

اثر زاویه اعمال زلزله و تحریک غیرهمزمان تکیه‌گاهی بر روی پل‌های قوسی بتن آرمه

ادهم قلی‌پور^۱، محمدرضا داودی^۲، حسین یوسف‌پور^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۲- دانشیار (فقید) دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

Email: *hyousefpour@nit.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۱۲/۰۹]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۴/۱۲]

چکیده

با وجود رواج کاربرد پل‌های قوسی در مناطق لرزه‌خیز دنیا، رفتار لرزه‌ای این پل‌ها تاکنون مورد مطالعات محدودی قرار گرفته است. مطالعه حاضر به بررسی آثار تغییر زاویه اعمال زلزله و تحریک غیرهمزمان تکیه‌گاهی بر پل‌های قوسی بتن مسلح می‌پردازد. چهار پل قوسی بتن آرمه ساخته شده در ایران به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده و تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بر اساس ۷ شتاب‌نگاشت قرار گرفتند که هریک از آن‌ها با تغییر زاویه در گام‌های ۱۵ درجه اعمال شدند. تحریک غیرهمزمان تکیه‌گاهی نیز از طریق ایجاد تاخیر زمانی برای رکورد ورودی به هر تکیه‌گاه اعمال شد. نتایج نشان داد که افتادگی عرشه بیش از سایر پارامترها به زاویه اعمال زلزله حساس بوده است. افزایش نیروی محوری پای قوس در اثر رخداد زلزله تا ۴۰ درصد مشاهده شد که بیشترین آن در حالت اعمال زلزله عرضی محاسبه شد. اعمال تاخیر زمانی در تحریک تکیه‌گاه‌های سازه نیز منجر به حداکثر ۱۰ درصد افزایش در معیارهای آسیب و حداکثر ۵ درصد افزایش در نیروی محوری و لنگر خمشی پای قوس شد.

واژگان کلیدی: پل قوسی، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، زاویه اعمال زلزله، تحریک غیرهمزمان تکیه‌گاهی، افتادگی عرشه

۱- مقدمه

پل‌های قوسی یا طاقی یکی از شناخته‌شده‌ترین فرم‌های سازه‌ای هستند که در آن‌ها به دلیل هندسه قوس، مسیری فشاری برای بارهای قائم به تکیه‌گاه‌ها فراهم می‌شود. در عین حال، در این پل‌ها، تکیه‌گاه‌ها عکس‌العمل افقی را تحمل کرده و از رانش پایه‌ها جلوگیری می‌نمایند (شکل ۱). از آنجایی که برای تحمل وزن پل و وزن ترافیک عبوری، قوس در فشار قرار می‌گیرد، این نوع پل‌ها بیش از همه برای مصالحی مناسب هستند که در فشار مقاوم باشند. به همین دلیل کاربرد قوس‌ها در زمانی که مصالح در دسترس بشر محدود به مصالح بنایی بود، رواج فراوانی داشت. امروزه نیز با توسعه کاربرد مصالح قادر به تحمل کشش مورد نیاز سازه (مانند فولاد)، پل‌های قوسی بتن مسلح با هندسه‌های منعطف‌تر و دهانه‌های بزرگتر در نقاط مختلف جهان ساخته می‌شوند [1].

شکل ۱. ساروکار انتقال نیرو در پل قوسی [1]

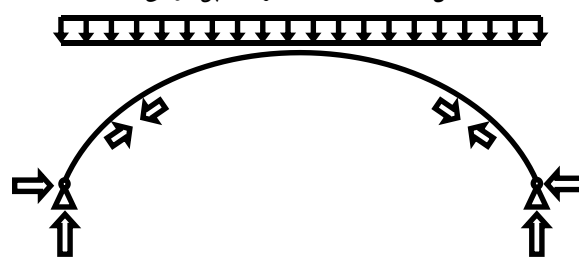


Fig. 1. Force transfer mechanism in an arch bridge [1]

با توجه به سیستم انتقال بار در قوس‌ها، پل‌های قوسی مولفه‌های رفتار لرزه‌ای متمایزی در مقایسه با انواع متداول‌تر پل مانند پل‌های تیر-دال دارند؛ که از جمله‌ی مهمترین آن‌ها می‌توان به وجود نیروی محوری فشاری قابل توجه در قوس، امکان وقوع آسیب در خود قوس به عنوان سیستم باربر اصلی، و تفاوت قابل توجه در سختی درون‌صفحه و برون‌صفحه اشاره نمود. با وجود تفاوت‌های ذکر شده، رفتار لرزه‌ای پل‌های قوسی تاکنون مورد مطالعات بسیار محدودی قرار گرفته است.

کاگلایان و همکاران یک پل قوسی بتن آرمه متشکل از ۳ دهانه ۳۶ متری را تحت دو زلزله کوبه ژاپن و زلزله نزدیک گسل سیهان بررسی نمودند. در مدل‌های مورد استفاده در این

مطالعه، تاثیر تاخیر زمانی در اعمال زلزله به تکیه‌گاه‌های مختلف و همچنین مولفه قائم شتاب زلزله مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تاخیر زمانی وقوع زلزله تاثیر چندانی در نتایج جابه‌جایی‌های به دست آمده در وسط دهانه قوس نداشته، ولی مولفه قائم زلزله تفاوت زیادی در پاسخ جابه‌جایی ایجاد می‌نماید [2].

چاوز و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی رفتار لرزه‌ای یک پل قوسی بتن آرمه از نوع عرشه روگذر با دهانه ۴۰۰ متر تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی پرداختند. پل مورد مطالعه با لحاظ رفتار غیر خطی در هندسه و مصالح مدل‌سازی شده و اثر اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در تحلیل لحاظ شد. نتایج نشان داد که در اثر تغییرات نیروی محوری حین زلزله، رابطه‌ی لنگر - انحنا در قوس‌ها به صورت قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌گیرد [3].

آلوارز و همکاران در سال ۲۰۱۱ اثر تغییرات نیروی محوری را روی شکل پذیری، ظرفیت مقاوم و شکل پذیری قابل انتظار از یک پل قوسی بتن آرمه از نوع عرشه روگذر با دهانه ۴۰۰ متر بررسی نمودند. با کاربرد مدل سه بعدی غیرخطی و آنالیز تاریخچه زمانی، پاسخ سازه تحت ۱۰ زلزله مقیاس شده در سه جهت مختلف بررسی شد. نتایج، تفاوت قابل ملاحظه‌ای را در پاسخ لرزه‌ای پل قوسی ناشی از تغییرات نیروی محوری نشان داد. شکل‌گیری مفاصل پلاستیک در نواحی انتهایی قوس (در نزدیکی تکیه‌گاه) و ابتدا و انتهای پایه‌ها مشاهده شد. همچنین اثر مولفه قائم شتاب زلزله در این مطالعه، حائز اهمیت ارزیابی شد [4].

خان و همکاران در سال ۲۰۱۴ سه پل قوسی بتن آرمه از نوع عرشه روگذر با دهانه‌های ۸۴، ۱۴۰ و ۱۹۶ متری را با روش‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی و استاتیکی غیرخطی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج مقدماتی، جابه‌جایی عرشه و دوران پلاستیک مفاصل به عنوان ملاک ارزیابی انتخاب شدند. با مقایسه نتایج، مشاهده شد اثر مودهای بالاتر قابل توجه بوده و جابه‌جایی عرشه در تحلیل دینامیکی بیشتر از تحلیل استاتیکی غیرخطی به دست آمد. البته جابه‌جایی

قوس در تحلیل دینامیکی کمتر از مقدار تعیین شده توسط روش استاتیکی غیرخطی به دست آمد [5].

فراهانی و مالک در سال ۲۰۱۷ یک پل قوسی بتن آرمه از نوع عرشه روگذر با دهانه ۱۴۰ متری را به صورت سه بعدی مدل سازی کرده و بیشترین جابه جایی های پل را در نقاط بحرانی از جمله محل اتصال انتهای عرشه به تکیه گاه، مرکز قوس، و یک چهارم و سه چهارم قوس ارزیابی نمودند. همچنین، اثر مولفه قائم شتاب زلزله برای ۷ زلزله انتخابی بررسی شد. نتایج نشان داد که در بعضی مقاطع قوس، تا ۱۶٪ تغییرات در نیروی محوری با اعمال مولفه قائم وجود دارد. همچنین برای لنگر خمشی در محل برخورد قوس به یکی از پایه های پل، تحت اثر زلزله قائم ۴۰ درصد تغییرات مشاهده شد [6].

بررسی اثر زاویه اعمال زلزله بر روی پل های متعارف تیر-دال موضوع مطالعات متعددی بوده است که از آن جمله می توان به مطالعات توربل و شینوزوکا در سال ۲۰۱۲ اشاره نمود. در این مطالعه، تاثیر زاویه اعمال زلزله بر منحنی های شکندگی پل های منظم و متقارن تیر-دال بتن آرمه در کالیفرنیا مورد بررسی قرار گرفت. زلزله از زاویه بین ۰ تا ۳۶۰ تغییر داده شد و پل ها به صورت سه بعدی مورد تحلیل دینامیکی غیر خطی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ضعیف ترین جهت، نه زلزله طولی و نه زلزله عرضی بوده و برای بررسی آسیب پذیری پل، اثر زوایای مختلف اعمال زلزله باید مورد توجه قرار گیرد [7].

ساورنواک و همکاران در سال ۲۰۲۰ در تحقیقی به تاثیر تحریک چندگانه بر پاسخ لرزه ای پل های قوسی بتن آرمه پرداختند. در این پژوهش با مطالعه ای موردی برای پل های قوسی بتن آرمه با دهانه های بلند و با عرشه روگذر واقع بر بستر سنگی، اثر تحریک چندگانه برای از دست دادن پیوستگی و آثار گذر موج بر پاسخ سازه پرداخته شد. روش انجام تحلیل، مطالعه عددی با استفاده از آنالیز تاریخیچه زمانی، روش طیف پاسخ و روش ساده سازی منطبق بر استاندارد زلزله اروپا بود. پاسخ تحلیل ها تاثیر اعمال چندگانه و همزمان زلزله با وابستگی آن ها بر مقادیر پاسخ در

موقعیت های مختلف قوس و رکوردهای زلزله انتخابی را به اثبات رساند. نتایج نشان داد که تحریک چندگانه تکیه گاه تاثیر مخربی بر پاسخ های بیشتر پل ها با دهانه های بلند ایجاد می کند [8].

رضایی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تاثیر تغییر زاویه اعمال زلزله بر شکندگی لرزه ای پل های جعبه ای بتن آرمه با نامنظمی در ارتفاع پایه ها پرداختند. هشت پل نامنظم در ارتفاع در دو دسته چهار تایی به صورت ۳ دهانه و ۴ دهانه به صورت سه بعدی مدل شدند. عدم قطعیت های مورد بررسی شامل تغییرات در هندسه، مشخصات مکانیکی و زاویه اعمال بار زلزله بوده است. با توجه به منحنی های شکندگی لرزه ای گزارش شد که تغییر زاویه وقوع زلزله در تکیه گاه های الاستومری اثر زیادی داشته ولی کمترین تاثیر را بر شکل پذیری ستون ها دارد [9].

اسکاتارجیا و همکاران در سال ۲۰۲۲ تحقیقی بر مبنای آنالیز فروریزش روی یک پل قوسی بتن آرمه چند دهانه در ایتالیا انجام دادند که با دهانه ۲۶۰ متر در سال ۲۰۲۰ به طور اتفاقی فرو ریخته بود. در این مطالعه، آن ها به علل وقوع این حادثه با استفاده از مشاهدات گسیختگی و مطالعه عددی با روش المان کاربردی (AEM) پرداختند که امکان مدلسازی انتشار آسیب و شکست تدریجی آن را تا زمان فروریزش کامل فراهم می کند. ارتباط نسبتاً خوبی بین موارد پیش بینی شده با آسیب مشاهده شده و توزیع آن برای یکی از مدل ها یافت شد [10].

با وجود مطالعات ذکر شده، همچنان شناخت محدودی از رفتار لرزه ای پل های قوسی، به ویژه در مقایسه با پل های تیر-دال بتن مسلح وجود دارد و به طور خاص، اثر اعمال زلزله در زوایایی غیر از زوایای متعامد اصلی در این پل ها به اندازه کافی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین، مطالعات انجام شده در خصوص اثر تاخیر زمانی و تحریک غیرهمزمان تکیه گاه ها روی پل های قوسی محدود بوده و در این زمینه نیاز به تحقیقات روی پل های بیشتر با دهانه های متفاوت، به ویژه با جزئیات واقعی وجود دارد. بر همین اساس، در مطالعه حاضر تلاش می شود تا با بررسی عملکرد

Span to rise ratio	3.47	5.30	2.98	2.54
--------------------	------	------	------	------

Table 2. Geometrical properties of investigated bridges

شکل ۲. نمای کلی پل‌های مورد بررسی: الف) سیاه‌بیشه؛ ب) گزنک؛ ج) وانا؛ و د) زیاربغ.

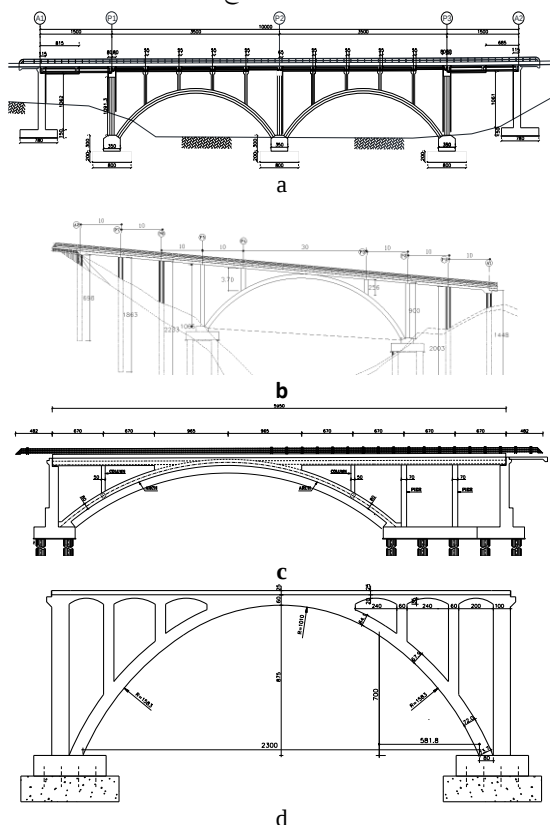


Fig. 2. General layout of the studied bridges: a) Siah-Bisheh; b) Gazanak; c) Vana; and d) Ziariabagh.

۳- مدل‌سازی و تحلیل

هریک از چهار پل به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار SeismoStruct V. 20 [11] با استفاده از المان‌های رشته‌ای مدل‌سازی شدند. در شکل (۳) تصویر مدل پل‌ها در نرم‌افزار نشان داده شده است.

برای مشخصات مکانیکی اجزای این پل‌ها از مدل‌های رفتاری نشان داده شده در جدول (۳) استفاده شد. همان‌گونه که در این جدول نشان داده شده، پایه‌های پل و قوس با استفاده از المان‌های تیر-ستون بر مبنای جابه‌جایی مدل‌سازی شدند که در آن‌ها رفتار غیرخطی بتن و فولاد از طریق المان‌های رشته‌ای شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به تحلیل‌های اولیه، و به

لرزه‌ای چهار پل قوسی واقعی در ایران که در سال‌های اخیر ساخته شده‌اند، به بررسی این پارامترها پرداخته شود.

۲- معرفی پل‌های مورد بررسی

در این مطالعه، از نقشه‌های اجرایی چهار پل قوسی بتن آرمه با عرشه روگذر سیاه‌بیشه، گزنک، وانا و زیاربغ استفاده شد که همگی در ۱۵ سال اخیر در محور هراز ایران ساخته شده‌اند. در شکل (۲)، نمای کلی هر یک از چهار پل ترسیم شده است و در جداول (۱ و ۲) به ترتیب مشخصات مکانیکی مصالح و مشخصات هندسی پل‌ها به تفکیک آمده است. مدول الاستیسیته برای فولاد میلگرد در تمامی پل‌ها برابر با $2.1 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2}$ فرض شد.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی مصالح پل‌ها (به kg/cm^2)

Mechanical Properties	Gazanak	Vana	Siah bisheh	Ziar bagh
Rebar yield strength	4000	4000	4000	4000
Compressive strength (slab concrete)	300	280	240	300
Compressive strength (girders)	300	280	240	300
Compressive strength (arch and piers)	300	280	280	350
Modulus of elasticity of concrete (arch and piers)	260000	251000	251000	281000
Compressive strength (foundations)	300	280	240	300

Table 1. Material properties of investigated bridges (kg/cm^2)

جدول ۲. مشخصات هندسی پل‌ها

Property	Gazanak	Vana	Siah-bisheh	Ziar-bagh
Year built	2015	2013	2008	2009
No. of arch spans	1	1	2	1
No. of non-arch spans	5	2	2	0
Arch span length (m)	50	45	35	23
Bridge Length (m)	100	59.5	100	26

محصورشدگی بتن ناشی از کاربرد آرماتورهای عرضی با استفاده از اصلاح رفتار تنش-کرنش بتن و توانمندی نرم‌افزار شبیه‌سازی گردید. برای شبیه‌سازی تکیه‌گاه‌های الاستومری مورد استفاده بین عرشه و پایه‌ها، از المان‌های Link استفاده شد. رفتار این تکیه‌گاه‌ها در جهت قائم و در برابر دوران به صورت الاستیک و در برابر تغییر شکل برشی به صورت دوخطی الاستیک-پلاستیک کامل فرض شد. در قسمت الاستیک رفتار، فرض شد که سختی افقی (برشی) K_u ، سختی قائم (محوری) K_v ، و سختی دورانی K_θ به ترتیب از روابط ۱، ۲، و ۳ به دست آید که در آن‌ها a بعد تکیه‌گاه در پلان، A مساحت تکیه‌گاهی، t ضخامت، n تعداد لایه‌های الاستومری، G مدول برشی ماده الاستومر، و C و C' ضرایب شکل می‌باشند.

جدول ۳. رفتار اعضا و المان‌های مختلف در مدل‌سازی

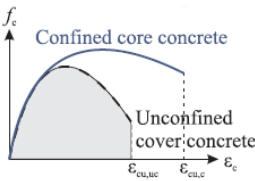
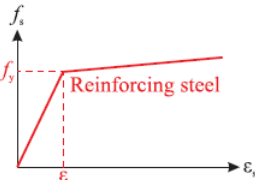
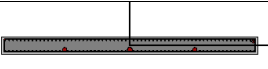
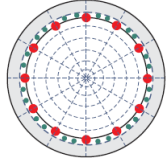
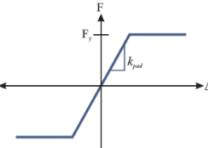
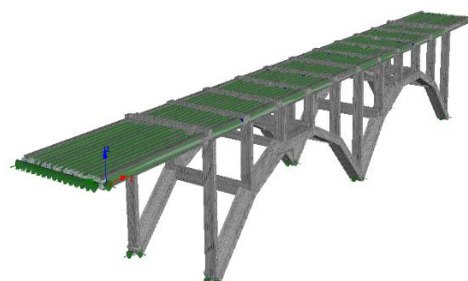
Members and materials	Modeling assumption	Behavior and section diagram
Concrete	Chang and Mander (1994) [13]	
Rebar	Isotropic strain hardening according to Menegotto and Pinto (1973) [14]	
Deck	Elastic Beam-column	
Pier	Nonlinear Beam-column with fiber section	
Elastomeric Bearing	Elastic perfectly plastic behavior	

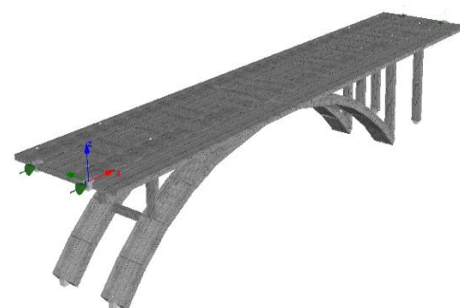
Table 3. Assumed behavior for members, materials and elements

منظور ایجاد توازن بین زمان تحلیل و دقت نتایج، در مقطع قوس و هر یک از پایه‌ها بین ۸۷۵ و ۱۵۰ المان رشته‌ای فرض شد.

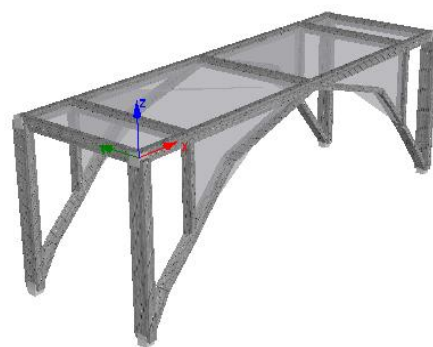
شکل ۳. مدل سه بعدی پل‌ها در نرم افزار



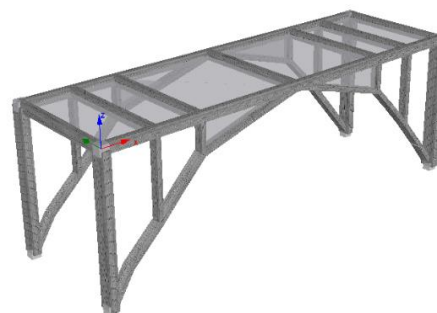
Siahbisheh



Vana



Gazanak



Ziarbagh

Fig. 3. 3D models of investigated bridges in Seismostruct

همکاران

انجام شد و پارامترهای پاسخ سازه در دو نرم‌افزار مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاکی از اختلاف کمتر از ۵ درصد بین پاسخ‌ها بود و در نتیجه، نتایج مدل قابل اعتماد ارزیابی شد.

برای انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی از هفت شتاب‌نگاشت زلزله دور از گسل از FEMA P695 [15] مطابق جدول (۵) استفاده شد. تمامی پل‌ها در مناطقی با خاک نوع ۲ (دارای سرعت موج برشی بین ۳۶۰ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه) قرار دارند، که در دسته C تقسیم بندی می‌شوند. با توجه به محدودیت تعداد زلزله‌های ثبت شده روی خاک نوع مزبور در FEMA P695، از یک رکورد خاک نوع D با سرعت موج برشی ۳۵۶ متر بر ثانیه نیز استفاده شد که به سرعت حداقلی محدوده C نزدیک است. در نتیجه تعداد حداقل ۷ شتاب‌نگاشت برای تحلیل دینامیکی غیرخطی با توجه به ملزومات ASCE/SEI 2010 [16] فراهم شد.

جدول ۵. مشخصات رکوردهای انتخابی

Year	Event name (station)	M _w	Fault Distance (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	Site shear wave velocity (cm/s)
1994	Northridge (Beverly Hills – Mulhol)	6.7	13.3	0.52	63	356
1999	Hector Mine (Hector)	7.1	26.4	0.34	42	385
1995	Kobe (Nishi-Akashi)	6.9	8.7	0.51	37	609
1999	Kocaeli (Arcelik)	7.5	53.7	0.22	40	523
1990	Manjil (Abbar)	7.4	40.4	0.51	54	724
1999	Chi-Chi (TCU045)	7.6	77.5	0.51	39	705
1976	Friuli (Tolmezzo)	6.5	20.2	0.35	31	425

Table 5. Properties of selected records

$$K_u = \frac{(GA)}{(nt)} \quad (1)$$

$$K_v = \frac{(GAa^2)}{(Cnt^3)} \quad (2)$$

$$K_\theta = \frac{(GAa^2)}{(C'nt^3)} \quad (3)$$

در جهت افقی، فرض شد که نیروی تسلیم (F_y) از ضرب نیروی عکس العمل عمودی (N) با واحد نیوتن در ضریب اصطکاک μ بر اساس رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$F_y = \mu N \quad (4)$$

مقدار ضریب اصطکاک برحسب تنش نرمال (σ_n) برحسب مگاپاسکال با توجه به نتایج تحقیقات چارج [12] با کاربرد معادله ۵ تعیین شد.

$$\mu = 0.05 + \frac{0.4}{\sigma_n} \quad (5)$$

همان‌گونه که در شکل (۳) دیده می‌شود، مدل هر یک از پل‌ها از ماکروالمان‌هایی به طول بین ۱/۵ و ۲ متر تشکیل شده است. در مدلسازی این پل‌ها فقط اثر بار مرده در زمان اعمال بار زلزله لحاظ شد. پس از مدلسازی و انجام آنالیز مودال، دوره تناوب اصلی پل‌ها تعیین شد که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. دوره تناوب پل‌ها

Bridge	T _{Long} (s)	T _{Trans} (s)
Gazanak	0.64	0.68
Vana	0.49	0.56
Siahbisheh	0.73	0.73
Ziarbagh	0.43	0.45

Table 4. Natural periods of investigated bridges

برای اطمینان از عملکرد مناسب مدل، مدلسازی همزمان در دو نرم‌افزار SAP 2000 و Seismostruct برای پل سیاه‌بیشه

$$EI = \frac{M_{1y}}{\phi_{1y}} \quad (۷)$$

همچنین با توجه به رابطه ۸ انحنا تسلیم مقطع محاسبه شد که از آن در رابطه ۷ استفاده می‌شود.

$$\phi_y = \frac{M_n}{EI} \quad (۸)$$

پ) افتادگی عرشه نسبت به کوله یکی از مهم‌ترین آسیب‌های وارد بر کوله پل‌ها می‌باشد که احتمال فروافتادن عرشه در اثر تغییر مکان‌های نسبی بزرگ ایجاد شده بین روسازه و نشیمن‌گاه کوله یا در اثر تغییر مکان زیاد کوله را نشان می‌دهد و برای تعیین این معیار آسیب از تفاضل جابجایی عرضی کوله و عرشه پل استفاده شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱-۱- نتایج تحلیل به تفکیک معیارهای آسیب

در این قسمت، نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی در پل‌های مورد مطالعه بر اساس جابجایی نسبی (دریفت)، انحنا، شکل‌پذیری انحنا، و افتادگی عرشه گزارش شده است. برای اختصار، از بین خروجی‌های متعدد استخراج شده از پل‌ها، رکوردهای زلزله، و معیارهای آسیب مختلف، فقط مقادیر نمونه در این مقاله ارائه شده است.

۴-۱-۱-۱- جابجایی نسبی (دریفت) ستون‌ها

در شکل (۵) تاریخچه زمانی جابجایی نسبی (دریفت) ستون میانی پل سیاه‌پیشه تحت زلزله‌ی کوبه با ۴ زاویه اعمال ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که هر چه زلزله به سمت هم‌امتداد بودن با محور طولی قوس میل کند تا حدی پاسخ‌های کوچکتری به دست می‌آید؛ به طوری‌که تحت زاویه‌های ۰ و ۹۰ درجه، بیشترین دریفت ۲/۸۸ و ۳/۴۴ درصد بوده است. با این وجود، تفاوت مذکور چندان قابل توجه نبوده و به نظر می‌رسد بیشترین دریفت ستون‌ها حساسیت نسبتاً کمی به زاویه اعمال زلزله دارد.

مهم‌ترین خروجی‌های تحلیل (ناشی از معیارهای مختلف آسیب) در این مطالعه عبارت بودند از: الف) جابجایی نسبی (دریفت) ستون‌ها؛ ب) انحنا و شکل‌پذیری انحنا ابتدا و انتهای ستون‌ها و نقاط مهم قوس (ابتدا، یک‌چهارم، مرکز، سه‌چهارم و انتهای قوس)؛ پ) افتادگی عرشه از روی کوله و جابجایی عرضی کوله؛ و ت) نیروهای محوری و لنگرهای خمشی در مقاطع مختلف قوس. جابجایی نسبی ستون‌ها (دریفت) از نسبت تفاضل جابجایی در ابتدا و انتهای ستون به طول ستون به دست آمد. شکل‌پذیری انحنا (μ_ϕ) نیز از رابطه ۶ تعیین شد.

$$\mu_\phi = \frac{\phi}{\phi_y} \quad (۶)$$

که در آن، ϕ انحنا موجود و ϕ_y انحنا تسلیم مقطع می‌باشند. با تحلیل لنگر-انحنا در نرم‌افزار Response2000 [17] مقادیر پارامترهای M_{1y} ، M_n ، ϕ_{1y} و ϕ_y طبق تعریف شکل (۴) به دست آمد که M_n لنگر پلاستیک اسمی مقطع، M_{1y} لنگر متناظر با رخداد اولین تسلیم خمشی و ϕ_{1y} انحنا متناظر با اولین تسلیم خمشی می‌باشند.

شکل ۴. نمودار لنگر-انحنا و تقریب دوطبقی

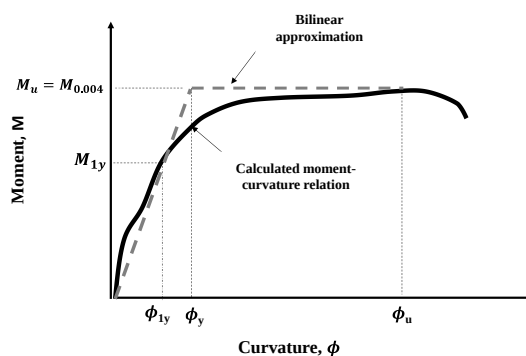


Fig. 4. Moment-curvature diagram and bilinear approximation

مقدار لنگر پلاستیک مقطع، معادل لنگر متناظر با رسیدن کرنش نهایی بتن به مقدار ۰/۰۰۴- فرض شد. طبق رابطه ۷ مقدار صلبیت خمشی (EI) بر اساس مقدار لنگر و انحنا متناظر با رخداد اولین تسلیم خمشی، به دست می‌آید.

در شکل (۶) در دو بخش a و b به ترتیب انحنا و شکل-پذیری انحنای مرکز قوس هر یک از ۴ پل مورد مطالعه با چهار زاویه ۰، ۳۰، ۶۰ و ۷۵ درجه تحت زلزله منجیل و کوچنلی مقایسه شده است.

شکل ۶. (a) نسبت انحنای مرکز قوس پل‌ها تحت زوایای مختلف به مقدار متناظر در زاویه اعمال ۹۰ درجه تحت زلزله منجیل و (b) نسبت شکل‌پذیری انحنای مرکز قوس پل‌ها تحت زوایای مختلف به مقدار متناظر به زاویه ۹۰ درجه تحت زلزله کوچنلی

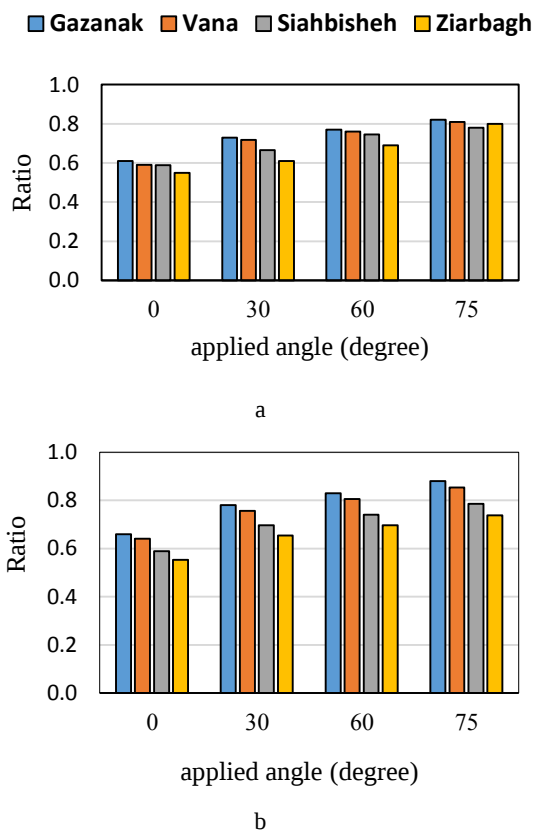


Fig. 6. (a) Ratio of curvature at arch midspan under the 90-degree incidence angle under the Manjil earthquake; (b) Ratio of curvature ductility demand at arch midspan under different incidence angles to the value corresponding to the 90-degree angle under the Kocaeli earthquake

همان‌طور که شکل (۶) نشان می‌دهد، با افزایش زاویه اعمال زلزله نسبت به امتداد طولی پل، انحنا و شکل‌پذیری انحنا برای هر چهار پل افزایش می‌یابد. در پل‌های با دهانه قوس بزرگتر، این تفاوت محسوس‌تر است؛ چرا که انتظار می‌رود با افزایش دهانه قوس، تفاوت بیشتری در سختی طولی و عرضی پل

شکل ۵. نمودار دریفت - زمان ستون میانی پل سیاه‌پیشه با زاویه‌ی الف)

۹۰ (ب) ۶۰ (ج) ۳۰ و د) ۰ درجه تحت زلزله‌ی کوبه

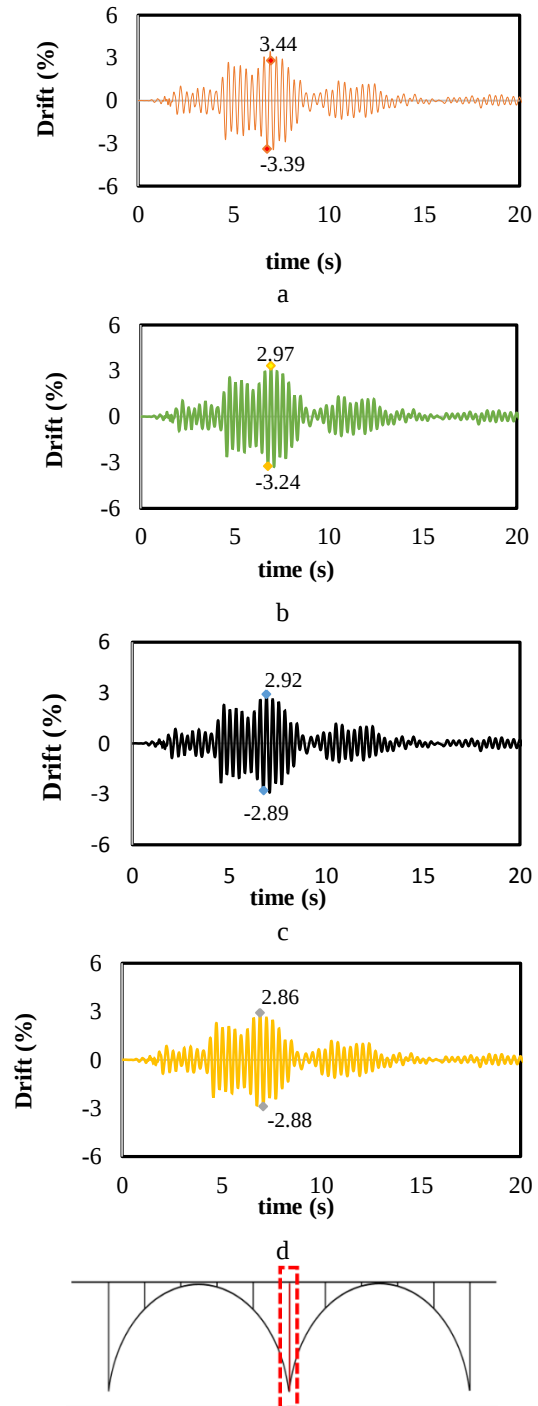


Fig 5. Drift history of the middle column of the Siahbisheh bridge with the applied angles of: a) 90; b) 60; c) 30; and d) 0 degrees under the Kobe earthquake.

۴-۱-۲- انحنا و شکل‌پذیری انحنا

شکل (۸) به عنوان نمونه، تغییرات نیروی محوری پای قوس را تحت زلزله چی چی اعمال شده به صورت عرضی برای چهار پل مورد بررسی نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، نیروی محوری پای قوس پیش از اعمال زلزله تنها در اثر بارهای مرده بوده و روند تغییرات کلی آن به صورت افزایش به موازات افزایش طول دهانه است. البته در خصوص پل سیاه‌بیشه که دارای دو دهانه قوسی می‌باشد، میزان بار محوری ناشی از بار مرده از الگوی مزبور پیروی نمی‌کند.

شکل ۸. نمودار تغییرات نیروی محوری در پای قوس پل‌های بررسی

شده تحت زلزله ی چی چی اعمال شده در جهت عرضی

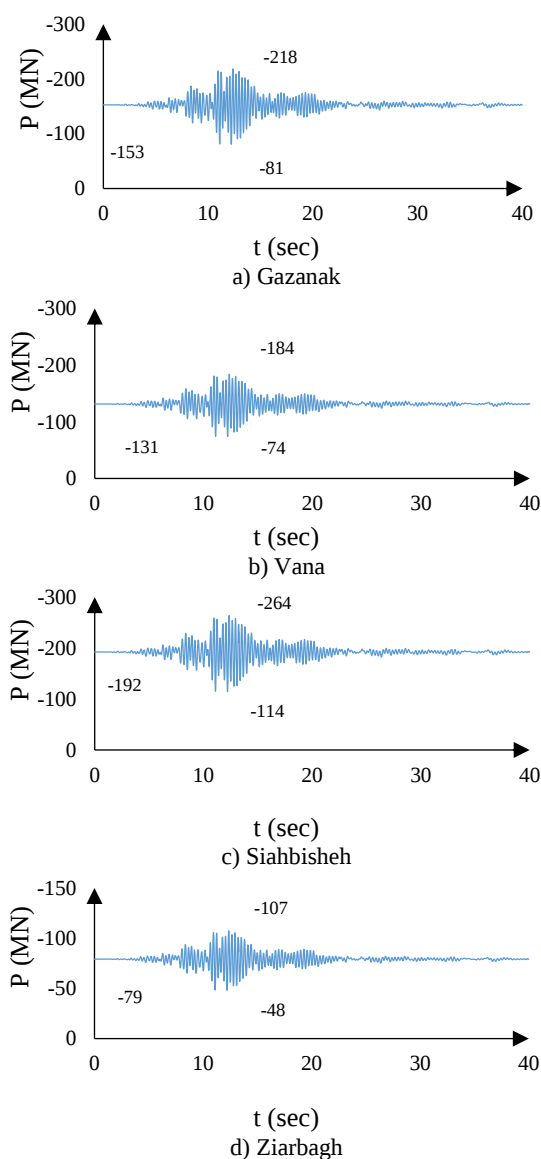


Fig. 8. Changes in the axial force at arch abutments under the Chi-Chi earthquake applied in the transverse direction.

ایجاد شده و در نتیجه، تغییر در زاویه اعمال زلزله به پل، تغییر بزرگتری را در پارامترهای رفتار دینامیکی ایجاد نماید. در شکل a، تغییرات انحنا از نسبت ۰.۶۱ با زاویه ۰ شروع شده و برای زاویه ۷۵ درجه این نسبت به مقدار ۰.۸۲ افزایش می‌یابد و در شکل b، مقدار نسبت شکل‌پذیری انحنا از ۰.۶۶ برای زلزله افقی شروع شده و تا عدد ۰.۸۸ برای زلزله تحت زاویه ۷۵ درجه افزایش می‌یابد. نتایج کلی برای سایر رکوردهای زلزله نیز نسبتاً مشابه بوده‌اند.

۳-۱-۴- افتادگی عرشه از روی کوله

در شکل (۷)، نسبت افتادگی عرشه از روی کوله پل‌ها تحت زلزله نورث‌ریج در زوایای مختلف به مقدار متناظر آن در زاویه ۹۰ (زلزله عرضی)، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر چه زوایای زلزله ورودی افزایش می‌یابد این نسبت نیز افزایش یافته است، به طوری‌که تحت زاویه ۰ درجه (زلزله طولی)، میزان جابه‌جایی نسبی ۰.۴۶، جابه‌جایی نسبی در حالت ۹۰ درجه است. هر چه دهانه قوس افزایش می‌یابد این نسبت برای هر یک از پل‌ها و تحت هر زاویه نیز افزایش می‌یابد. نتایج کلی نسبتاً مشابهی برای سایر رکوردهای زلزله مشاهده شد.

شکل ۷. نسبت افتادگی عرشه از کوله تحت زوایای مختلف به مقدار

متناظر تحت زاویه ۹۰ تحت زلزله ی نورث‌ریج

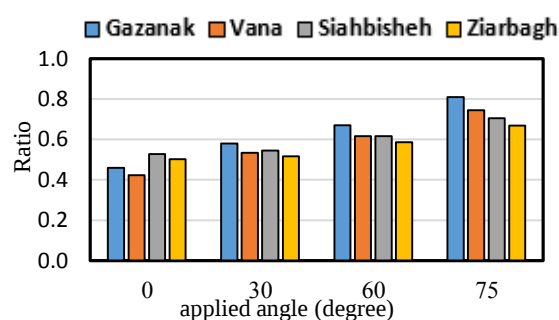


Fig. 7. Ratio of abutment unseating under different angles to that with the application angle of 90 degrees under the Northridge earthquake.

۲-۴- تغییرات نیروی محوری قوس حین زلزله

همکاران

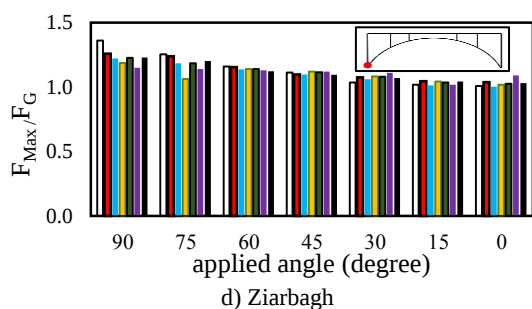


Fig. 9. Ratio of maximum axial force during earthquake at abutments to that under gravity loads

شکل (۹) همچنین نشان می‌دهد که زلزله در جهت عرضی تاثیر قابل توجه‌تری روی نیروهای محوری موجود در قوس می‌گذارد و به طور کلی با کوچکتر شدن زاویه بین امتداد اعمال زلزله و محور طولی پل، تاثیر پذیری نیروی محوری قوس از زلزله رو به کاهش می‌گذارد.

۳-۴- تاثیر تحریک غیرهمزمان تکیه‌گاهی

باتوجه به خاک منطقه مورد مطالعه (C) و با فرض سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه، تفاوت زمان بین تحریک نقاط تکیه‌گاهی از طریق تقسیم فاصله آن‌ها بر سرعت موج برشی به دست آمده و مطابق مقادیر جدول (۶) اعمال شد. بیشتر این مقدار تاخیر زمانی در یک دهانه برای پل گزنک با توجه به رابطه گفته شده، مقدار ۰٫۱۲۵ ثانیه محاسبه شد.

جدول ۶. تاخیر زمانی زلزله برای هر دهانه پل‌های مورد مطالعه

Bridge	Arch span length (m)	Non-arch span length (m)	Delay in arch span (s)	Delay in non-arch span (s)
Gazanak	50	10	0.1250	0.02500
Vana	45	6.7	0.1125	0.01675
Siahbisheh	35	15	0.0875	0.03750
Ziarbagh	23	-	0.0575	-

Table 6. Earthquake time delays in one span of each bridge

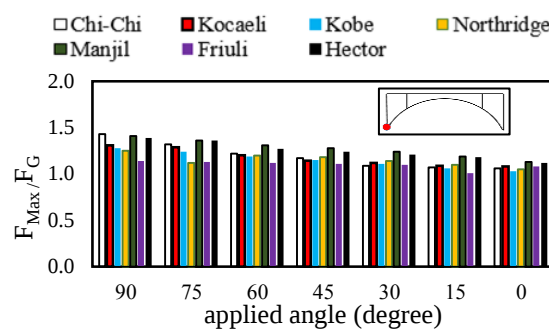
در شکل (۱۰) اثر اعمال تاخیر زمانی روی دریافت پایه‌ها، انحنای مرکز قوس، شکل‌پذیری انحنای انتهای قوس، و افتادگی عرشه در هر چهار پل مورد بررسی تحت زاویه ۰

در عین حال، شکل (۸) تغییرات قابل توجه نیروی محوری را در مقایسه با نیروی محوری ثقلی در اثر اعمال زلزله نشان می‌دهد. نتایج مشابهی برای هر چهار پل مورد بررسی در تمامی رکوردهای زلزله مورد بررسی مشاهده شد که در شکل (۹) در قالب نسبت بیشترین نیروی محوری فشاری پای قوس به نیروی فشاری ناشی از بارهای ثقلی ارائه شده است.

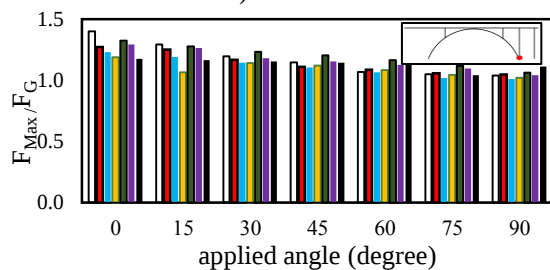
در بین پل‌ها و رکوردهای مورد بررسی، حداکثر ۴۰ درصد افزایش در نیروی محوری پای قوس در اثر زلزله مشاهده می‌شود. همچنین به نظر می‌رسد که هر چه دهانه قوس افزایش یابد، مقادیر نسبت نیروی محوری فشاری حداکثر به نیروی محوری ناشی از ثقل افزایش می‌یابد.

شکل ۹: نسبت حداکثر نیروی محوری پای قوس به نیروی محوری ناشی

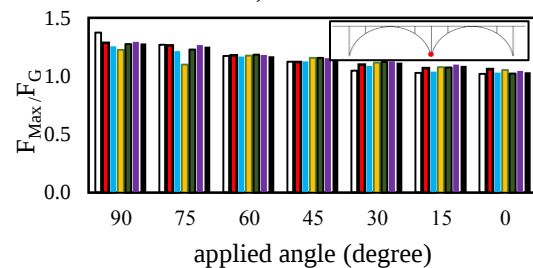
از بارهای ثقلی تحت زلزله‌های مختلف



a) Gazanak



b) Vana



c) Siahbisheh

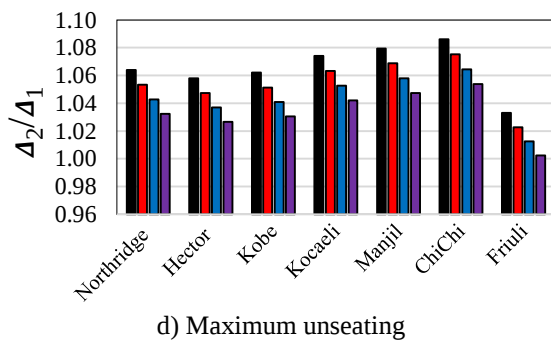
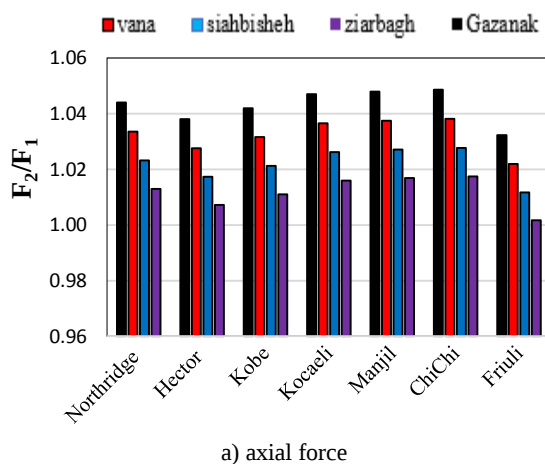


Fig. 10. Effect of time delay on different damage criteria for the investigated bridges

برای پل‌ها و رکوردهای مورد بررسی در این مطالعه، بیشترین افزایش پارامتر آسیب در اثر اعمال تاخیر زمانی، ۱۰ درصد بوده است. شایان ذکر است که حساسیت هر چهار پارامتر مورد بررسی به اثر تاخیر زمانی نسبتاً مشابه بوده است.

شکل (۱۱) تاثیر اعمال تاخیر زمانی را روی نیروی محوری و لنگر خمشی در انتهای قوس نشان می‌دهد. روند کلی تغییرات برای این دو پارامتر، مشابه با تغییرات معیارهای آسیب می‌باشد. با این وجود، مشاهده می‌شود که حساسیت نیروی محوری و لنگر خمشی به تاخیر زمانی کمتر بوده و به ۵ درصد محدود می‌شود.

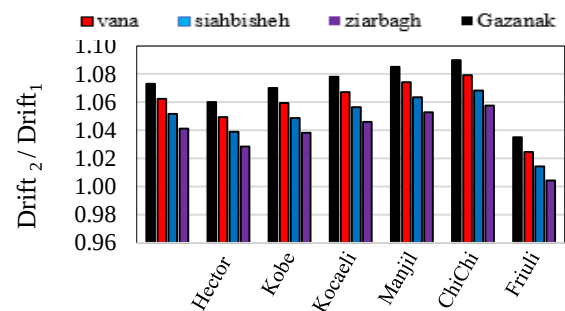
شکل ۱۱. تاثیر اعمال تاخیر زمانی بر روی نیروی محوری و لنگر خمشی در انتهای قوس تحت زلزله‌های مختلف



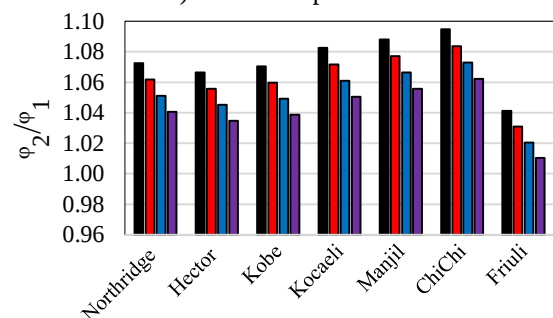
درجه (زلزله هم امتداد با راستای طولی پل) نشان داده شده است. در این شکل، محور قائم نسبت بیشترین پارامتر آسیب مورد بررسی در حالت تحریک غیرهمزمان را به حداکثر همان پارامتر در حالت تحریک همزمان نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، تاخیر زمانی همیشه باعث افزایش پارامتر آسیب مورد بررسی شده است که این افزایش با میزان تاخیر زمانی و در نتیجه با طول دهانه رابطه‌ی مستقیم دارد؛ به طوری که بیشترین و کمترین افزایش به ترتیب در پل‌های گزنک و زیاربغ مشاهده می‌شود که بیشترین و کمترین دهانه را داشته‌اند.

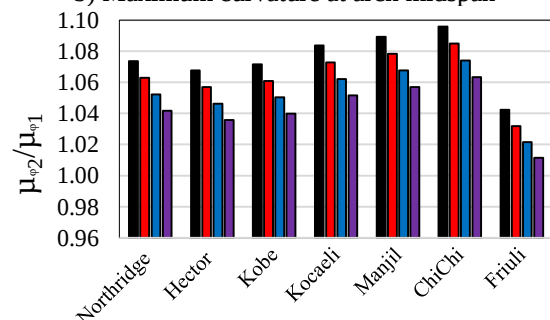
شکل ۱۰. تاثیر اعمال تاخیر زمانی بر روی معیارهای مختلف آسیب برای چهار پل مورد بررسی تحت زلزله‌های مختلف



a) Maximum pier drift



b) Maximum curvature at arch midspan



c) Maximum curvature ductility demand at abutments

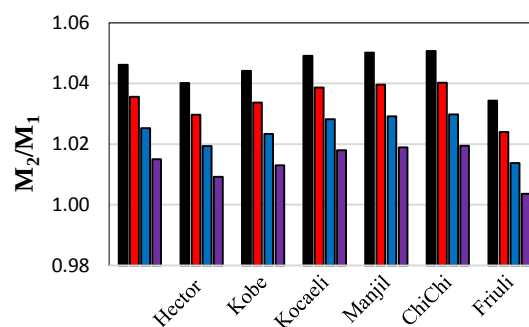
همکاران

۳- تاخیر زمانی (تحریک غیر هم زمان نقاط تکیه گاهی) باعث افزایش معیارهای آسیب می شود. حساسیت معیارهای آسیب مختلف در این مطالعه (دریفت، انحناء، و افتادگی) به اثر تاخیر زمانی نسبتاً مشابه بوده است. برای پل ها و رکوردهای مورد بررسی در این مطالعه، حداکثر ۱۰ درصد افزایش در پارامتر آسیب در اثر اعمال تاخیر زمانی مشاهده شد. روند کلی تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی در اثر اعمال تاخیر زمانی نیز مشابه با تغییرات معیارهای آسیب می باشد؛ البته تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی در اثر اعمال تاخیر زمانی کوچکتر بوده و به ۵ درصد محدود شد.

مقاله حاضر از نخستین مطالعات جامع در خصوص اثر زاویه اعمال زلزله و تاخیر زمانی در پل های قوسی بتنی با دهانه متعارف در ایران بر اساس جزئیات بندی واقعی می باشد. با توجه به محدودیت دانش فنی در خصوص پل های قوسی بتنی، نتایج ارائه شده در این مقاله می تواند در راستای راهنمایی مهندسان طراح در خصوص اهمیت پدیده های مزبور در طرح این نوع از پل ها بسیار مفید واقع شود. برای تحقیقات آینده پیشنهاد می شود تا این مطالعات روی طیف وسیع تری از پل های قوسی تکرار شود تا از عمومیت نتایج در ساختارها و آرایش های مختلف اطمینان حاصل شود.

مراجع

1. Yousefpour H, Gallardo JM, Helwig TA, Bayrak O. Innovative precast, prestressed concrete network arches: Elastic response during construction. Struct Concr. 2017.
2. Caglayan, B.Ozden., Ozakgul, K., and Tezer, O.; "Effect of Ground Motion Characteristics on the Seismic Response of a Monumental Concrete Arch Bridge" Seismic Engineering Conference Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake, 2008.
3. Chavez, H. and Alvarez, Jose J.; "Seismic Performance of A Long Span Arch Bridge Taking Account of Fluctuation of Axial Force." The 14th World Conference of Earthquake Engineering, Beijing, China, October 2008.
4. Alvarez, J.J., Aparicio, A.C., Jara, J.M., Jara, M.; "Seismic assessment of a long-span arch bridge



b) bending moment

Fig. 11. Effect of time delay on the axial force and bending moment at abutments under different earthquakes

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، تاثیر زاویه اعمال زلزله و تحریک غیرهمزمان نقاط تکیه گاهی روی رفتار پل های قوسی بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج به دست آمده از بررسی پارامترهای خروجی تحلیل به شرح زیر می باشد:

۱- آسیب پذیری پل های قوسی در برابر زلزله تابعی از زاویه اعمال زلزله به آن می باشد و این پل ها در برابر زلزله عرضی آسیب پذیرتر از زلزله طولی می باشند. از بین شاخص های آسیب، دریفت پایه ها کمترین حساسیت و افتادگی عرشه از روی کوله بیشترین حساسیت را به زاویه اعمال زلزله داشته اند. تغییر در دریفت حداکثر پایه ها در اثر تغییر زاویه کمتر از ۵ درصد بوده ولی برای افتادگی عرشه به ۴۰ درصد می رسد.

۲- نیروی محوری پای قوس در اثر زلزله دستخوش تغییرات قابل توجهی می شود که در بین پل ها و رکوردهای مورد بررسی، این تغییر، حداکثر ۴۰ درصد بوده است. هر چه دهانه قوس افزایش یابد، تغییرات نسبی نیروی محوری در اثر زلزله نیز تشدید می شود. زلزله در جهت عرضی تاثیر قابل توجه تری روی نیروهای محوری پای قوس داشته و با کاهش زاویه بین امتداد اعمال زلزله و محور طولی پل، تاثیر پذیری نیروی محوری قوس از رخداد زلزله کاهش می یابد.

11. Seismosoft, "SeismoStruct 2020 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. <http://seismosoft.com/>."
12. Scharge, L. "Anchoring of bearings by friction, joint sealing and bearing systems for concrete structures." World congress on joints and bearings. Vol. 1. 1981.
13. Chang G, Mander J. "Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: Part I-Evaluation of seismic capacity." 1994.
14. Menegotto, M., and P. E. Pinto. "Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic of elements under combined normal force and bending." Proceedings, IABSE symposium. 1973.
15. Applied Technology Council. Quantification of building seismic performance factors (FEMA P695). US Department of Homeland Security, FEMA, 2009.
16. American Society of Civil Engineers. "Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures." American Society of Civil Engineers (ASCE), 2010.
17. E.C. Bentz, Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members, PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, ON, Canada, 184. 2000.
- considering the variation in axial forces induced by earthquakes." Engineering Structures, 2012.
5. Khan, E., Sullivan, T., and Kowalsky, M.; "Direct Displacement-Based Seismic Design of Reinforced Concrete Arch Bridges." Journal of Bridge Engineering (ASCE), 2014.
6. Farahani, E. M., Maalek, Sh; "An investigation of the seismic behavior of a deck-type reinforced concrete arch bridge." Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017.
7. Torbol, M., & Shinozuka, M. Effect of the angle of seismic incidence on the fragility curves of bridges. Earthquake engineering & structural dynamics, 41(14), 2111-2124, 2012.
8. Savor Novak, Marta, Damir Lazarevic, Josip Atalic, and Mario Uros. "Influence of multiple-support excitation on seismic response of reinforced concrete arch bridges." Applied Sciences 10, no. 1. 17, 2020.
9. Rezaei, H., Arabestani, S., Akbari, R., & Noroozinejad Farsangi, E. The effects of earthquake incidence angle on the seismic fragility of reinforced concrete box-girder bridges of unequal pier heights. Structure and Infrastructure Engineering, 2022.
10. Scattarreggia, N, et al. "Collapse analysis of the multi-span reinforced concrete arch bridge of Capriogliola, Italy." Engineering Structures 251 2022.

Effects of Earthquake Incidence Angle and Asynchronous Support Excitation on Reinforced Concrete Arch Bridges

A. Gholipour¹, M. Davoodi², H. Yousefpour³

1- PhD Candidate, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Associate Professor (Deceased), Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- Associate Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

Email: *hyousefpour@nit.ac.ir

Abstract:

Arches are one of the most recognized structural forms, which are capable of transferring vertical loads to the supports through a compressive path. In addition to possessing desirable aesthetics, their force transfer mechanism makes arches especially suitable for materials that are weak in tension but strong in compression, such as concrete. With the advent of reinforced concrete, significant flexibility has been introduced to the design of concrete arches, due to which many reinforced concrete arch bridges have been built around the world, including in the high-seismicity regions. Notable damage has been documented in several arch bridges during past earthquakes, such as the Chi-Chi or Wenchuan earthquakes. In these earthquakes, undesirable cracking within the arch itself or in the lateral bracing elements was detected in arch bridges. Certain aspects of seismic behavior of arch bridges are different from those in typical slab-on-girder bridges, including the significance of axial loads, which may change during earthquakes, sizable differences between in-plane and out-of-plane stiffness, and the use of piers with different heights. However, limited previous studies have addressed the seismic behavior of concrete arch bridges. In particular, the effect of earthquake excitation in directions other than the principal directions of arch bridges has not been sufficiently investigated. Moreover, the effect of asynchronous support excitation has not been examined in detail for arch bridges. In the present study, the effects of earthquake incidence angle and asynchronous support excitation on reinforced concrete arch bridges are investigated. Nonlinear 3-D models of four existing reinforced concrete deck-type arch bridges in Iran were developed. The bridges had arch spans of 23, 35, 45 and 50 meters and were subjected to nonlinear time history analyses using seven acceleration records. The models incorporated nonlinear fiber-based elements for arch and piers and elastic elements for the bridge deck. The incidence angle was changed in 15 degrees increment between 0 and 90 degrees. Moreover, the effect of asynchronous support excitation was investigated by means of introducing a time delay between excitation input for different supports. The relative displacement (drift) of the piers, the curvature ductility demands within the piers, the curvature ductility demand at different locations of the arch, and the displacement of the deck at the abutments (unseating) were used as damage indicators. The results showed that arch bridges were significantly more vulnerable to seismic loading in the transverse direction than in the longitudinal direction. Unseating of the bridge deck from abutments and pier drifts were the most and the least sensitive damage parameter to the change in incidence angle, respectively. The unseating varied by 40 percent, whereas the maximum drift varied by 5 percent as a result of changes in the earthquake incidence angle. The axial force at the end points of the arch was found to change significantly during earthquake, with a maximum of 40 percent in case of 90-degree incidence angle. The effect of asynchronous support excitations was relatively small, with a maximum increase of 10 percent in damage indicators and 5 percent in the axial forces and bending moments.

Keywords: Arch bridge, Nonlinear Time history Analysis, Incidence angle, Asynchronous Support Excitation, Unseating