

اثر مؤلفه قائم زمین لرزه بر روی عرشه پل‌های پیش‌تنیده با ساخت طره‌ای در اندرکنش با رفتارهای تابع زمان مصالح

محمد رضا عباداللهزاده
شاهرخ مالک
کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
استادیار دانشکده فنی، دانشگاه تهران
استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
محمد حسین امین‌فر

چکیده

تأثیر مؤلفه قائم زمین لرزه در پل‌های احداث شده در حوزه نزدیک گسلش و همچنین در پل‌های دارای عرشه‌های انعطاف‌پذیر غیر قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. به ویژه در پل‌های پیش‌تنیده طره‌ای با توجه به ساخت و تکمیل مرحله‌ای این‌گونه پل‌ها و رفتار اندرکنشی خصوصیات وابسته به زمان مصالح، به ویژه پدیده خزش بتن که باعث باز توزیع دائم نیروهای داخلی و متغیر شدن تنش‌ها و تغییر مکان‌های مقاطع عرشه پل در طول زمان می‌شود، منجر به حساسیت رفتار عرشه پل به مؤلفه قائم زمین لرزه می‌گردد. در این مطالعه با استفاده از مدل ایجاد شده از یک پل پیش‌تنیده طره‌ای، به بررسی اثرات مؤلفه قائم شتاب زمین لرزه، بر روی شتاب، تغییر مکان و تنش‌های مقاطع مختلف تیر عرشه در فاصله‌های زمانی متفاوت از ساخت پل، با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی - دربرگیرنده آثار ساخت مرحله‌ای - و تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی با شرایط اولیه متفاوت نیرویی و سختی، با توجه به متغیر بودن نیروهای داخلی و سختی در طول زمان، پرداخته شده است. متعاقباً، میزان آسیب‌پذیری عرشه‌هایی که از به هم پیوستن طره‌ها ایجاد گردیده‌اند، تحت تأثیر مؤلفه قائم شتاب زمین لرزه، مورد مطالعه قرار داده شده و توصیه‌های اصلاحی به منظور بهسازی لرزه‌ای این‌گونه پل‌ها ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: پل‌های پیش‌تنیده طره‌ای، مؤلفه قائم شتاب زمین لرزه، رفتارهای وابسته به زمان، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

Behavior of Deck in Prestressed Cantilever Box-Girder Bridges Subjected to Vertical Ground Acceleration in the Interaction with the Time-Dependent Behaviour of Materials

M. Ebadollahzadeh Faculty of Engineering, University of Tehran
S. Maalek Faculty of Engineering, University of Tehran
M. H. Aminfar Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz

Abstract

Vertical component of earthquake effects on bridges constructed near field of fault, and bridge decks that are flexible cannot be neglected. Especially, prestressed cantilever bridges, with regard to construction and completion phase and interaction of time dependent behavior of materials, such as concrete creep, which causes redistribution of internal forces and variable shift of stress and displacements of the bridge deck over time, leads the bridge deck to be sensitive to the effects of the vertical component of the ground acceleration. To study seismic behavior of prestressed cantilever box-girder bridges, a case study was carried out on a three-span continuous prestressed box-girder bridge. A three dimensional finite-element model is used for modeling and analysis of the balanced cantilever construction of the segmental bridges, including the effects of the load history and material time-dependent behavior with the use of nonlinear static staged construction analysis and under the action of the vertical component seismic excitation by means of nonlinear time-history analysis. Finally vulnerability of the decks of the prestressed cantilever box-girder bridges was investigated and some suggestions have been made to improve the seismic behavior of the bridge decks.

Key words: Prestressed cantilever bridges, Vertical acceleration of earthquake, Time-dependent behavior, Nonlinear static analysis, Nonlinear dynamic analysis.

۱- مقدمه

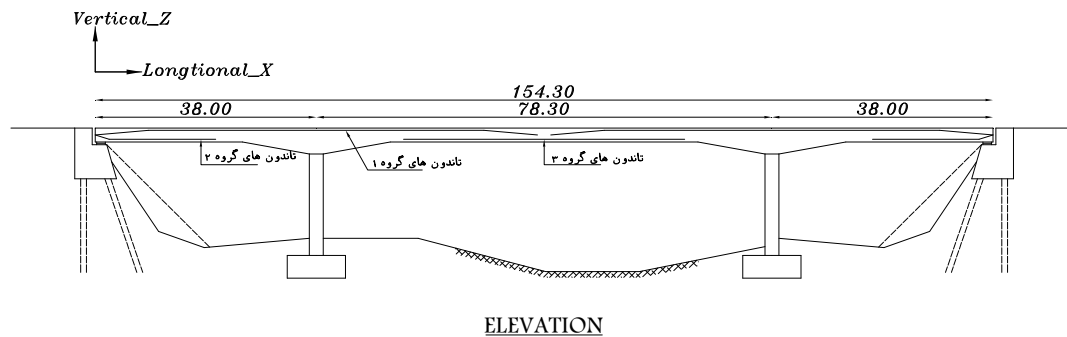
می‌باشد و لحاظ کردن آن در تحلیل‌ها و ضوابط طراحی‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در ادامه می‌توان به تحقیق انجام شده در مرجع [۱۲] اشاره کرد که اثر حرکات قائم زمین‌لرزه را بر روی شش نوع از پل‌ها، مدل‌سازی و بررسی شده، و ضوابطی را برای در نظر گرفتن اثر حرکات قائم زمین‌لرزه در تحلیل و طراحی هر کدام از آن‌ها، توصیه گردیده است، که البته این مطالعه مربوط به پل‌هایی که در آن‌ها از سیستم اتلاف انرژی و جداگرهای لرزه‌ای استفاده شده است، می‌باشد.

در مقاله حاضر اثرات مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه بر روی عرشه پل‌های پیش‌تنیده جعبه‌ای با روش ساخت طره‌ای متعادل، با استفاده از مدل پل سه دهانه نشان داده شده در شکل (۱)، که در آن کلیه رفتارهای وابسته به زمان مصالح نیز، جهت ایجاد مدلی دقیق‌تر در نظر گرفته شده، مورد بررسی قرار گرفته است. در این پل‌ها بدلیل شرایط ساخت مرحله‌ای، تغییر سیستم استاتیکی پل و اثر متقابل آن با رفتارهای وابسته به زمان مصالح، به ویژه خزش بتن، که باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه در تنش‌ها و تغییر مکان‌ها در مقاطع مختلف عرشه پل در طول زمان می‌شود، عرشه پل را در مقابل نیروهای وارده حساس‌تر می‌کند و در این حال تاثیر مؤلفه قائم زمین‌لرزه که معمولاً تاکنون چندان مورد توجه قرار داده نشده است، بخصوص برای نسبت‌های بالای شتاب قائم به شتاب افقی زمین‌لرزه، بر روی عملکرد عرشه پل، قابل ملاحظه و تعیین کننده به نظر می‌رسد.

در طی یک زمین‌لرزه عمدتاً نیروهای اینرسی ناشی از مؤلفه‌های افقی شتاب زمین لرزه باعث خرابی سازه‌های متعارف می‌شوند و اغلب در طراحی سازه‌ها از نیروی اینرسی ناشی از مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه صرف‌نظر می‌شود. مطالعات و مشاهدات اخیر نشان داده‌اند که اثر حرکات قائم زمین‌لرزه، به ویژه در پل‌ها بطور کامل قابل صرف‌نظر کردن نیست. همچنین خرابی‌هایی از پل‌ها، در اثر زمین‌لرزه‌های کالاماتای یونان (۱۹۸۶)، نورتریج کالیفرنیا (۱۹۹۴) و کوبه ژاپن (۱۹۹۵) که عمدتاً تحت اثر حرکات قائم زمین‌لرزه، در یک حالت نسبت شتاب قائم به شتاب افقی بالا رخ داده بودند علاوه بر عوامل آثار دیگر، گزارش شده است.

در موارد لزوم در طراحی‌ها، اکثراً شتاب قائم زمین‌لرزه را در حدود دو سوم مؤلفه‌های افقی شتاب، برای یک طیف یکسان در نظر می‌گیرند [۹]. هرچند نسبت حداکثر شتاب قائم به حداکثر شتاب افقی در برخی از زمین‌لرزه‌ها حتی بالاتر از ۱/۶ نیز ثبت شده است. در حالیکه در حالت‌های متعارف حدود ۰/۶۷ در نظر گرفته می‌شود [۱۰].

در ارتباط با مسئله اثر حرکات قائم زمین‌لرزه بر روی عرشه پل‌ها تحقیقات زیادی انجام نگرفته است. اما در این میان می‌توان به تحقیق گزارش شده در مرجع [۱۱] اشاره کرد که در آن رفتار پل‌های بتن‌آرمه تحت تحریک همزمان مؤلفه‌های افقی و قائم حرکات زمین‌لرزه بررسی شده است و نتیجه‌گیری گردیده که اثرات حرکات قائم زمین‌لرزه بر روی عملکرد پل‌ها بسیار مهم



شکل ۱- پل سه دهانه پیش‌تنیده باتیرهای جعبه‌ای

۲- مدل سازی پل

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + Ku(t) = -M \ddot{u}_g(t) \quad (4)$$

که در آن $\ddot{u}_g(t)$ شتاب قائم زمین تحت اثر زمین لرزه و $u(t)$ و $\dot{u}(t)$ و $\ddot{u}(t)$ به ترتیب بردارهای تغییرمکان قائم، سرعت و شتاب می باشد.

در میان روش های عددی انتگرال گیری مستقیم برای پاسخ های معادله (۴)، روش انتگرال گیری نیومارک یک روش مؤثر و با خطای کم شناخته شده است، که در آن شتاب بین زمان های t و $t+\Delta t$ بصورت خطی در نظر گرفته می شود. برای فاصله زمانی Δt روابط را بصورت زیر می توان نوشت:

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} (u_{t+\Delta t} - u_t) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{u}_t - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t \quad (5a)$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \Delta t(1 - \beta) \ddot{u}_t + \beta \Delta t \ddot{u}_{t+\Delta t} \quad (5b)$$

که در معادلات بالا α و β پارامترهایی برای کنترل دقت و پایداری انتگرال گیری ها می باشند. برای حالت شتاب ثابت متوسط، یعنی $\ddot{u}(\tau) = \frac{1}{2}(\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1})$ مقادیر $\alpha = \frac{1}{4}$ ، $\beta = \frac{1}{2}$ بوده و در این حالت پایداری انتگرال گیری ها در پروسه تکراری تحلیل، به ازای هر مقدار Δt ، برقرار است. برای حالت شتاب خطی، یعنی، مقادیر $\alpha = \frac{1}{6}$ ، $\beta = \frac{1}{2}$ بوده و در این حالت پایداری انتگرال گیری ها در پروسه تکراری تحلیل مشروط به $\frac{\Delta t}{T} \leq \frac{1}{\pi \sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\beta - 2\alpha}}$ یا مقدار $\frac{\Delta t}{T} \leq 0.551$ می باشد [۴].

معادلات (5a) و (5b) را می توان بصورت زیر نیز بازنویسی کرد:

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} (u_{t+\Delta t} - u_t) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{u}_t - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t \quad (6a)$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \Delta t(1 - \beta) \ddot{u}_t + \beta \Delta t \ddot{u}_{t+\Delta t} \quad (6b)$$

برای بدست آوردن تغییرمکان، سرعت و شتاب در زمان $t+\Delta t$ معادله (۴) بصورت زیر نوشته می شود:

جهت بررسی اثرات مؤلفه قائم لرزه بر روی عرشه پل های پیش تنیده طره ای، از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، مدل پل سه دهانه نشان داده شده در شکل (۱) استفاده شده است.

در ادامه با استفاده از تحلیل ماتریسی سازه ها و روابط بین نیروها و تغییرمکان ها، و معادله دیفرانسیلی حاکم بر حرکت دینامیکی سازه به تشریح روند تحلیل پل مدل شده پرداخته شده است [۷]. اگر K ماتریس سختی سازه، M ماتریس جرم سازه، F نیروهای وارد بر سازه و Δ تغییرمکان سازه باشد، رابطه بین نیرو و تغییرمکان بصورت رابطه $F=K \cdot \Delta$ بوده و در حالت ماتریسی بصورت زیر بیان می شود:

$$\begin{bmatrix} k_{vv} & k_{v\theta} \\ k_{\theta v} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_v \\ F_\theta \end{Bmatrix} \quad (1)$$

که در آن v, θ به ترتیب نمایشگر بردارهای انتقال و دوران می باشند. اگر $F_\theta = 0$ که همان مؤلفه دورانی زمین لرزه است قابل صرف نظر کردن باشد، در این صورت در رابطه (۱)، $F_\theta = 0$ بوده و $\theta = -k_{\theta\theta}^{-1} \cdot k_{\theta v} \cdot v$ خواهد بود. با جاگذاری در رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$(k_{vv} - k_{v\theta} \cdot k_{\theta\theta}^{-1} \cdot k_{\theta v}) v = F_v \quad \text{or} \quad K \cdot v = F_v \quad (2)$$

که در آن $K = k_{vv} - k_{v\theta} \cdot k_{\theta\theta}^{-1} \cdot k_{\theta v}$ ، ماتریس سختی انتقالی می باشد. و فقط آن دسته از درجات آزادی که مربوط به انتقال می باشند، باقی مانده و بنابراین ماتریس متراکم شده (تلخیص یافته) و برای استفاده با ماتریس قطری جرم M ، همساز می شود.

ماتریس میرایی سیستم بصورت زیر می باشد:

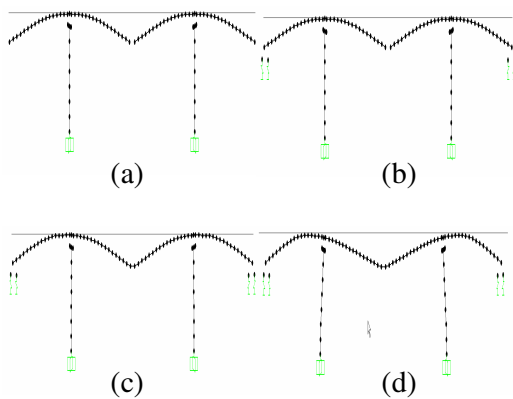
$$C = \left(M \phi \left[\phi^T M \phi \right]^{-1} \right) C_m \left(\left[\phi^T M \phi \right]^{-1} \phi^T M \right) \quad (3)$$

و معادله حرکت دینامیکی سیستم بصورت زیر بیان می شود:

طره‌ای، از تحلیل غیرخطی استاتیکی ساخت مرحله‌ای که دربرگیرنده شرایط ساخت مرحله‌ای و اثرات رفتارهای وابسته به زمان مصالح می‌باشد، استفاده شده است.

۳- تشریح مشخصات پل مدل شده

جهت بررسی اثر مؤلفه قائم زمین‌لرزه بر روی عرشه پل‌های پیش‌تنیده طره‌ای با منظور داشتن کلیه موارد و مسائل مربوط به این‌گونه پل‌ها، اعم از ساخت مرحله‌ای، رفتارهای وابسته به زمان مصالح مصرفی و افت در نیروهای پیش‌تنیدگی، از مدل پل سه دهانه نشان داده شده در شکل (۱) استفاده شده است (شکل (۲) و (۳)). عرشه پل به صورت تیر جعبه‌ای قطعه‌ای با ارتفاع متغیر و همچنین ضخامت متغیر برای دال پایینی در نزدیکی تکیه‌گاه‌های میانی می‌باشد. طول قطعات عرشه ۲/۳۰ متر بوده و به صورت طره‌ای متعادل از پایه‌های میانی اجرا می‌گردند و در وسط دهانه به هم می‌رسند. در کناره‌ها نیز در تکیه‌گاه‌ها، مهار می‌شوند. مقطع عمومی پل با مدول مقطع 3272790 cm^3 و مقطع پل روی تکیه‌گاه‌های میانی با مدول مقطع 12491101 cm^3 می‌باشد. در مدل انتخابی برای در نظر گرفتن رفتار وابسته به زمان بتن، رطوبت نسبی محیط را برابر ۸۰٪ و زمان شروع جمع‌شدگی را از روز اول ساخت، فرض می‌کنیم. سیمان مصرفی را از نوع معمولی و زود سخت‌شونده (N,R)، با $\beta_{sc}=5$ ، و همچنین مقدار ارتفاع تئوریک h_0 را برابر ۴۵۰ میلیمتر نظر می‌گیریم [۳].



شکل ۲- مراحل ساخت و تکمیل پل

$$M \ddot{u}_{t+\Delta t} + C \dot{u}_{t+\Delta t} + K u_{t+\Delta t} = -M (\ddot{u}_g)_{t+\Delta t} \quad (7)$$

با جاگذاری معادلات (۶a) و (۶b) در معادله (۷)، یک معادله خطی برحسب $u_{t+\Delta t}$ در هر گام زمانی مطابق روابط نشان داده شده در زیر بدست می‌آید:

$$\bar{K} \cdot u_{t+\Delta t} = \bar{P}_{t+\Delta t} \quad (8)$$

$$\bar{K} = K + \frac{1}{\alpha \cdot \Delta t^2} M + \frac{\beta}{\alpha \cdot \Delta t} C_m$$

$$\bar{P}_{t+\Delta t} = -M \left(\ddot{u}_g \right)_{t+\Delta t} + M \cdot a_m + C \cdot a_c$$

$$a_m = \frac{1}{\alpha \cdot \Delta t^2} u_t + \frac{1}{\alpha \cdot \Delta t} \dot{u}_t + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t$$

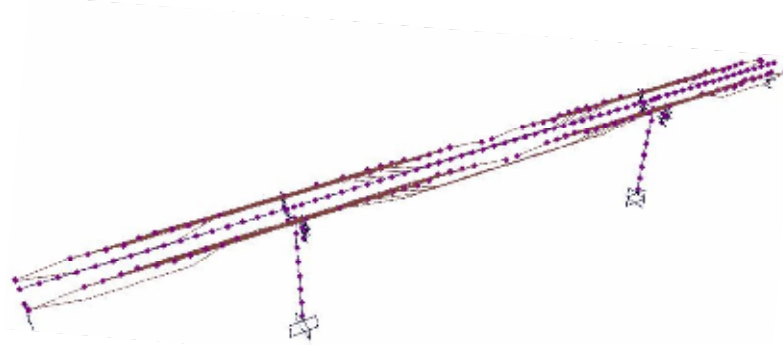
$$a_c = \frac{\beta}{\alpha \cdot \Delta t} u_t + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \dot{u}_t + \Delta t \left(\frac{\beta}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_t$$

بعد از بدست آوردن $u_{t+\Delta t}$ از معادله (۸)، $\ddot{u}_{t+\Delta t}$ ، $\dot{u}_{t+\Delta t}$ به ترتیب از معادلات (۶b)، (۶a) بدست می‌آیند. برای سرشکن کردن خطاها در هر مرحله می‌توان مقدار $\ddot{u}_{t+\Delta t}$ را از معادله (۷) بدست آورد. با تکرار روند فوق، مقادیر تغییرمکان، سرعت و شتاب در کل بازه زمانی تعیین شده بدست می‌آید.

در این مطالعه از روش $\alpha = \frac{1}{4}$ ، $\beta = \frac{1}{2}$ نیومارک استفاده شده که مطابق با روش Hilber-Hughes-Taylor، $\alpha = 0$ می‌باشد، که در این حالت دارای بیشترین دقت می‌باشد [۵].

جهت تخمین رفتار و عملکرد سازه تحت اثر رفتارهای وابسته به زمان مصالح نیز مدل‌های متعددی وجود دارد، که از آن جمله می‌توان به مدل آیین‌نامه ACI 209، مدل آیین‌نامه CEB90 و مدل‌های B3 و GL2000، اشاره نمود [۸]. مطابق تحقیقات و نتایج آزمایشگاهی مدل آیین‌نامه CEB90 نسبت به سایر مدل‌های موجود جهت تخمین کرنش‌های ناشی از جمع‌شدگی و خزش بتن، دارای نتایج واقع بینانه‌تری می‌باشد [۱۳].

در مطالعه حاضر نیز از مدل آیین‌نامه CEB90 استفاده شده است [۳]. و برای در نظر گرفتن روابط تعیین شده در این مدل و همچنین اعمال شرایط و مراحل ساخت پل‌های پیش‌تنیده



شکل ۳- نمای سه بعدی پل مدل سازی شده

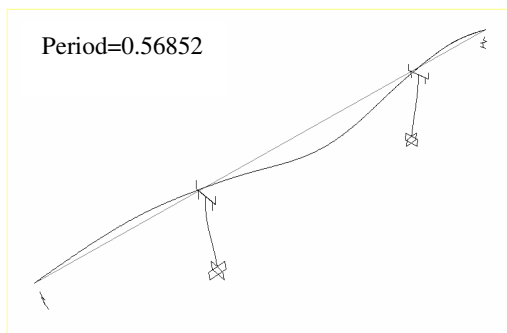
و تنش‌ها در کلیه مقاطع عرشه کنترل شده و در محدوده مجاز می‌باشد (مقادیر تنش‌ها و تغییرمکان‌ها بعداً جهت مقایسه ارائه خواهد شد).

۴- بررسی پاسخ قائم پل

در زمره نرم‌افزارهایی که دارای شرایط کامل و دقیقی جهت مدل‌سازی و تحلیل پل‌های بتنی پیش‌تنیده طره‌ای می‌باشد می‌توان به نرم‌افزار SAP2000.v10، اشاره نمود.

پل نشان داده شده در شکل (۱)، توسط این نرم‌افزار مدل‌سازی شده و سپس تحت شرایط بارگذاری و مشخصات مصالح ذکر شده، تحت مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه السنترو، روند تغییرات شتاب، تغییرمکان و تنش را در طول گام‌های زمانی ذکر شده، در وسط دهانه میانی و روی تکیه‌گاه میانی بررسی شده است.

در پل مدل شده، فرکانس اولین مد ارتعاش سازه در جهت قائم برابر ۱/۷۶ هرتز می‌باشد (شکل (۴))، که تحت مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه السنترو با ماکزیمم شتاب ۰.۲۱g، قرار گرفته است (شکل (۵)).



شکل ۴- اولین مد ارتعاش طبیعی سازه در جهت قائم

تاندون‌ها را از نوع مفتول با سستی کم و جهت محاسبه افت تنش در تاندون‌های پیش‌تنیدگی، مقادیر تورفتگی گیره و ضرایب اعوجاج (k) و انحنا (u) را به ترتیب برابر ۵ mm، 1/mm^{-۶} و ۳.۳×۱۰^{-۶} و ۰.۱۵، در نظر می‌گیریم [۲].

در این مدل‌سازی، مدت زمان ساخت عرشه در حالت طره‌ای، ۲۵ روز در نظر گرفته شده است. سپس تکیه‌گاه‌های کناری ایجاد و نیروی تاندون‌های گروه ۲ اعمال می‌شود، در ادامه قطعه کلید در انتهای طره‌ها در وسط دهانه میانی ایجاد و نیروی تاندون‌های گروه ۳ اعمال شده، و سازه پیوسته می‌شود [۱، ۶]. سپس سربار روسازی کف عرشه به میزان ۱۰٪ وزن قطعات تیر عرشه به سازه پیوسته اعمال می‌شود.

بعد از این مرحله عملکرد عرشه به مدت ۳۵ سال تحت تأثیر رفتارهای وابسته به زمان مصالح، و اعمال مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه در مقاطع زمانی،

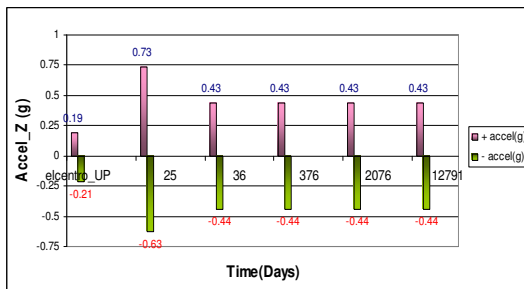
(۱) پس از اتمام عرشه طره‌ای یا ۲۵ روز از شروع ساخت

(۲) پس از اتمام عرشه‌ها بصورت طره‌ای و پیوسته‌سازی عرشه‌ها و ایجاد تکیه‌گاه‌های کناری و اعمال سربار روسازی، یا ۳۵ روز از شروع ساخت

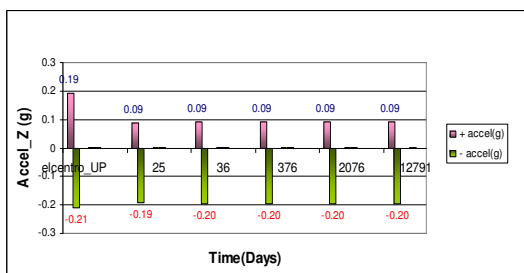
(۳) پس از گذشت مدت زمان یک سال از ساخت پل

(۴) پس از گذشت مدت زمان پنج سال از ساخت پل و در نهایت،
(۵) پس از گذشت مدت زمان ۳۵ سال از ساخت پل، بررسی شده است.

در مدل پل در نظر گرفته شده، با دهانه مشخص شده در شکل (۱) و مشخصات عرشه و مصالح و بارگذاری مرده ذکر شده در بالا و بارزنده گسترده مطابق AASHTO HS20-44، تغییرمکان‌ها

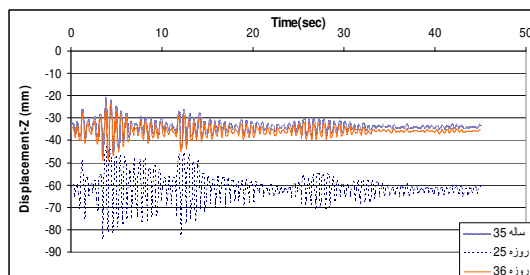


(a)

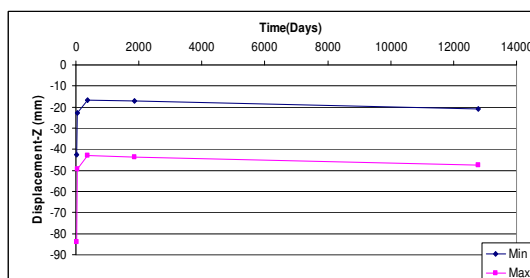


(b)

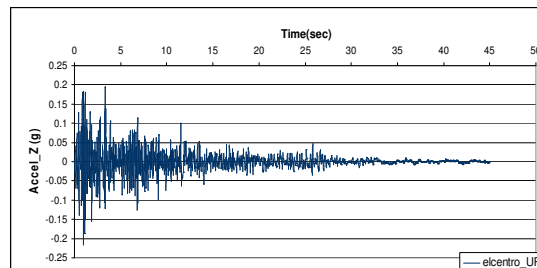
شکل ۶- مقادیر ماکزیمم شتاب ایجاد شده در عرشه پل مدل شده تحت شتاب زمین لرزه السنترو در گام‌های زمانی مختلف در (a) وسط دهانه میانی (b) روی تکیه‌گاه میانی



شکل ۷- تاریخچه تغییر مکان ایجاد شده در وسط دهانه میانی، تحت شتاب زمین لرزه السنترو در گام‌های زمانی مختلف



شکل ۸- دامنه تغییرات تغییر مکان ایجاد شده در وسط دهانه میانی، تحت شتاب زمین لرزه السنترو



شکل ۵- مؤلفه قائم شتاب زمین لرزه السنترو

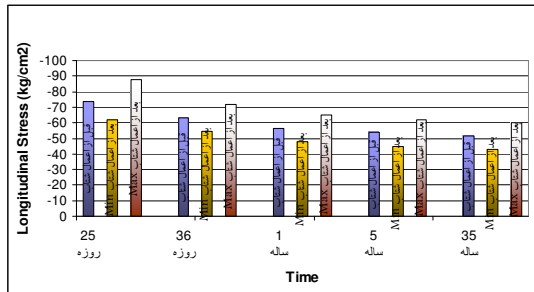
در نمودار شکل (a-۶)، مقادیر شتاب در وسط دهانه میانی و در گام‌های زمانی ذکر شده مشاهده می‌شود. قابل توجه است که ماکزیمم شتاب ایجاد شده در وسط دهانه میانی در حالت طره‌ای برابر $0.73g$ بوده و پس از پیوستگی و یکپارچه شدن عرشه این مقدار به $0.43g$ می‌رسد که این مقدار شتاب نیز تقریباً دو برابر شتاب اعمالی می‌باشد. نقطه قابل توجه دیگر این است که تأثیر تغییرات سختی ایجاد شده در عرشه در طول زمان، تحت اثر رفتارهای تابع زمان مصالح، که در هر گام زمانی به عنوان شرایط اولیه تحلیل دینامیکی و اعمال شتاب قائم زمین لرزه قرار گرفته‌اند، بر روی شتاب ایجاد شده ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن می‌باشد (در حد چند صدم درصد). همچنین مشاهده می‌کنیم که در روی تکیه‌گاه میانی ماکزیمم شتاب ایجاد شده برابر $0.19g$ می‌باشد. که تقریباً برابر شتاب اعمالی می‌باشد (شکل (b-۶)). تاریخچه تغییر مکان‌های ایجاد شده در وسط دهانه میانی در گام‌های زمانی مختلف و در طول مدت زمان اعمال مؤلفه قائم شتاب زمین لرزه در شکل (۷) و (۸)، ارائه شده است. مشاهده می‌شود که ماکزیمم دامنه تغییرات تغییر مکان، تحت اعمال مؤلفه قائم شتاب نسبت به حالت قبل از اعمال شتاب، در وسط دهانه میانی و در حالت طره‌ای به مقدار 20 mm می‌باشد. در حالی که این مقدار پس از پیوستگی و یکپارچه شدن عرشه، 13 mm می‌باشد. مقادیر تغییر مکان در روی تکیه‌گاه میانی تقریباً صفر می‌باشد.

در ادامه به بررسی تغییرات مقادیر تنش در وسط دهانه میانی و روی تکیه‌گاه میانی پرداخته شده است. با توجه به شرایط ساخت و رفتارهای وابسته به زمان مصالح، مقادیر تنش در تمامی مقاطع عرشه در طول زمان در حال تغییر می‌باشد، بنابر این وقوع زمین لرزه در زمان‌های مختلف اثرات مختلفی را از لحاظ مقادیر تنش، بر روی عرشه پل خواهد گذاشت.

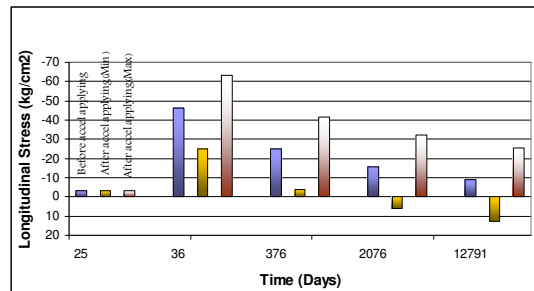
روند تغییرات تنش در گام های زمانی مختلف، در ابتدای دهانه میانی یا همان روی تکیه‌گاه میانی نیز مطابق شکل (۱۰) می‌باشد. مشاهده می‌کنیم در این مقطع از عرشه پل، در صورت یک طراحی مناسب برای بارهای ناشی از وزن عرشه، روسازی و بار ترافیک، تنش‌ها در اثر اعمال مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه در یک بازه مناسبی قرار گرفته و مشکل خاصی ایجاد نخواهد شد.

مسئله دیگری که در این میان ممکن است حائز اهمیت باشد، مسئله اثر حرکات قائم زمین‌لرزه بر روی مقادیر برش، در مقاطع نزدیک تکیه‌گاه‌های میانی است. مطابق آنچه که در شکل (۱۱) نیز دیده می‌شود اثر مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه‌ای با مشخصات ذکر شده در بالا، روی تغییرات مقدار برش مقطعی از تیر عرشه، در محل پایه‌های میانی، تقریباً به میزان ۱۲٪ می‌باشد که این مقدار برای زمین‌لرزه‌های با نسبت شتاب مؤلفه قائم بیشتر و همچنین برای پل‌های با دهانه‌های طولی‌تر مقدار قابل ملاحظه‌ای خواهد بود.

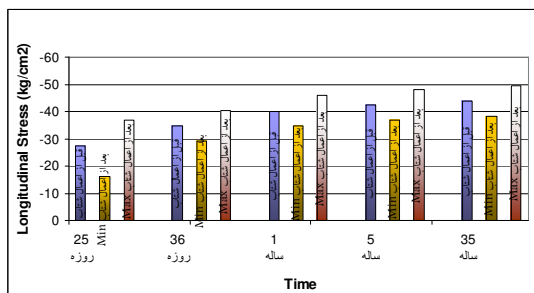
در شکل (۹) مقادیر تنش در وسط دهانه میانی و در گام‌های زمانی مختلف در سه حالت، قبل از اعمال مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه و بعد از اعمال شتاب در دو حالت حداقل و حداکثر، بطور جداگانه در تار بالا و پایین مقطع، نشان داده شده است. در شکل (۹) هم می‌توان روند تغییرات تنش در اثر رفتارهای تابع زمان مصالح و هم اثر اعمال مؤلفه قائم زمین‌لرزه را بر روی تنش‌های موجود در مقطع در گام‌های زمانی مختلف مشاهده نمود. تنش تار پایین مقطع در وسط دهانه میانی از مقدار $46/4 \text{ kg/cm}^2$ فشاری در روز ۳۶ ام (پس از پیوستگی و اعمال بار روسازی)، تحت تأثیر رفتارهای تابع زمان مصالح، بخصوص خزش بتن، به مقدار $15/5 \text{ Kg/cm}^2$ فشاری پس از مدت زمان ۵ سال رسیده، که این مقدار تنش فشاری نیز تحت تأثیر مؤلفه شتاب قائم زمین‌لرزه السنترو با ماکزیمم شتاب $0/21g$ ، به تنش کششی 6 Kg/cm^2 تبدیل شده است. و اگر همین شتاب قائم پس از مدت زمان ۳۵ سال به پل مدل شده اعمال گردد مقدار تنش کششی ایجاد شده در تار پایین مقطع به $12/5 \text{ Kg/cm}^2$ خواهد رسید.



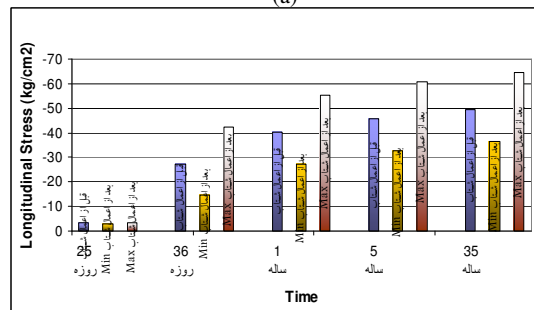
(a)



(a)



(b)



(b)

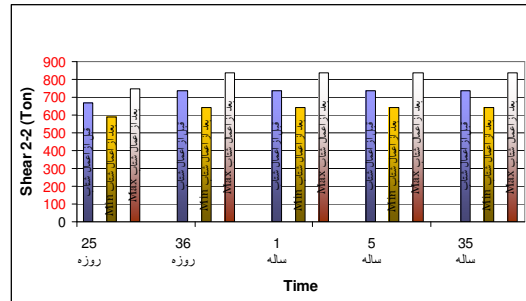
شکل ۱۰- تغییرات تنش در تیر عرشه در محل تکیه‌گاه میانی، در گام‌های زمانی مختلف، تحت تأثیر رفتار تابع زمان مصالح و مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه السنترو (a) تغییرات تنش در تار پایین مقطع (b) تغییرات تنش در تار بالای مقطع

شکل ۹- تغییرات تنش در وسط دهانه میانی، در گام‌های زمانی مختلف، تحت تأثیر رفتار تابع زمان مصالح و مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه السنترو (a) تغییرات تنش در تار پایین مقطع (b) تغییرات تنش در تار بالای مقطع

این گروه تاندون‌های پیوستگی می‌تواند بوسیله پیش‌تنیدگی خارجی، به منظور بهسازی لرزه‌ای برای پل‌های پیش‌تنیده طره‌ای که در آن‌ها اثر حرکات قائم زمین‌لرزه ملحوظ نشده است، انجام گیرد.

مراجع

- [۱] طاحونی، شاپور؛ طراحی پل (پل‌های بتن مسلح، فولادی و پیش‌تنیده)، انتشارات دانشگاه تهران، ویرایش دوم، ۱۳۸۳.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition, Washington, D. C. 1996.
- [3] CEB-FIP Model Code; Evaluation of the Time Dependent Behavior of Concrete, September, 1990.
- [4] Clough, R.W., and Penzien, J.; Dynamics of Structures, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1993.
- [5] CSI Analysis Reference for Sap 2000; Direct-Integration Time History Analysis, Computer and Structures, Inc, Berkeley, California, USA, 2005.
- [6] Sauvageot, G.; Bridge Engineering Handbook Segmental Concrete Bridges.), chapter 11, Ed: Wai-Fah Chen and Lian Duan, Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [7] Weaver, W., and Gere, J.M.; Matrix Analysis of Framed Structures. Third Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [8] Vincent, E.C.; "Compressive Creep of a Lightweight, High Strength Concrete Mixture.", Thesis presented to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering, USA, 2003.
- [9] Parvin, A. and Ma, Z.; "The use of helical spring and fluid damper isolation systems for bridge structures subjected to vertical ground acceleration.", Electronic Journal of Structural Engineering, EJSE, Vol. 1, No. 2, p.p. 98-110, 2001.
- [10] Papazoglou, A.J., and Elnashai, A.S.; "Analytical and Field Evidence of the Damaging Effect of Vertical Earthquake Ground Motion.", Earthquake Engineering



شکل ۱۱- تغییرات مقدار برش در تیر عرشه در محل تکیه‌گاه میانی، در گام‌های زمانی مختلف، تحت تأثیر رفتار تابع زمان مصالح و مؤلفه قائم شتاب زمین‌لرزه السنترو

۵- نتیجه‌گیری

تغییرات دائمی تنش‌ها و تغییر مکان‌های عرشه پل در پل‌های پیش‌تنیده طره‌ای، تحت تأثیر رفتارهای وابسته به زمان مصالح، رفتار عرشه این گونه پل‌ها را در مقابل کلیه بارهای قائم وارده حساس کرده است که نمونه‌ای از آن که اکثراً در طراحی‌ها نیز لحاظ نمی‌شود اثر حرکات قائم زمین‌لرزه‌ها می‌باشد. همان‌طور که مشاهده گردید در دهانه میانی پل یا در حالت کلی دهانه‌هایی که از بهم پیوستن طره‌ها از دو طرف ایجاد می‌گردند، و به ویژه در مقاطع میانی این دهانه‌ها که بیشتر تحت تأثیر رفتارهای وابسته به زمان مصالح، واقع می‌گردند، مسئله تأثیر حرکات قائم زمین‌لرزه حتی در مقادیر کم این حرکات، قابل ملاحظه بوده و منجر به ایجاد مقادیر زیاد تنش کششی گردیده که آن هم مسائل متعاقب خود را به دنبال خواهد داشت. برای جلوگیری از تأثیر زیاد حرکات قائم زمین‌لرزه بر روی عرشه پل‌ها در حالت کلی می‌توان از سیستم‌های اتلاف انرژی که در جهت مولفه قائم نیروها عمل می‌کنند استفاده نمود. علاوه بر این در پل‌های پیش‌تنیده طره‌ای می‌توان بوسیله طراحی و کنترل تاندون‌های پیوستگی دهانه میانی (تاندون‌های گروه ۳ نشان داده شده در شکل (۱)) برای مقادیر شتاب مؤلفه قائم معلوم، همزمان با مسئله رفتارهای وابسته به زمان مصالح، عملکرد عرشه را در مقابل نیروهای قائم وارده بهبود بخشید. همچنین این گروه تاندون‌ها علاوه بر تأثیر بر تنش‌های وسط دهانه میانی، باعث تعدیل مقادیر تنش در کل عرشه گردیده و رفتار کل عرشه را در مقابل نیروهای قائم وارده اصلاح می‌کند، که این تنظیم مقدار

- Engineering Research Report 99-0007, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 1999.
- [13] Vincent, E.C., Townsend, B.D, Weyers, R.E.; "FINAL CONTRACT REPORT CREEP OF HIGH-STRENGTH NORMAL AND LIGHTWEIGHT CONCRETE", Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia, USA, 2004..
- and Structural Dynamics, Vol. 25, p.p. 1109-1137, 1996.
- [11] Saadeghvaziri, M., and Foutch, D.A.; "Dynamic Behavior of R/C Highway Bridges Under the Combined Effect of Vertical and Horizontal Earthquake Motions.", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, p.p. 535-549, 1991.
- [12] Button, M.R. Cronin, C.J., and Mayes, R.L.; "Effect of Vertical Ground Motions on the Structural Response of Highway Bridges", Multidisciplinary Center for Earthquake