های شکنندگی اجزای پل‌های بزرگراهی با نشیمن مورب در حوزه دور و نزدیک زلزله



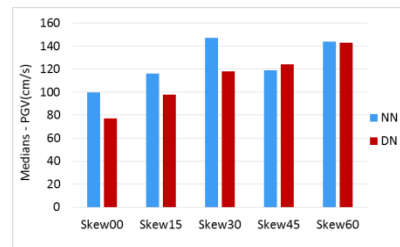
ه) شکل پذیری انحنای ستون، حوزه نزدیک



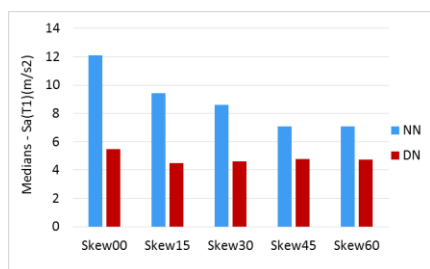
الف) شکل پذیری انحنای ستون، حوزه دور



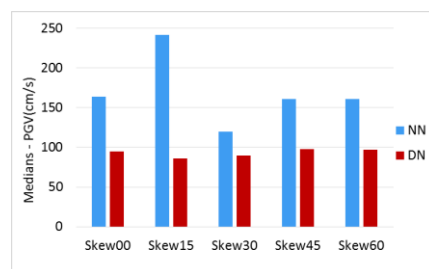
و) لغزش عرشه از روی کوله، حوزه نزدیک



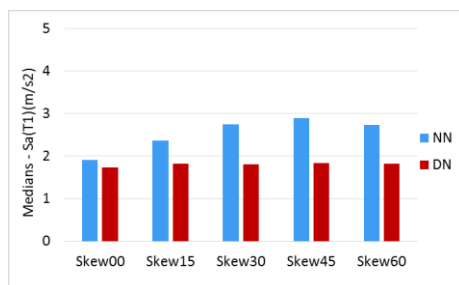
ب) لغزش عرشه از روی کوله، حوزه دور



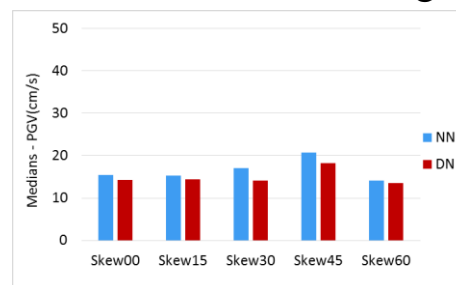
ز) تغییر شکل کلیدهای برشی، حوزه نزدیک



ج) تغییر شکل کلیدهای برشی، حوزه دور

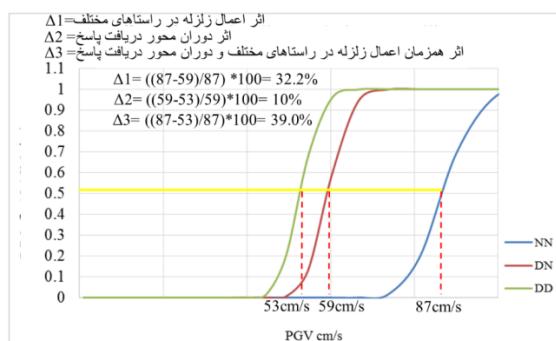


ح) تغییر شکل نشیمن عرشه، حوزه نزدیک



د) تغییر شکل نشیمن عرشه، حوزه دور

شکل ۹. مقادیر سنجه شدت نظیر احتمال خرابی ۵۰٪ در اجزای پل

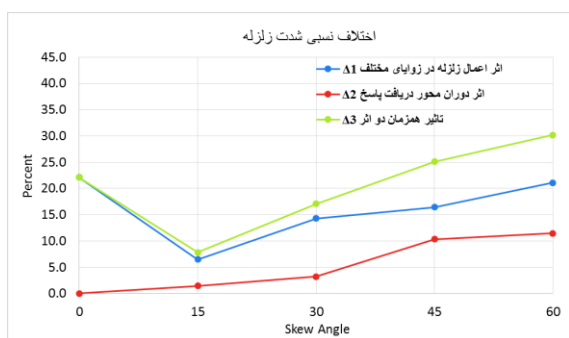


شکل ۱۰. مقایسه شدت زلزله در احتمال ۵۰٪ رسیدن به حالت حد در سه روش دریافت پاسخ برای تعیین اثر اعمال زلزله در

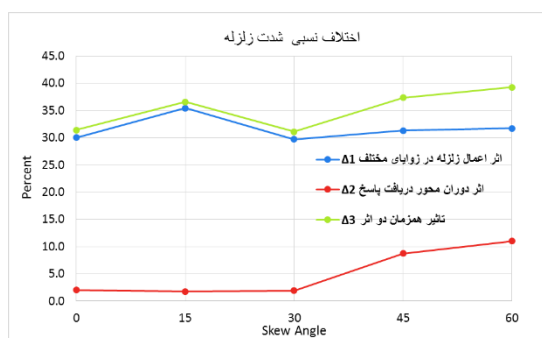
راستاهای مختلف و دوران محور دریافت پاسخ به صورت شماتیک

جدول ۷. اختلاف شدت زلزله نظیر احتمال خرابی ۵۰٪ برای تقاضای مهندسی شکل پذیری انحنای

زاویه نشیمن پل	حوزه دور زلزله، سنجه شدت PGV			حوزه نزدیک زلزله، سنجه شدت $Sa(T_1)$		
	اختلاف حالت‌های NN و DN	اختلاف حالت‌های DN و DD	اختلاف حالت‌های NN و DD	اختلاف حالت‌های NN و DN	اختلاف حالت‌های DN و DD	اختلاف حالت‌های NN و DD
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
۰	۳۰	۲	۳۱/۴	۲۲/۱	۰	۲۲/۱
۱۵	۳۵/۴	۱/۸	۳۶/۶	۶/۵	۱/۴	۷/۸
۳۰	۲۹/۷	۱/۹	۳۱/۱	۱۴/۳	۳/۲	۱۷/۱
۴۵	۳۱/۳	۸/۸	۳۷/۳	۱۶/۴	۱۰/۳	۲۵/۱
۶۰	۳۱/۷	۱۱	۳۹/۲	۲۱/۱	۱۱/۵	۳۰/۲



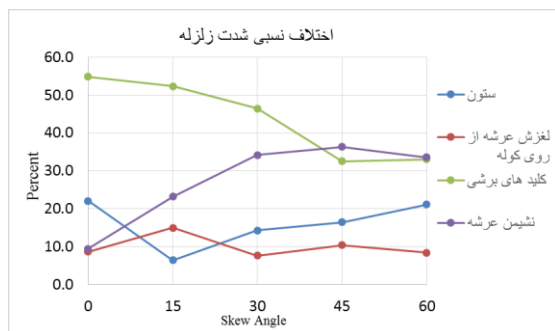
ب) حوزه نزدیک زلزله ($Sa(T_1)$)



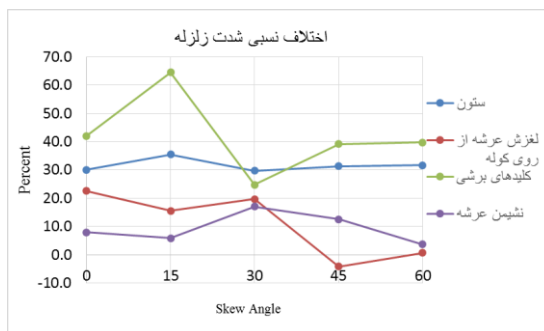
الف) حوزه دور زلزله (PGV)

شکل ۱۱. روند اختلاف شدت زلزله نظیر احتمال خرابی ۵۰٪ برای تقاضای مهندسی شکل پذیری انحنای با افزایش زاویه نشیمن

پل: الف) حوزه دور زلزله (PGV) و ب) حوزه نزدیک زلزله ($Sa(T_1)$)



ب) حوزه نزدیک



الف) حوزه دور

شکل ۱۲. مقایسه روند اختلاف شدت زلزله در احتمال خرابی ۵۰٪ در دو حالت NN و DN در پارامترهای تقاضای مهندسی

پل برای زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با افزایش زاویه نشیمن پل

ستون‌ها لحاظ نشده است. زیرا هدف مقایسه پارامترهای تقاضای مهندسی پل با هم تحت ملاحظات سويه‌گی است. ولی دوران محور دریافت پاسخ صرفاً برای شکل‌پذیری انحنا قابل تعریف است.

با توجه به شکل ۱۱، در حوزه دور زلزله، روند اختلاف شدت زلزله در پارامترهای شکل‌پذیری انحنا و تغییرشکل نشیمن با افزایش زاویه نشیمن پل یکنواخت است. در لغزش عرشه از روی کوله، این روند سیری نزولی دارد. در کلیدهای برشی تا زاویه نشیمن ۱۵ درجه این سیر صعودی، سپس تا ۳۰ درجه نزولی و نهایتاً به روندی یکنواخت می‌رسد. در حوزه نزدیک، مشاهده می‌شود که اختلاف پارامترهای شکل‌پذیری انحنا ستون و لغزش عرشه از روی کوله با افزایش زاویه نشیمن روندی یکنواخت دارد. پارامتر نشیمن عرشه روندی صعودی و پارامتر کلیدهای برشی سیری نزولی را دنبال می‌کنند. در بین اجزای پل، مشاهده می‌شود که کلیدهای برشی بیشترین اثر را از ملاحظات سويه‌گی پذیرفته‌اند.

۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه برای بررسی اثر زاویه برخورد مؤلفه‌های متعامد بر تقاضاهای مهندسی ایجاد شده در پل‌های با زاویه نشیمن تیر سرستون و کوله انجام گرفته است. بر همین اساس، مجموعه‌ای شامل پنج پل دو دهانه با زاویه نشیمن صفر تا ۶۰ درجه تحت تحلیل‌های دینامیک غیرخطی قرار گرفت. در این تحلیل‌ها، از دو مجموعه شتاب‌نگاشت حوزه دور و حوزه نزدیک استفاده شد. هر شتاب‌نگاشت در ۱۲ جهت به سازه‌ها اعمال و به ازای اعمال زلزله در هر زاویه محورهای دریافت پاسخ در صفحه دوران داده شده است تا بیشترین تقاضای ایجادشده در ستون پل‌ها محاسبه گردد. همچنین، برای سایر شاخص‌های تقاضای پل

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که اثر دوران محور دریافت پاسخ (خط قرمز رنگ) در افزایش تقاضای شکل‌پذیری انحنا با افزایش زاویه نشیمن پل افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، اثر اعمال زلزله در راستاهای مختلف (خط آبی رنگ) در حوزه دور و نزدیک با افزایش زاویه نشیمن پل روند متفاوتی دارد. در زلزله‌های حوزه دور تا زاویه نشیمن ۱۵ درجه، روندی صعودی داشته و سپس تا ۳۰ درجه سیری نزولی دارد و بعد از آن یکنواخت ادامه پیدا می‌کند. در زلزله‌های حوزه دور تا زاویه نشیمن ۱۵ درجه، سیر نزولی و سپس سیر صعودی با شیب ملایم مشاهده می‌شود.

به طور کلی، با توجه به جدول ۷ و شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که اختلاف شدت زلزله نظیر احتمال خرابی ۵۰٪ برای دو حالت در نظر گرفتن اثر سويه‌گی و بدون در نظر گرفتن آن در حوزه دور زلزله تا ۳۹/۲ درصد می‌باشد. از این مقدار اختلاف ۱۱٪ آن مربوط به دوران محور دریافت پاسخ است. در حوزه نزدیک زلزله ملاحظات سويه‌گی موجب اختلاف به مقدار ۳۰/۲ درصد نسبت به حالت اعمال زلزله و دریافت پاسخ روی محورهای مختصات شده است که ۱۱/۵ درصد مربوط به اثر دوران محور دریافت پاسخ است. با توجه به شکل ۱۱ مشخص می‌شود که اثر دوران محور دریافت پاسخ با زاویه نشیمن پل رابطه مستقیمی دارد. به عبارت دیگر، می‌توان نتیجه گرفت که این روند به علت بروز نامنظمی در پل‌ها به دلیل زاویه نشیمن عرشه رخ داده است.

شکل ۱۲ روند اختلاف شدت زلزله در دو حالت اعمال تحریک لرزه‌ای در راستاهای مختلف و دریافت پاسخ روی محورهای مختصات و حالت اعمال تحریک لرزه‌ای و دریافت پاسخ روی محورهای مختصات مشاهده می‌شود. در شکل ۱۲، بر خلاف شکل ۱۱، اثر دوران محور دریافت پاسخ برای شکل‌پذیری انحنا

دریافت پاسخ بوده است. این مشاهده نشان می‌دهد که پارامتر تقاضای مهندسی شکل‌پذیری انحنا در راستایی غیر از جهت‌های اولیه محورهای مختصات (محور پل و عمود بر آن) بیشینه پاسخ را داشته است.

۳- اثر دوران محور دریافت پاسخ با افزایش زاویه نشیمن پل افزایش می‌یابد. علت این امر می‌تواند افزایش نامنظمی هندسی در اثر افزایش زاویه نشیمن پل باشد.

۴- در بین اجزای پل، بیشترین اثر ناشی از تحلیل در زوایای مختلف در کلیدهای برشی پل مشاهده می‌شود. این اثر در زلزله‌های حوزه نزدیک با افزایش زاویه نشیمن پل روندی نزولی دارد و در زلزله‌های حوزه دور، به صورت مقطعی روندی صعودی یا نزولی را نشان می‌دهد.

۵- در بررسی منحنی‌های شکنندگی پارامتر لغزش عرشه از روی کوله مشخص شد که اثر اعمال زلزله در زوایای مختلف، با افزایش زاویه نشیمن سرستون، کاهش می‌یابد.

۶- بررسی المان نشیمن عرشه نشان می‌دهد که اثر تحلیل در زوایای مختلف در حوزه نزدیک زلزله با افزایش زاویه نشیمن پل، افزایش می‌یابد و در زلزله‌های حوزه دور، این روند به صورت مقطعی سیری صعودی یا نزولی دارد.

(تغییر مکان نسبی عرشه از روی کوله) در بیشینه پاسخ در راستای عمود بر راستای نشیمن پل (تغییر شکل کلیدهای برشی و تغییر شکل نشیمن عرشه) بیشینه پاسخ در محور محلی اعضا ثبت گردیده است. بر اساس پاسخ‌های به دست آمده، منحنی‌های شکنندگی به منظور تعیین احتمال رسیدن اجزا به حد خرابی ترسیم شده و نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده به صورت زیر جمع‌بندی می‌گردد:

۱- در نظر گرفتن اثر اعمال زلزله در زوایای مختلف موجب افزایش تقاضای مهندسی و احتمال خرابی در همه اجزای اصلی و ثانویه بررسی شده پل می‌شود. به عبارت دیگر، در صورتی که اعمال تحریک لرزه‌ای مشخصی در راستای محورهای طولی و عرضی پل موجب ایجاد سطح خرابی مشخصی گردد، اعمال تحریک لرزه‌ای با شدت به مراتب ضعیف‌تر (تا $39/2$ درصد در حوزه دور و $30/2$ درصد در حوزه نزدیک) ولی با امکان اعمال در همه زوایا به سازه و دریافت پاسخ از سازه در تمام راستاهای صفحه، موجب ایجاد همان سطح از خرابی در اجزای پل می‌گردد.

۲- مشاهدات نشان می‌دهد که در نظر گرفتن دوران محور دریافت پاسخ موجب افزایش پاسخ سازه در بررسی شکل‌پذیری انحنا می‌شود. به بیان دیگر، از مقدار اختلاف بین شدت زلزله نظیر احتمال خرابی 50% در شکل‌پذیری انحنا می‌تواند در دو حالت با ملاحظات سوییگی و بدون آن، تا 11% مربوط به اثر دوران محور

۷. مراجع

- Abdel-Mohti, A. and Pekcan, G. 2008. "Seismic response of skewed RC box-girder bridges". *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 7(4): 415-426.
- Athanatopoulou, A. M. 2005. "Critical orientation of three correlated seismic components". *Eng. Struct.*, 27(2): 301-312.
- Aviram, A., Mackie, K. R. and Stojadinović, B. 2008. "Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California". Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report. 2008/03.
- Baker, J. W., and C. A. Cornell. 2006. "Vector-valued ground motion intensity measures for probabilistic seismic demand analysis". Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report. 2006/08.
- Baker, J. W., Lin, T. and Shahi, S. K. 2011. "New Ground Motion Selection Procedures and Selected Motions for the PEER Transportation Research Program". Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report. 2011/03.
- Banerjee Basu, S. and Shinozuka, M. 2011. "Effect of ground motion directionality on fragility characteristics of a highway bridge". *Adv. Civ. Eng.*, Retrieved from <http://www.hindawi.com/journals/ace/2011/536171/abs>.
- Bisadi, V. and Head, M. 2010. "Orthogonal effects in nonlinear analysis of bridges subjected to multicomponent earthquake excitation". *Am. Soc. Civ. Eng.*, [https://doi.org/10.1061/41130\(369\)20](https://doi.org/10.1061/41130(369)20).
- Boore, D. M. and Atkinson, G. M. 2008. "Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s". *Earthquake Spectra*. [Online] 24 (1), 99–138. Available from: doi:10.1193/1.2830434.
- Bozorgzadeh, A., Megally, S. H. and Ashford, S. A. 2007. "Seismic response of sacrificial exterior shear keys in bridge abutments". Final Report No. SSRP-04/14, 82 p., San Diego, California.
- Choi, E. 2002. "Seismic analysis and retrofit of mid-America bridges". Retrieved from <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/21538>.
- Davila, F. and Cruz, E. 2004. "Study of the effect of in-plan asymmetry in multistory buildings subjected to uni- and bi-directional seismic motions". The 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada. Retrieved from www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1042.pdf.
- Dimitrakopoulos, E. G. 2011. "Seismic response analysis of skew bridges with pounding deck-abutment joints". *Eng. Struct.*, 33(3): 813-826. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.004>.
- Emami, A. R. and Halabian, A. M. 2015. "Spatial distribution of ductility demand and damage index in 3D RC frame structures considering directionality effects". *The Struct. Design Tall Special Build.*, 24(16): 941-961. <https://doi.org/10.1002/tal.1219>.
- Ghobarah, A. A. and Tso, W. K. 1973. "Seismic analysis of skewed highway bridges with intermediate supports". *Earthq. Eng. Struct. Dynam.*, 2(3): 235-248.
- Kalantari, A. and Amjadian, M. 2010. "An approximate method for dynamic analysis of skewed highway bridges with continuous rigid deck". *Eng. Struct.*, 32(9): 2850-2860.
- Kaviani, P., Zareian, F. and Taciroglu, E. 2014. "Performance-based seismic assessment of skewed bridges". Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Kent, D. C. and Park, R. 1971. "Flexural members with confined concrete". *J. Struct. Div.*, Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=100657>.
- Maragakis, E. A. and Jennings, P. C. 1987. "Analytical models for the rigid body motions of skew bridges". *Earthq. Eng. Struct. Dynam.*, 15(8): 923-944.
- Meng, J. Y. and Lui, E. M. 2000. "Seismic analysis and assessment of a skew highway bridge". *Eng. Struct.*, 22(11): 1433-1452. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00097-8).
- Meng, J. Y. and Lui, E. M. 2002. "Refined stick model for dynamic analysis of skew highway bridges". *J. Bridge Eng.*, 7(3): 184-194.
- Muthukumar, S. 2003. "A contact element approach with hysteresis damping for the analysis and design of pounding in bridges". Retrieved from <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/5286>.
- Nilson, B. G. 2005. "Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones". School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Penzien, J. and Watabe, M. 1974. "Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions". *Earthq. Eng. Struct. Dynam.*, 3(4): 365-373. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290030407>.
- Ramanathan, K. N. 2012. "Next generation seismic fragility curves for California bridges incorporating the evolution in seismic design philosophy". Retrieved from <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/44883>.
- Rigato, A. B. and Medina, R. A. 2007. "Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-storey structures subjected to bi-directional ground motions". *Eng. Struct.*, 29(10): 2593-2601. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.01.008>

- SAP, C. 2008. "CSi Analysis Reference Manual [J]". I: Berkeley (CA, USA): Computers and Structures Inc.
- Shamsabadi, A., Rollins, K. M. and Kapuskar, M. 2007. "Nonlinear soil–abutment–bridge structure interaction for seismic performance-based design". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(6), 707–720. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:6\(707\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:6(707)).
- Taskari, O. and Sextos, A. 2015. "Multi-angle, multi-damage fragility curves for seismic assessment of bridges". *Earthq. Eng. Struct. Dynam.*, 44(13): 2281-2301. <https://doi.org/10.1002/eqe.2584>.
- Torbol, M. and Shinozuka, M. 2012. "Effect of the angle of seismic incidence on the fragility curves of bridges". *Earthqu. Eng. Struct. Dynam.*, 41(14): 2111-2124. <https://doi.org/10.1002/eqe.2197>.
- Wakefield, R. R., Nazmy, A. S. and Billington, D. P. 1991. "Analysis of seismic failure in skew RC bridge". *J. Struct. Eng.*, 117(3): 972-986.
- Zakeri, B. and Ghodrati Amiri, G. 2014. "Probabilistic performance assessment of retrofitted skewed multi span continuous concrete I-girder bridges". *J. Earthq. Eng.*, 18(6): 945-963. <https://doi.org/10.1080/13632469.2014.916241>.

