

# صحت سنجی مدل نرم افزاری پل دارای قوس افقی با استفاده از آزمون میدانی

سجاد حیدری<sup>۱</sup>، محسن گرامی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

\* سمنان، صندوق پستی ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱، mgerami@semnan.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸)

## چکیده

محدودیت فضاهای شهری سبب شده است بخش قابل توجهی از این پل‌ها دارای قوس افقی باشند تا بتوان مسیرهای مختلف را در فضایی کم به هم متصل نمود. از این رو شناخت رفتار لرزه‌ای این دسته از پل‌ها اهمیت بالایی دارد، چنانچه زمین‌لرزه‌های گذشته نظیر زلزله ۱۹۹۴ نورثریج و زلزله ۲۰۰۸ وینچوان نیز نشان دادند که این نوع از پل‌ها تحت نیروی زمین‌لرزه و به‌ویژه زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند. در این پل‌ها وجود قوس افقی سبب نامنظمی هندسی می‌گردد، در نتیجه این دسته از پل‌ها تحت نیروی زلزله دارای رفتار لرزه‌ای پیچیده‌ای می‌باشند. تحلیل رفتار پل‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود بسیار زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد، از این رو در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه مدلسازی پل‌ها و به‌ویژه پل‌های نامنظم انجام گرفته است تا علاوه بر کاهش حجم مدلسازی و به تبع آن کاهش زمان تحلیل، بتوان نتایج دقیق‌تری از پاسخ لرزه‌ای پل به دست آورد. در این تحقیق با استفاده از مدل ستون فقراتی یک پل دارای قوس افقی مدلسازی و سپس با استفاده از آزمون میدانی و نتایج آزمایشگاهی، صحت‌سنجی شده است. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که با استفاده از مدل‌های ساده نظیر مدل ستون فقراتی برای مدلسازی عرشه، در نظر گرفتن اثر بعد در اتصالات و لاغرشدگی در پای ستون‌ها می‌توان مدلی واقعی از پل‌های نامنظم نظیر پل‌های دارای قوس افقی تولید نمود، که دلیل این امر را می‌توان حذف خطاهای عددی موجود در روش‌های اجزاء محدود دانست.

## واژگان کلیدی

مدل ستون فقراتی، پل دارای قوس افقی، آزمون میدانی پل

## Field validated modelling of horizontally curved bridge

S. Heidari, M. Gerami

### Abstract

With development of communication infrastructure in cities, the use of bridges is increasing day by day due to existence of non-level intersections. Limitation of urban spaces has caused a significant part of these bridges to have a horizontally curved deck so that they can connect different routes in a low space. Therefore, recognizing the seismic behavior of these bridges is of great importance. The past earthquakes, such as 1994 Northridge and 2008 Wenchuan earthquake, also showed that these types of bridges are highly vulnerable under earthquakes and especially under near-fault earthquakes. Horizontally curved deck causes geometric irregularities, as a result, the seismic behavior of these bridges is complicated under earthquake. Analysis of these bridges is time consuming and costly using a finite element method. In recent years, many studies have been done on modeling of irregular bridges to obtain more precise results from the seismic response of bridges and also reduce analysis time. In this study, a horizontally curved bridge was modeled using a spine-line model and then verified by field-test and experimental results. The validation results showed that by using simple models such as the spine-line model for deck modeling, and taking into account the dimension effect in the connections and the pinching effect in the base of columns, can produce a real model of irregular bridges, such as horizontally curved bridges. The reason for this is the elimination of numerical analysis errors.

### Keywords

Spine-line model, Horizontally curved bridge, Field test

تمامی استانداردها و راهنماهای طراحی پل نظیر آیین‌نامه Caltrans SDC 2010 [۱] معمولاً جهت طراحی لرزه‌ای پل‌های معمولی و استاندارد مورداستفاده قرار می‌گیرند. این آیین‌نامه‌ها شامل برخی از توصیه‌های کلی برای مدل‌سازی و تحلیل پل‌های بزرگراهی و روگذرها تحت زمین‌لرزه می‌باشند که برای طراحی و ارزیابی ظرفیت و شکل‌پذیری اجزاء پل مورداستفاده قرار می‌گیرد. این در حالی است که این توصیه‌ها می‌بایست در پل‌های غیراستاندارد و پل‌های مهم، توسعه یابد و تحلیل این پل‌ها به دلیل نامنظمی هندسی ناشی از قوس افقی، زاویه اریبی، دهانه‌های بزرگ، طول زیاد پل، درزهای انبساط متعدد، روسازه سنگین یا خاک غیر پایدار می‌تواند بسیار پیچیده و سخت باشد. در این موارد، علاوه بر آیین‌نامه‌ها نیاز به قضاوت مهندسی و مراجعه به منابع دیگر نیز وجود خواهد داشت. از این رو شناخت رفتار غیرخطی این نوع از پل‌ها اهمیت بالایی دارد.

تحقیقات گذشته نشان داده است که از دست دادن یک یا چند پل در شبکه حمل‌ونقل می‌تواند مانع از عملیات بهسازی گردد و اثرات جبران‌ناپذیری به اقتصاد منطقه وارد نماید [۲]. پل‌های دارای قوس افقی یکی از پل‌های پرکاربرد در فضای شهری می‌باشند که استفاده از آن‌ها به دلیل محدودیت‌های هندسی اجتناب‌ناپذیر است. وجود قوس در پلان باعث نامنظمی هندسی در پل و در نتیجه تشدید پاسخ لرزه‌ای می‌گردد. زلزله‌های پیشین نظیر زمین‌لرزه ۱۹۹۴ نورتریچ ایالات متحده آمریکا [۳] و زمین‌لرزه ۲۰۰۸ وینچوان چین [۴] نیز نشان دادند که این نوع از پل‌ها در برابر زمین‌لرزه بسیار آسیب‌پذیر می‌باشند [۵ و ۶]. از این رو شناخت رفتار آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است [۷-۱۲].

ولیکن زمان‌بر بودن تحلیل‌های غیرخطی به روش اجزاء محدود و هزینه‌بر بودن آزمون‌های آزمایشگاهی سبب شده است، تحقیقات در این زمینه پیشرفت کندی داشته باشد. اخیراً مطالعات زیادی در زمینه مدل‌سازی و تحلیل این دسته از پل

انجام شده است [۱۹-۱۳] تا بتوان بدون کاهش دقت پاسخ، زمان تحلیل را کاهش داد. نتایج تحقیقات اخیر نشان داد که استفاده از مدل‌های ساده نتایج دقیق‌تری را در پی خواهد داشت [۱۵]. بر این اساس، در این تحقیق با استفاده از مدل ساده ستون فقراتی یک پل دارای قوس افقی و دارای نامنظمی هندسی، در نرم‌افزار Openes [۲۰] مدل شد و با استفاده از یک آزمون میدانی و نتایج آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

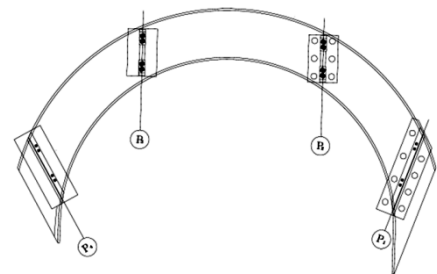
## ۲- پل مورد بررسی

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی پل‌های دارای قوس افقی از یک پل دوربرگردان (U-Tern) استفاده شده است. پل انتخابی پل دوربرگردان پروژه ثامن تهران می‌باشد (شکل (۱)) که اخیراً و در سال ۱۳۹۱ طراحی و ساخته شده است. عرشه پل از نوع صندوقچه‌ای-فولادی و به طول ۹۸/۵ متر می‌باشد. این پل دارای سه دهانه که به طول‌های ۲۸/۸۸، ۳۸/۳۰ و ۳۱/۲۶ متر می‌باشد. عرض عرشه پل ۱۰/۳۰ متر بوده و پل دارای دو ستون به ارتفاع‌های ۷/۵ و ۷/۷ می‌باشد.

عرشه پل‌ها در محل کوله‌ها و ستون‌ها بر روی تکیه‌گاه‌های الاستومری قرار گرفته و می‌تواند بر روی این تکیه‌گاه‌ها جابجایی جانبی داشته باشد. همچنین عرشه پل در محل نشیمنگاه‌های هر دو کوله دارای زاویه اریبی می‌باشد. کلید برشی در هر دو انتهای عرشه و بر روی کوله‌ها اجرا شده است.



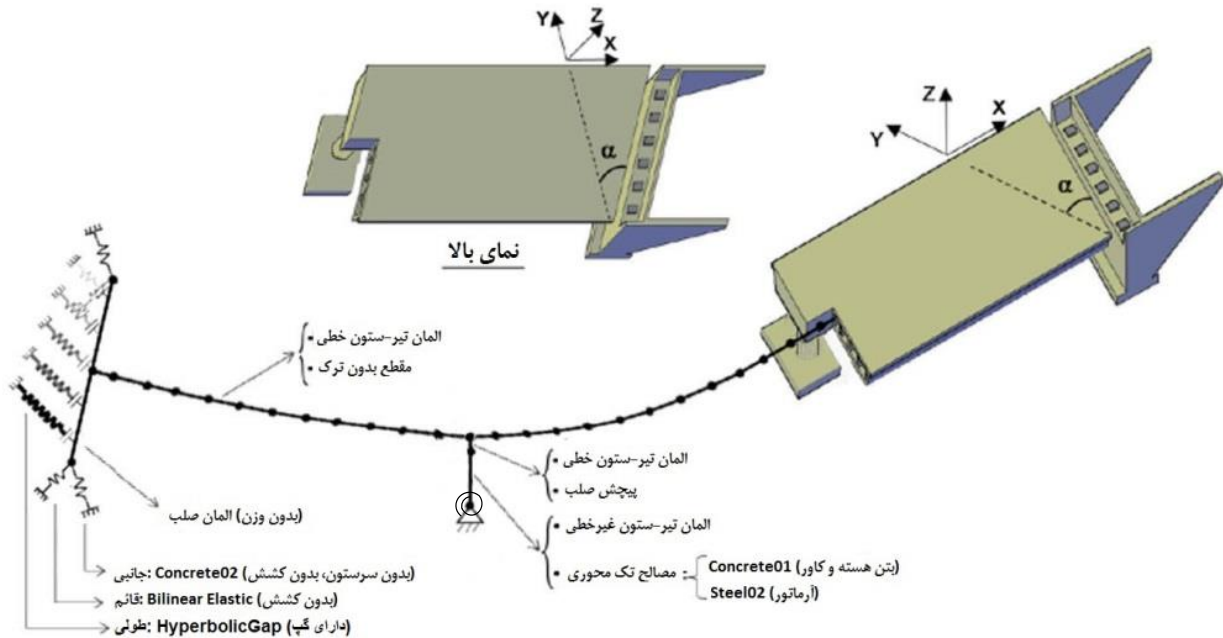
شکل ۱- پل دوربرگردان ثامن تهران (پل مورد بررسی)



## ۳- مدل سازی

مدل سازی رفتار هر المان در این نرم افزار امکان پذیر باشد. مدل سازی پل مورد نظر در نرم افزار به صورت شماتیک در شکل (۲) نمایش داده شده است.

در این تحقیق جهت مدل سازی غیرخطی پل دارای قوس افقی از نرم افزار Opensees استفاده شده است. وجود یک مجموعه غنی از مدل های رفتار مصالح در این نرم افزار سبب شده است تا



شکل ۲- مدل سازی پل دارای قوس افقی مورد بررسی در نرم افزار Opensees

پل ها به حساب می آیند. فلسفه طراحی ستون های پل به این صورت است که تحت زمین لرزه های قوی وارد ناحیه غیرخطی شوند. ستون پل ها با توجه به نسبت ارتفاع و عرض خود یک المان لاغر به حساب می آیند، بر این اساس ستون های تکی معمولاً رفتار خمشی خواهند داشت و مکانیزم آسیب آن ها تشکیل یک مفصل پلاستیک در تراز پایه است [۲۱ و ۲۲]. از این رو مقطع ستون ها با استفاده از fibre section مدل سازی و به المان تیر-ستون الاستیک اختصاص داده شد و رفتار غیرخطی ستون به صورت متمرکز به یک فنر بدون طول در پای ستون اختصاص یافت. برای افزایش دقت پاسخ به دست آمده، هر المان ستون دارای ۱۰ نقطه میانی تحت عنوان quadrature points می باشد. برای این نوع المان دو ساختار مبتنی بر تنش- کرنش وجود دارد. یک ساختار مدل dispBeamColumn در نرم افزار Opensees، که یک المان تیر-ستون مبتنی بر تغییر شکل می باشد و مدل nonlinearBeamColumn که یک المان تیر-ستون مبتنی بر نیرو می باشد. مطالعه Neuenhofer و Filippou [۲۳] نشان داد که نتایج به دست آمده از المان های

همان طور که در شکل (۲) نمایش داده شده است، در این تحقیق از مصالح Concrete02 جهت مدل سازی بتن و مصالح ReinforcingSteel و Steel02 جهت مدل سازی مصالح فولادی استفاده شده است. بر این اساس، رفتار هر یک از المان های پل در نرم افزار به صورت ذیل تعریف شده است:

## عرشه

ظرفیت بالای خمشی عرشه نسبت به المان های دیگر پل سبب می گردد که این المان در طول زلزله در محدوده رفتار خطی عمل نماید. از این رو در این تحقیق، عرشه با استفاده از المان تیر-ستون الاستیک و به صورت ستون فقراتی مدل شد و جرم آن به صورت متمرکز در طول المان عرشه توزیع گردید. ابتدای و انتهای عرشه بر روی کوله قرار دارد و عرشه به صورت پیوسته بوده و فاقد درز انبساط میانی می باشد.

## ستون

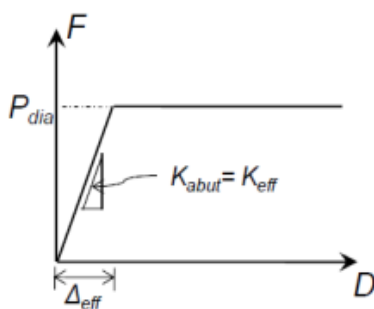
در پل هایی مشابه پل مورد مطالعه در این تحقیق، ستون ها عضو جابجایی کنترل می باشد، در نتیجه مهم ترین المان این نوع از

$$0.2 \times G_{conc} \times J_{col} \quad (2)$$

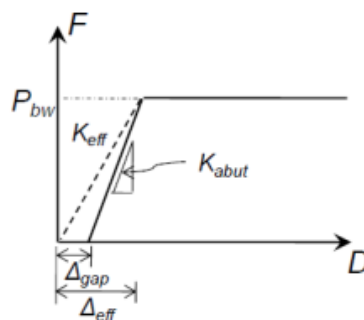
در رابطه فوق  $G_{conc}$  مدول برشی بتن و  $J_{col}$  ممان اینرسی مقطع ستون می‌باشد. با توجه به ترک‌خوردگی مقطع ستون، سختی پیچشی با استفاده از یک ضریب  $0.2$  کاهش می‌یابد [۱۳].

#### کوله

کوله پل از اجزاء مختلفی نظیر دیوار پشتی، دیوارهای جناقی و کلید برشی تشکیل شده است. در فلسفه طراحی پل، دیوار پشتی در کوله المان فدا شونده است که طراحی آن جهت شکست در حین زلزله و میرا نمودن بخشی از نیروی دینامیکی صورت می‌پذیرد [۱ و ۲۴]. مطالعات متعددی تا به امروز پیرامون نحوه مدل‌سازی کوله‌ها صورت پذیرفته است. آیین‌نامه Caltrans SDC 2010 [۱] دستورالعملی جهت مدل‌سازی کوله‌ها ارائه نموده است. این آیین‌نامه بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی روی کوله‌هایی با ابعاد واقعی، منحنی رفتار کوله را در جهت طولی و بر اساس فشار منفعل زمین ارائه داده است. برای مدل‌سازی دیوار پشتی و کلیدهای برشی کوله از فنرهای بدون طول و مصالح gap material استفاده شد (شکل (۳)) تا بتوان از طرفی رفتار غیرخطی و از طرف دیگر تأخیر در باربری ناشی از درز انبساط را مدل نمود.



(ب)



(الف)

شکل ۳- منحنی رفتار غیرخطی (الف) نشیمنگاه کوله و (ب) دیافراگم کوله بر اساس آیین‌نامه Caltrans

می‌باشند. در شکل (۳) منحنی نیرو تغییر مکان نشیمنگاه و دیافراگم کوله در جهت طولی نمایش داده شده است. به دلیل تأثیر ناچیز از در نظر گرفتن نیروی اصطکاک بین خاک و کوله صرف‌نظر شده است، این نیرو سبب کاهش تقاضا دوران عرشه می‌گردد لذا این یک فرض محافظه کارانه خواهد بود. برای مدل‌سازی عرشه از ۹ فنر بدون طول استفاده شد. به جهت اعمال اثر بعد و جابجایی تارختنی نیروی وارده از عرشه به کوله، از المان‌های صلبی جهت مدل‌سازی کوله استفاده گردید. مقاومت

نیرویی تنها دارای یک خطای عددی می‌باشند که البته آن‌هم با افزایش تعداد نقاط میانی کاهش خواهد یافت. بر این اساس در این تحقیق از المان نیرویی nonlinearBeamColumn برای مدل‌سازی ستون‌ها استفاده شده است.

از آنجایی که fibre section تنها دارای ظرفیت محوری و خمشی می‌باشند می‌بایست رفتار برشی و پیچشی را نیز به ستون‌ها اختصاص داد. به‌منظور آنکه ترکیب رفتار برشی و پیچشی را بتوان به‌صورت خطی در ستون مدل نمود، از مقطع the section aggregator نرم‌افزار Opensees استفاده شد و برای اضافه نمودن قابلیت تغییر شکل برشی به مقطع ستون، یک مصالح الاستیک با سختی برشی الاستیک تعریف گردید (رابطه (۱)).

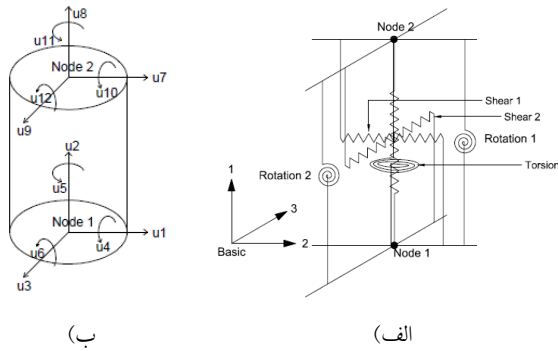
$$\left(\frac{9}{10}\right) \times G_{conc} \times A_{col} \quad (1)$$

در این رابطه،  $G_{conc}$  و  $A_{col}$  به ترتیب مدول برشی بتن و سطح مقطع ستون می‌باشد. به دلیل دایروی بودن سطح مقطع ستون، یک ضریب شکل  $0.9$  نیز اعمال شده است. تغییر شکل پیچشی نیز از طریق تعریف و اختصاص یک مصالح الاستیک به fibre section ستون صورت می‌پذیرد. برای این منظور سختی پیچشی ستون از رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد.

مقاومت اولیه و سختی این فنرهای بدون طول بر اساس توصیه آیین‌نامه Caltrans SDC 2010 تعیین و اختصاص یافت. سختی اولیه منحنی رفتار کوله با استفاده از رابطه (۳) به دست آمد. این رابطه بر اساس ارتفاع دیوار پشتی کوله به‌دست آمده است.

$$K_{abut} = 14.35 \frac{kN/mm}{m} \times w \times \left(\frac{h}{1.7}\right) \quad (m, kN) \quad (3)$$

در این رابطه،  $w$  و  $h$  به ترتیب عرض و ارتفاع دیوار پشتی کوله



شکل ۴- مدل نرم‌افزاری تکیه‌گاه الاستومری (الف) فنرهای شبیه‌ساز حرکت تکیه‌گاه (ب) مدل فیزیکی تکیه‌گاه

#### صحت‌سنجی ستون

در این تحقیق رفتار غیرخطی ستون‌ها با استفاده از یک فنر بدون طول در پای ستون‌ها مدل گردید. برای صحت‌سنجی ستون‌ها از کار آزمایشگاهی انجام‌شده توسط Kim و همکارانش [۳۰] استفاده شد. در این تحقیق دو ستون با مقطع دایره‌ای و مقیاس ۱ به ۳/۵ در آزمایشگاه ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. منحنی چرخه‌ای تک‌ستون لاغر در پل‌ها دچار لاغرشدگی می‌گردد لذا رفتار غیرخطی ستون به‌وسیله یک فنر بدون طول در پای ستون و با استفاده از مصالح uniaxialMaterial Pinching4 مدل گردید. برای این منظور ابتدا ظرفیت خمشی مقطع با استفاده از نرم‌افزار SAP به دست آمد. بر این اساس ظرفیت خمشی مقطع  $M_p = 133e6 \text{ kg.cm}$  و انحناء متناظر با آن به ترتیب  $\phi_p = 1.24e-5$  و  $\phi_y = 6.79e-6$  به دست آمد. سپس بر اساس مقادیر ظرفیت، منحنی غیرخطی ممان-دوران هر ستون با توجه به ارتفاع ستون به دست آمد و به دو فنر پای آن ستون (دو جهت اصلی افقی) اختصاص یافت.

مدل نرم‌افزاری ستون تحت همان الگوی اعمال بار چرخه‌ای آزمایشگاهی تحلیل شد و همان‌طور که در شکل (۵) نمایش داده شده است، صحت‌سنجی رفتار کلی ستون نشان داد که رفتار ترکیبی المان خطی و فنر غیرخطی مشابه رفتار واقعی ستون خواهد بود و دو منحنی از نظر لاغر شدگی، مقاومت، سختی بارگذاری و باربرداری مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

#### صحت‌سنجی عرشه

به‌منظور صحت‌سنجی مدل نرم‌افزاری عرشه یک آزمایش میدانی انجام گرفت. جهت آزمون میدانی از دو خودرو سنگین و نیمه سنگین استفاده شد (شکل (۶)) و بر اساس دو خودرو مورد

و سختی این فنرها در کوله‌هایی با زاویه اریبی، یکسان نیست [۲۵ و ۲۶] و به تدریج از زاویه حاده تا زاویه منفرجه کوله کاهش می‌یابد. این تغییرات نیرو به دلیل امکان بسیج شدن خاک پشت کوله می‌باشد و اثر این نیروی با شکستن دیوار کوله افزایش می‌یابد. بیشترین تغییر نیرو را در زاویه اریبی ۶۰ درجه شاهد می‌باشیم. ضریب کاهش مقاومت و سختی فنرهای مورد استفاده جهت مدل‌سازی کوله از طریق رابطه (۴) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\beta = 0.3 \times \frac{\tan \alpha}{\tan 60^\circ} \quad (۴)$$

این اثر جهت دستیابی به نتایج واقعی‌تر در مدل‌سازی این تحقیق لحاظ شده است ولیکن Shamsabadi و همکارانش [۲۷] نشان دادند که اثر تغییر زاویه اریبی بر تغییرات نیرو کمتر از ۲٪ می‌باشد.

همانطور که اشاره شد کوله پل یک عضو فداشونده در اجزاء پل بوده که به نوعی طراحی می‌شود که تحت زلزله‌های بیشتر از سطح طراحی و جهت میرا نمودن نیروی وارده دچار شکست شود. با توجه به آنکه امکان کنترل رفتار غیر خطی این المان تنها در یک تحلیل تاریخچه زمانی وجود دارد، بررسی رفتار غیرخطی در قالب یک تحلیل تاریخچه زمانی کامل صورت پذیرفته است [۲۸] که نتایج نشان دهنده انطباق رفتار مدل نرم‌افزاری با رفتار پیشنهادی آیین نامه می‌باشد.

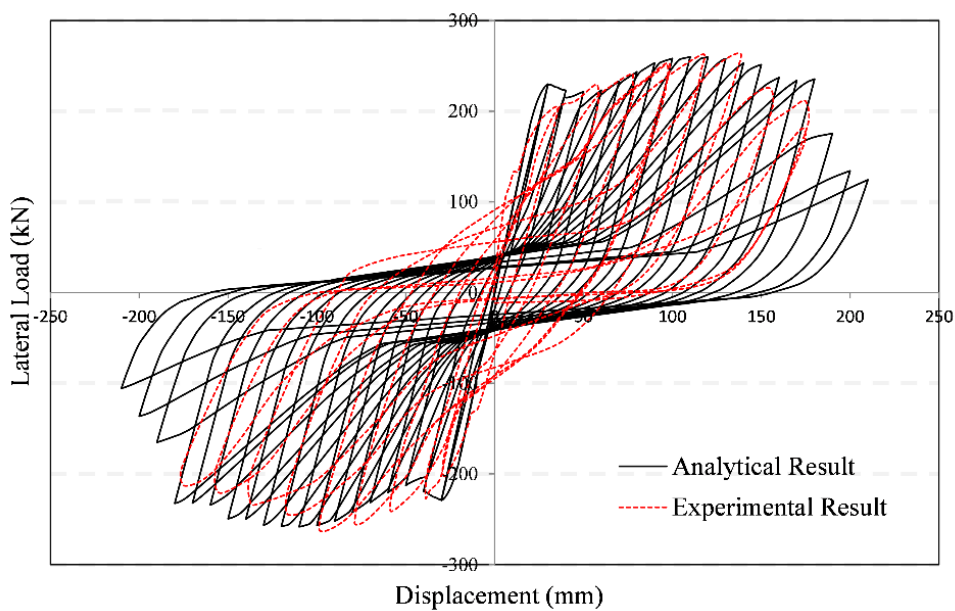
#### تکیه‌گاه الاستومری

عرشه در محل کوله و ستون‌ها بر روی تکیه‌گاه‌های الاستومری قرار می‌گیرد، جهت شبیه‌سازی جابجایی جانبی عرشه پل بر روی این تکیه‌گاه‌ها از المان صحت‌سنجی شده HDR استفاده شده است [۲۹]. این المان علاوه بر شبیه‌سازی جابجایی جانبی، رفتار تکیه‌گاه الاستومری را در دیگر درجات آزادی شبیه‌سازی می‌نماید (شکل (۴)).

#### ۴- صحت‌سنجی

در این تحقیق صحت‌سنجی پل در دو بخش صورت پذیرفت و صحت‌سنجی روسازه و زیرسازه پل به‌صورت جداگانه انجام گرفت. جهت صحت‌سنجی رفتار عرشه به‌عنوان روسازه پل، از یک آزمون میدانی استفاده شد. در زیرسازه پل نیز از آنجایی که کوله و تکیه‌گاه الاستومری با استفاده از مدل‌های صحت‌سنجی شده به‌دست آمده بودند، صحت‌سنجی بر روی ستون به‌عنوان مهم‌ترین عضو زیرسازه پل انجام گرفت.

استفاده و همچنین بر اساس نوع بارگذاری ۳ سناریو جهت آزمون پل در نظر گرفته شد.



شکل ۵- نتایج صحت‌سنجی و مدل‌سازی ستون



شکل ۶- آزمون میدانی پل با استفاده از شتاب‌سنج

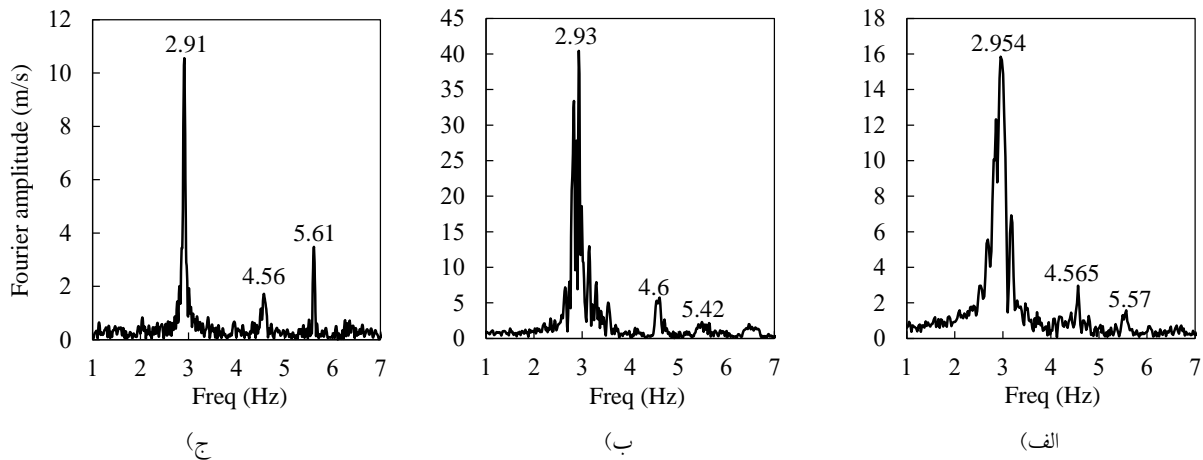
صورت انجام گرفت. در حالت اول و جهت محاسبه دوره تناوب غالب پل، دو خودرو سنگین و نیمه سنگین به ترتیب از روی پل با سرعت ثابت حرکت نمودند و در حالت دیگر و جهت محاسبه پارامتر میرایی، خودرو سنگین در حین عبور از پل به صورت ناگهانی در میانه پل متوقف شد تا ارتعاش آزاد پل بعد از ضربه اعمالی ثبت گردد. تحقیقات پیشین نشان داده است،

جهت ثبت ارتعاشات پل دستگاه IIEES-HAT accelerometer sensors بر روی عرشه پل نصب گردید. این دستگاه قادر به ثبت ارتعاشات در سه جهت اصلی محورهای مختصات بوده و کوچک‌ترین سطح لرزه‌ای قابل اندازه‌گیری توسط این شتاب‌نگار برابر با ۰/۰۸ سانتیمتر بر مجذور ثابته می‌باشد. در این تحقیق مکانیزم اعمال بار به دو

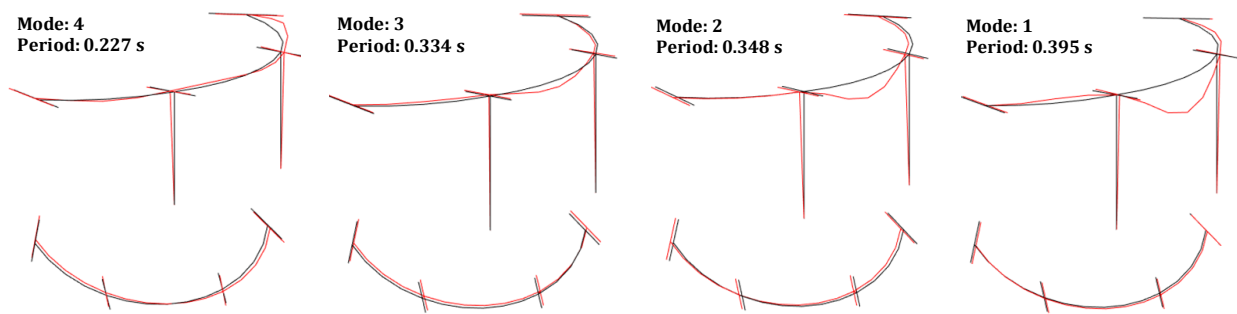
زمانی که در این آزمون تجهیزات شتاب‌نگاشت بر روی پل نصب می‌گردند، سرعت ثابت ۳۰ کیلومتر بر ساعت سرعتی مناسب برای عبور وسایل نقلیه از روی پل می‌باشد [۳۱]. درحالی‌که این سرعت برای تجهیزات شتاب‌نگاشت بر روی وسایل نقلیه نصب می‌باشند، بین ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر بر ساعت توصیه شده است [۳۲]. بر این اساس آزمون میدانی بر روی پل انجام گرفت و ارتعاشات با استفاده از دستگاه شتاب‌نگار ثبت گردید. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود طیف دامنه فوریه برای سه حالت عبور خودرو سنگین و نیمه سنگین و همچنین ارتعاش آزاد نمایش داده شده است که

بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشد.

از طرف دیگر بر اساس مبانی بیان‌شده در بخش‌های قبل پل موردنظر در نرم‌افزار Opensees مدل شد که دوره تناوب و شکل مودی چهار مود اصلی پل در شکل (۸) نمایش داده شده است. مقادیر دوره تناوب از سه آزمون میدانی بسیار نزدیک به هم و تقریباً برابر با دوره تناوب اصلی مدل نرم‌افزاری یعنی ۰/۳۹۵ ثانیه می‌باشند. در میان سه آزمون میدانی، آزمون عبور خودرو سنگین با سرعت ثابت با دوره تناوب ۰/۳۴۳ ثانیه نزدیک‌ترین مقدار به پاسخ نرم‌افزاری می‌باشد.



شکل ۷- فرکانس طیف شتاب پل برای حالات مختلف بارگذاری (الف) عبور خودرو سنگین (ب) ارتعاش آزاد (ج) عبور خودرو نیمه سنگین



شکل ۸- دوره تناوب و شکل مودی چهار مود اصلی پل موردبررسی

$$\xi = \frac{1}{2\pi(10)} \ln \frac{17.53}{5.59} = 0.0182 \cong 0.02 \quad (5)$$

هرچند انطباق دوره تناوب مدل نرم‌افزاری با نتایج آزمون میدانی، کنترل رفتار غیرخطی ۲ بعدی ستون پل و سایر نتایج این مقاله درک مناسبی از رفتار این نوع از پل‌ها می‌دهد، ولیکن

با استفاده از نتایج ارتعاش آزاد پل نیز پارامتر میرایی محاسبه شد. بر این اساس، با محاسبه دامنه‌های ابتدا و انتهای ارتعاش عرشه در ۱۰ سیکل ارتعاشی می‌توان مقدار پارامتر میرایی را با استفاده از رابطه ۵ محاسبه نمود. بر این اساس میرایی پل حدود ۲٪ به دست آمد که برابر با میرایی مدل نرم‌افزاری می‌باشد.

تجهیزات شتاب‌نگار بر روی پل نصب می‌باشد، عبور خودروی سنگین‌تر با سرعت ثابت نتایج دقیق‌تری در مقایسه با خودرو سبک‌تر و یا آزمون اعمال ضربه و ارتعاش آزاد در پی خواهد داشت.

#### ۶- مراجع

- [1] Caltrans, S. (2010), "Caltrans seismic design criteria version 1.6", California Department of Transportation, Sacramento.
- [2] Seo, J. and Linzell, D.G. (2012), "Horizontally curved steel bridge seismic vulnerability assessment", *Engineering Structures*, Vol. 34, pp. 21-32.
- [3] Buckle, I.G. (1994), "The Northridge, California earthquake of January 17, 1994: Performance of highway bridges", In the Northridge, California earthquake of January 17, Performance of highway bridges.
- [4] Kawashima, K., Takahashi, Y., Ge, H., Wu, Z. and Zhang, J. (2009), "Reconnaissance report on damage of bridges in 2008 Wenchuan, China, earthquake", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 13, pp. 965-996.
- [5] Jennings, P.C. (1971), "Engineering features of the San Fernando earthquake of February 9, 1971".
- [6] Association, J.R. (2002), Specifications for highway bridges, part V Seismic design, pp. 28.
- [7] Faraji, S., Ting, J.M., Crovo, D.S. and Ernst, H. (2001), "Nonlinear analysis of integral bridges: Finite-element model", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, pp. 454-461.
- [8] Heins, C.P. and Lee, W.H. (1981), "Curved box-girder bridge test: Field test", *Journal of the Structural Division*, Vol. 107, pp. 317-327.
- [9] Huang, D. (2001), "Dynamic analysis of steel curved box girder bridges", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 6, pp. 506-513.
- [10] Huang, D. (2008), "Full-scale test and analysis of a curved steel-box girder bridge", *Journal of Bridge Engineering*, vol. 13, pp. 492-500.
- [11] Kappos, A.J. and Sextos, A.G. (2001), "Effect of foundation type and compliance on seismic response of RC bridges", *Journal of bridge engineering*, Vol. 6, pp. 120-130.
- [12] Zureick, A., Linzell, D., Leon, R. and Burrell, J. (2000), "Curved steel I-girder bridges: Experimental and analytical studies", *Engineering Structures*, Vol. 22, pp. 180-190.
- [13] Aviram, A., Mackie, K.R. and Stojadinović, B. (2008), "Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California", *Pacific Earthquake Engineering Research Cente*.
- [14] Bignell, J.L., LaFave, J.M. and Hawkins, N.M., "Seismic vulnerability assessment of wall pier supported highway bridges using nonlinear pushover analyses", *Engineering structures*, Vol. 27, pp. 2044-2063.
- [15] Ghorbarah, A. and Tso, W. (1973), "Seismic analysis of skewed highway bridges with intermediate supports", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 2, pp. 235-248.
- [16] Johnson, N., Saiidi, M.S. and Sanders, D. (2009), "Nonlinear earthquake response modeling of a large-scale two-span concrete bridge", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 14, pp. 460-471.

اندرکنش این اجزاء تحت بارگذاری لرزه ای و در یک محیط ۳ بعدی می‌تواند منجر به رفتاری پیچیده تر گردد. بر این اساس نتایج یک بررسی غیرخطی روی این مدل‌سازی نشان داد که رفتار لرزه ای پل در فضای ۳ بعدی، انطباق مناسبی با رفتار واقعی پل خواهد داشت [۲۸]. علیرغم بررسی انجام گرفته لازم است مطالعات بیشتری روی رفتار دینامیکی و غیرخطی این نوع از پل‌ها صورت پذیرد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج صحت‌سنجی نشان داد که با فرضیات انجام‌گرفته رفتار مدل نرم‌افزاری به میزان بسیار زیادی به رفتار واقعی پل نزدیک می‌باشد. بر این اساس یافته‌های به‌دست‌آمده در این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر برشمرد:

- نتایج نشان داد که استفاده از مدل‌های ساده (نظیر مدل ستون فقراتی برای عرشه و فنر بدون طول برای ستون) در شبیه‌سازی رفتار پل‌های دارای قوس افقی (به عنوان دسته‌ای از پل‌های نامنظم) ضمن کاهش قابل‌توجه زمان تحلیل، نتایج دقیقی در پی خواهد داشت.
- استفاده از المان‌های صلب جهت اعمال اثر بعد در محل تکیه‌گاه‌ها، درزهای انبساط و محل تکیه‌گاه‌های الاستومری امری ضروری می‌باشد و از این طریق می‌توان اثر جابجایی تار خنثی را در محل تکیه‌گاه‌ها مدل نمود.
- ستون‌های پل با توجه به نسبت ارتفاع به عرض خود المان لاغری به‌حساب می‌آیند. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که استفاده از المان تیر-ستون برای مدل‌سازی ستون‌های تکی و اختصاص رفتار غیرخطی به فنی در تراز پایه می‌تواند رفتار ستون را به‌درستی شبیه‌ساز نماید.
- بر اساس نتایج آزمایشگاهی پیشین، منحنی رفتار ستون‌های تکی لاغر تحت بارگذاری چرخه‌ای دارای لاغرشدگی (pinching) می‌باشد. لذا استفاده از مصالحی با قابلیت شبیه‌سازی لاغرشدگی در منحنی چرخه‌ای رفتار ستون امری ضروری می‌باشد. نتایج صحت‌سنجی این تحقیق نیز نشان داد که استفاده از مصالح لاغر شدگی موجب می‌شود پاسخ منحنی چرخه‌ای در مقاومت، سختی بارگذاری و سختی باربرداری کاملاً بر منحنی آزمایشگاهی منطبق گردد.
- نتایج آزمون میدانی این تحقیق نشان داد که هنگامی‌که

- [17] Kaviani, P., Zareian, F. and Taciroglu, E. (2012), "Seismic behavior of reinforced concrete bridges with skewed seat-type abutments", *Engineering Structures*, Vol. 45, pp. 137-150.
- [18] Kotsoglou, A. and Pantazopoulou, S. (2010), "Response simulation and seismic assessment of highway overcrossings", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 39, pp. 991-1013.
- [19] Paraskeva, T., Kappos, A. and Sextos, A. (2006), "Extension of modal pushover analysis to seismic assessment of bridges", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 35, pp. 1269-1293.
- [20] McKenna, F., Fenves, G. and Scott, M. (2000), "Open system for earthquake engineering simulation", University of California, Berkeley, CA.
- [21] Gerami, M. and Abdollahzadeh, D. (2015), "Vulnerability of steel moment-resisting frames under effects of forward directivity", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 24, pp. 97-122.
- [22] Khanmohammadi, M. and Heydari, S. (2015), "Seismic behavior improvement of reinforced concrete shear wall buildings using multiple rocking systems", *Engineering Structures*, Vol. 100, pp. 577-589.
- [23] Neuenhofer, A. and Filippou, F.C. (1997), "Evaluation of nonlinear frame finite-element models", *Journal of structural engineering*, Vol. 123, pp. 958-966.
- [24] Priestley, M.N., Seible, F. and Calvi, G. M. (1996), "Seismic design and retrofit of bridges", John Wiley & Sons.
- [25] Romstad, K., Kutter, B., Maroney, B., Vanderbilt, E., Griggs, M. and Chai, Y. H. (1995), "Experimental measurements of bridge abutment behavior", Rep. No. UCD-STR-95, 1.
- [26] Stewart, J.P., Taciroglu, E., Wallace, J. W., Ahlberg, E.R., Lemnitzer, A., Rha, C., Tehrani, P., Keowen, S., Nigbor, R.L. and Salamanca, A. (2007), "Full scale cyclic testing of foundation support systems for highway bridges. Part II: Abutment backwalls".
- [27] Shamsabadi, A., Rollins, K.M. and Kapuskar, M. (2007), "Nonlinear soil-abutment-bridge structure interaction for seismic performance-based design", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 133, pp. 707-720.
- [28] Heidari, S. and Gerami, M. (2019), "The effect of skewness on rotational response of the curved bridge deck under near-fault motions", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, pp. 4836-4845.
- [29] Shamsabadi, A., Kapuskar, M. and Martin, G.R. (2006), "Three-dimensional nonlinear finite-element soil-abutment structure interaction model for skewed bridges," In 5<sup>th</sup> National Seismic Conference on Bridges and Highways, pp. 1-10.
- [30] Kim, J.K., Kim, I.-H., Lim, H.-W., Lee, J.-H. and Lee, J.-H. (2001), "Cyclic loading test of bridge pier models without seismic detailing", In Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Singapore, Singapore.
- [31] Loh, K., Lynch, J., Wang, Y., Law, K., Fraser, M. and Elgamal, A. (2007), "Validation of a wireless traffic vibration monitoring system for the Voigt Bridge", In Proceedings of the World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology (SMSST07), Chongqing & Nanjing, China, pp. 22-27.
- [32] Nagayama, T., Reksowardojo, A., Su, D. and Mizutani, T. (2017), "Bridge natural frequency estimation by extracting the common vibration component from the responses of two vehicles", *Engineering Structures*, Vol. 150, pp. 821-829.