مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۲۵-۳۴

Original Article

توسعه‌ی روش طیف ظرفیت و تعیین تغییرمکان هدف در الگوی بار متناسب با جرم برای پل‌های دارای انحناء در پلان

علی گل‌افشار (دانشجوی دکتری)
فرهاد دانشجو* **(استاد)**
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

در نظرگرفتن الگوهای بار جانبی و نحوه‌ی تعیین تغییرمکان هدف در مورد پل‌ها در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی فزاینده، همواره یکی از مسائل مورد توجه پژوهشگران بوده و الگوهای بار متداول آیین‌نامه‌یی، الگوی بار متناسب با شکل مود اصلی سازه و الگوی بار جانبی متناسب با جرم است. در همین زمینه، یکی از روش‌های مورد استفاده برای تعیین تغییرمکان هدف برای الگوی بار جانبی متناسب با شکل مود اصلی سازه، استفاده از روش طیف ظرفیت است. در این نوشتار، یک روش پیشنهادی درخصوص رسم طیف ظرفیت در الگوی بار متناسب با جرم ارائه شده است. نتایج استفاده از روش پیشنهادی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده جهت رسم طیف ظرفیت و تعیین تغییرمکان هدف در یک پل دارای انحناء در پلان، نشان‌دهنده‌ی کارایی روش پیشنهادی در تعیین تغییرمکان هدف در نقاط کنترل در مقایسه با نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده است.

واژگان کلیدی: پل دارای انحناء در پلان، طیف ظرفیت، الگوی بار متناسب با جرم، نقطه‌ی کنترل.

a.golafshar@modares.ac.ir
danesh_fa@modares.ac.ir

۱. مقدمه

در طول سال‌های اخیر، روش تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده (NSP)[۱] به منزله‌ی روشی مناسب جهت بررسی رفتار سازه در ناحیه‌ی غیرخطی گسترش یافته و در آیین‌نامه‌های مختلف نیز برای بررسی سازه‌ها استفاده شده است.[۱و۲] جهت بهبود کارآیی روش مذکور، بررسی الگوی بار جانبی مناسب و روش تعیین تغییرمکان هدف همواره مدنظر پژوهشگران بوده است.

یکی از روش‌های تعیین تغییرمکان هدف در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده، استفاده از روش طیف ظرفیت است. برای ترسیم طیف ظرفیت و تعیین تغییرمکان هدف با مشخص‌کردن یک نقطه‌ی کنترل در روی سازه‌ی چند درجه آزادی، با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده، منحنی برش پایه‌ی کل سازه در برابر جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل استخراج و به طیف ظرفیت سازه یک درجه آزادی معادل تبدیل می‌شود. این روش در مطالعات پژوهشگران مختلف در مورد پل‌ها استفاده شده است.[۳-۸]

در مطالعات صورت‌گرفته، تعیین طیف ظرفیت برای الگوهای بار جانبی انجام شده است که الگوهای بار مذکور، توزیع متناسبی با شکل مودهای ارتعاش سازه دارند، در صورتیکه الگوهای بار جانبی لزوماً متناسب با شکل مود خاصی از سازه نیستند و می‌توانند ترکیبی از شکل‌های مودی سازه باشند،[۹-۱۱] که در این حالت تعیین طیف ظرفیت و تغییرمکان هدف نیاز به بررسی بیشتر خواهد داشت. از جمله‌ی این الگوهای بار می‌توان به الگوی بار متناسب با جرم اشاره کرد. با توجه به اینکه الگوی بار متناسب با جرم یکی از الگوهای بار موردنظر جهت بررسی رفتار سازه‌ها در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده در آیین‌نامه‌هاست، در این نوشتار روش پیشنهادی جهت رسم طیف ظرفیت و تعیین تغییرمکان هدف در هنگام استفاده از الگوی بار متناسب با جرم ارائه شده است. با توجه به اینکه روش کامل تحلیل سازه‌ها در برابر زلزله، استفاده از روش تحلیل دینامیکی غیرخطی است، لذا مبنای بررسی نتایج روش تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده، نتایج روش تحلیل دینامیکی غیرخطی است. کارآیی روش پیشنهادی از طریق مقایسه‌ی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA)[۲] در تعیین جابه‌جایی نقاط کنترل برای یک نمونه پل دارای انحناء در پلان انجام شده است.

در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده با توجه به پیشنهادهای ارائه‌شده از طرف پژوهشگران با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی و رأس پایه‌های با جابه‌جایی بیشینه، میزان جابه‌جایی به‌دست‌آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی افزاینده مقایسه شده است.

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۴/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۳/۹/۴، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۱۴.

۲. تعیین طیف ظرفیت بر حسب مود nاُم سازه‌ی چند درجه آزادی

رابطه‌ی ۱، معادله‌ی تعادل دینامیکی یک سازه‌ی N درجه آزادی را تحت شتاب زمین $(\ddot{u}_g(t))$نشان می‌دهد:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[C]\{\dot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=-[M]\{I\}\ddot{u}_g(t) \quad (۱)$$

که در آن، $[K]$,$[C]$,$[M]$ ماتریس‌های $N\times N$ سختی، میرایی، و جرم سازه است؛ و $\{u(t)\}$,$\{\dot{u}(t)\}$,$\{\ddot{u}(t)\}$ بردارهای $N\times ۱$ جابه‌جایی، سرعت، و شتاب سازه نسبت به حرکت تکیه‌گاه و تابعی از زمان هستند. $\{I\}$ نیز بردار تأثیر است، که اعضاء آن در درجه‌های آزاد هم‌امتداد با حرکت زمین برابر مقدار واحد و در سایر درجه‌های آزاد برابر مقدار صفر است. اگر فرض شود که بردار جابه‌جایی در هر لحظه از شکل مود ارتعاش nام $\{\phi_n\}$ تبعیت کند و فرض شود پاسخ توسط یک مود ارتعاش کنترل می‌شود، آنگاه بردار جابه‌جایی را می‌توان بر حسب جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل $u_c(t)$ با استفاده از رابطه‌ی ۲ ارائه کرد:

$$\{u(t)\}=\{\phi_n\}*u_c(t)\begin{Bmatrix}u_۱(t)\\u_۲(t)\\.\\.\\u_N(t)\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\phi_{۱n}\\\phi_{۲n}\\.\\.\\\phi_{Nn}\end{Bmatrix}*u_c(t) \quad (۲)$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی ۲، ارتباط بردار سرعت در سازه‌ی N درجه‌ی آزاد و سرعت در نقطه‌ی کنترل $\dot{u}_c(t)$، به‌صورت رابطه‌ی ۳ خواهد بود:

$$\{\dot{u}(t)\}=\{\phi_n\}*\dot{u}_c(t)\begin{Bmatrix}\dot{u}_۱(t)\\\dot{u}_۲(t)\\.\\.\\\dot{u}_N(t)\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\phi_{۱n}\\\phi_{۲n}\\.\\.\\\phi_{Nn}\end{Bmatrix}*\dot{u}_c(t) \quad (۳)$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی ۳، ارتباط بردار شتاب در سازه‌ی N درجه‌ی آزاد و شتاب در نقطه‌ی کنترل نیز مطابق رابطه‌ی ۴ خواهد بود:

$$\{\ddot{u}(t)\}=\{\phi_n\}*\ddot{u}_c(t)\begin{Bmatrix}\ddot{u}_۱(t)\\\ddot{u}_۲(t)\\.\\.\\\ddot{u}_N(t)\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\phi_{۱n}\\\phi_{۲n}\\.\\.\\\phi_{Nn}\end{Bmatrix}*\ddot{u}_c(t) \quad (۴)$$

با جایگذاری روابط ۲ الی ۴ در رابطه‌ی ۱، رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید:

$$[M]\{\phi_n\}\ddot{u}_c(t)+[C]\{\phi_n\}\dot{u}_c(t)+[K]\{\phi_n\}u_c(t)=-[M]\{I\}\ddot{u}_g(t) \quad (۵)$$

با پیش‌ضرب رابطه‌ی ۵ در $\{\phi\}_n^T$، رابطه‌ی ۶ به‌دست می‌آید:

$$\{\phi_n\}^T[M]\{\phi_n\}\ddot{u}_c(t)+\{\phi_n\}^T[C]\{\phi_n\}\dot{u}_c(t)+\{\phi_n\}^T[K]\{\phi_n\}u_c(t)=-\{\phi_n\}^T[M]\{I\}\ddot{u}_g(t) \quad (۶)$$

با توجه به رابطه‌ی ۶، با درنظرگرفتن سازه‌ی یک درجه آزادی معادل، ارتباط بین جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل و جابه‌جایی سازه‌ی یک درجه آزادی معادل $x_e(t)$ به‌صورت رابطه‌ی ۷ در نظر گرفته می‌شود:

$$u_c(t)=\Gamma_n*x_e(t)$$
$$\Gamma_n=\frac{\{\phi_n\}^T[M]\{I\}}{\{\phi_n\}^T[M]\{\phi_n\}} \quad (۷)$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی ۷، ارتباط بین سرعت در نقطه‌ی کنترل و سرعت در سازه‌ی یک درجه آزادی معادل از رابطه‌ی ۸ تعیین می‌شود:

$$\dot{u}_c(t)=\Gamma_n*\dot{x}_e(t) \quad (۸)$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌ی ۸، ارتباط بین شتاب در نقطه‌ی کنترل و شتاب در سازه‌ی یک درجه آزادی معادل مطابق رابطه‌ی ۹ است:

$$\ddot{u}_c(t)=\Gamma_n*\ddot{x}_e(t) \quad (۹)$$

با جایگذاری میزان جابه‌جایی، سرعت، و شتاب نقطه‌ی کنترل بر حسب جابه‌جایی، سرعت، و شتاب سازه‌ی یک درجه آزادی معادل از روابط ۷ الی ۹ در رابطه‌ی ۶، معادله‌ی تعادل سازه‌ی یک درجه آزادی معادل مطابق رابطه‌ی ۱۰ تعیین می‌شود:

$$\{\phi_n\}^T[M]\{\phi_n\}\Gamma_n\ddot{x}_e(t)+\{\phi_n\}^T[C]\{\phi_n\}\Gamma_n\dot{x}_e(t)+\{\phi_n\}^T[K]\{\phi_n\}\Gamma_n x_e(t)=-\{\phi_n\}^T[M]\{I\}\ddot{u}_g(t) \quad (۱۰)$$

با درنظرگرفتن تعریف Γ_n براساس رابطه‌ی ۷ در رابطه‌ی ۱۰، معادله‌ی تعادل سازه‌ی یک درجه آزادی معادل مطابق رابطه‌ی ۱۱ به‌دست می‌آید:

$$M_{en}\ddot{x}_e(t)+C_{en}\dot{x}_e(t)+K_{en}x_e(t)=-M_{en}\ddot{u}_g(t) \quad (۱۱)$$

که در آن، M_{en} جرم سازه‌ی یک درجه آزادی معادل، C_{en} میرایی سازه‌ی یک درجه آزادی معادل، و K_{en} سختی سازه‌ی یک درجه آزادی معادل هستند، که در روابط ۱۲ الی ۱۴ تعریف شده‌اند:

$$M_{en}=\{\phi_n\}^T[M]\{I\} \quad (۱۲)$$
$$C_{en}=\{\phi_n\}^T[C]\{\phi_n\}\frac{\{\phi_n\}^T[M]\{I\}}{\{\phi_n\}^T[M]\{\phi_n\}} \quad (۱۳)$$
$$K_{en}=\{\phi_n\}^T[K]\{\phi_n\}\frac{\{\phi_n\}^T[M]\{I\}}{\{\phi_n\}^T[M]\{\phi_n\}} \quad (۱۴)$$

در صورتی که بیشینه‌ی جابه‌جایی در سازه‌ی یک درجه آزادی معادل برابر با Sd_{en} در نظر گرفته شود، با استفاده از روابط ۲ و ۷، ارتباط بین جابه‌جایی بیشینه در سیستم یک درجه آزادی معادل و بردار جابه‌جایی بیشینه در سیستم N درجه آزادی به‌صورت رابطه‌ی ۱۵ برقرار می‌شود:

$$\{u(t)\}_{\max}=\{\phi_n\}*\Gamma_n*Sd_{en} \quad (۱۵)$$

در صورتی که رابطه‌ی ۱۵ برای یک نقطه‌ی انتخابی از سازه در نظر گرفته شود، می‌توان ارتباط بین جابه‌جایی بیشینه در سازه‌ی یک درجه آزادی معادل و جابه‌جایی بیشینه در نقطه‌ی انتخابی u_{con} در سازه را به‌صورت رابطه‌ی ۱۶ بیان کرد، که در

آن ϕ_{nc} مؤلفه‌ی مربوط به نقطه‌ی انتخابی در جهت جانبی موردنظر در بردار شکل مود nام است:

$$u_{con} = \phi_{nc} * \Gamma_n * Sd_{en} \quad (۱۶)$$

براساس رابطه‌ی ۱۶، ارتباط بین جابه‌جایی بیشینه در سازه‌ی یک درجه‌ی آزادی معادل و جابه‌جایی بیشینه در نقطه‌ی کنترل به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ نیز می‌تواند بازنویسی شود:

$$Sd_{en} = \frac{u_{con}}{\phi_{nc} * \Gamma_n} \quad (۱۷)$$

با توجه به رابطه‌ی ۷، ارتباط بین برش پایه در سازه‌ی یک درجه آزادی معادل (V_{en}) و برش پایه‌ی سازه‌ی چند درجه آزادی (V_n) به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ درنظر گرفته شود:

$$V_n = \Gamma_n * V_{en} \quad (۱۸)$$

در این صورت برش پایه‌ی بیشینه در سازه‌ی یک درجه آزادی معادل از رابطه‌ی ۱۹ محاسبه می‌شود:

$$V_{en} = M_{en} * Sa_{en} \quad (۱۹)$$

که در آن، Sa_{en} بیشینه‌ی شتاب در سازه‌ی یک درجه آزادی معادل است. با جایگذاری رابطه‌ی ۱۹ در رابطه‌ی ۱۸، رابطه‌ی ۲۰ به‌دست می‌آید:

$$V_n = \Gamma_n * M_{en} * Sa_{en} \quad (۲۰)$$

با جایگذاری M_{en} از رابطه‌ی ۱۲ و جایگذاری Γ_n از رابطه‌ی ۷ در رابطه‌ی ۲۰، ارتباط بین شتاب بیشینه در سازه‌ی یک درجه آزادی معادل و برش پایه‌ی بیشینه در سازه‌ی چند درجه آزادی به‌صورت رابطه‌ی ۲۱ به‌دست می‌آید:

$$Sa_{en} = \frac{V_n}{\frac{\{\phi\}_n^T [M]\{I\}}{\{\phi\}_n^T [M]\{\phi\}_n} \{\phi\}_n^T [M] \{I\}} \quad (۲۱)$$

مبنای ترسیم طیف ظرفیت در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده نیز در هر گام i استفاده از روابط ۱۷ و ۲۱ براساس شکل مود nام است. براساس روابط ۱۷ و ۲۱، برای تعیین طیف ظرفیت از روابط ۲۲ و ۲۳ استفاده می‌شود:

$$Sd_{en}^i = \frac{u_{con}^i}{\phi_{nc} * \Gamma_n} \quad (۲۲)$$

$$Sa_{en}^i = \frac{V_n^i}{\frac{\{\phi\}_n^T [M]\{I\}}{\{\phi\}_n^T [M]\{\phi\}_n} \{\phi\}_n^T [M] \{I\}} \quad (۲۳)$$

در رابطه‌ی ۲۲، u_{con}^i جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل درگام iام در جهت جانبی موردنظر و Sd_{en}^i جابه‌جایی طیفی در طیف ظرفیت درگام iام براساس شکل مود nام است. در رابطه‌ی ۲۳، V_n^i برش پایه درگام iام براساس شکل مود nام و Sa_{en}^i شتاب طیفی در طیف ظرفیت درگام iام براساس شکل مود nام است.

۳. ارائه‌ی روش پیشنهادی جهت رسم طیف ظرفیت سازه‌ی یک درجه آزادی معادل در الگوی بار متناسب با جرم

با توجه به روابط ارائه‌شده در بخش ۲ ملاحظه می‌شود که جهت رسم طیف ظرفیت از روابط ۲۲ و ۲۳ استفاده می‌شود. مبنای روابط ۲۲ و ۲۳، استفاده از شکل مود nام سازه است و این شکل در طول تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده ثابت فرض می‌شود. با توجه به اینکه پاسخ سازه می‌تواند ترکیبی از پاسخ مودهای مختلف آن باشد، در این نوشتار روشی ارائه شده است که اثر ترکیب مودها در تعیین طیف ظرفیت با توجه به الگوی بار لحاظ می‌شود. ایده‌ی استفاده‌شده در روش پیشنهادی در این است که برای رسم طیف ظرفیت به جای استفاده از بردار شکل مود nام از بردار جابه‌جایی سازه در ناحیه‌ی خطی استفاده می‌شود. با توجه به استفاده از بردار جابه‌جایی سازه به جای استفاده از بردار شکل مود nام، اثر مودهای مختلف مستقیماً در بردار جابه‌جایی سازه لحاظ می‌شود و در رسم طیف ظرفیت به‌کار می‌رود. بر این اساس در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده با الگوی بار متناسب با جرم در هر گام i برای تعیین جابه‌جایی طیفی در طیف ظرفیت از رابطه‌ی ۲۴ و برای تعیین شتاب طیفی در طیف ظرفیت از رابطه‌ی ۲۵ استفاده می‌شود. در روابط ۲۴ و ۲۵، $\{u\}_e$ بردار جابه‌جایی سازه در ناحیه‌ی خطی است و $u_{co,e}$ درایه‌ی مربوط به جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل در جهت جانبی موردنظر در بردار $\{u\}_e$ و u_{co}^i، میزان جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل در جهت جانبی موردنظر درگام iام است. Sd^i جابه‌جایی طیفی درگام iام، V^i برش پایه درگام iام و Sa^i شتاب طیفی درگام iام است. مراحل ترسیم طیف ظرفیت در روش پیشنهادی به این صورت است:

۱. تعیین نقطه‌ی کنترل.

۲. تعیین بردار جابه‌جایی سازه در ناحیه‌ی خطی براساس جابه‌جایی گره‌ها در جهات جانبی $\{u\}_e$.

۳. تعیین جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل در ناحیه‌ی خطی در جهت جانبی موردنظر $u_{co,e}$ از بردار $\{u\}_e$.

۴. تعیین نیروی برشی جانبی کلی سازه‌ی چند درجه آزادی و جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل در جهت جانبی موردنظر درگام iام از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده (u_{co}^i, V^i).

۵. تعیین جابه‌جایی طیفی در طیف ظرفیت جابه‌جایی درگام iام (Sd^i) از رابطه‌ی ۲۴ و تعیین شتاب طیفی در طیف ظرفیت شتاب درگام iام (Sa^i) از رابطه‌ی ۲۵.

$$Sd^i = \frac{u_{co}^i}{u_{co,e} * \frac{\{u\}_e^T [M]\{I\}}{\{u\}_e^T [M]\{u\}_e}} \quad (۲۴)$$

$$Sa^i = \frac{V^i}{\frac{\{u\}_e^T [M]\{I\}}{\{u\}_e^T [M]\{u\}_e} \{u\}_e^T [M] \{I\}} \quad (۲۵)$$

۴. تعیین طیف تقاضا و تعیین تغییرمکان هدف

درخصوص تعیین طیف تقاضا، روش‌های متفاوتی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به طیف تقاضا با استفاده از میرایی مؤثر[۱] و یا طیف تقاضا با استفاده از شکل‌پذیری ثابت اشاره کرد.[۱۲] در این مطالعه از طیف تقاضا با شکل‌پذیری ثابت استفاده و تعیین طیف تقاضا براساس پاسخ سازه‌های یک درجه آزادی تحت اثر زلزله در تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی با استفاده از نرم‌افزار Seismosignal،[۱۳] انجام شده است. برای تعیین نقطه‌ی تقاطع طیف ظرفیت و طیف تقاضا، از منحنی دو خطی‌شده‌ی طیف ظرفیت استفاده می‌شود و برای دو خطی‌کردن طیف ظرفیت، یکسان‌بودن سطح زیر منحنی دو خطی و طیف

ظرفیت لحاظ شده است. با توجه به استفاده از میرایی رایلی در تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی سازه‌ی چند درجه‌ی آزادی از همان ضرایب میرایی رایلی و بسامد دورانی سازه‌ی یک درجه آزادی جهت تعیین میرایی در طیف تقاضا استفاده شده است.

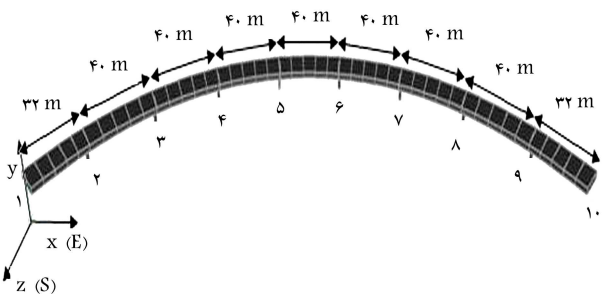
با تعیین تغییرمکان طیفی در نقطه‌ی هدف Sd_t براساس تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا، میزان جابه‌جایی در نقطه‌ی کنترل از رابطه‌ی ۲۶ به‌دست می‌آید:

$$u_{co} = Sd_t * u_{co,e} * \frac{\{u\}_e^T [M] \{I\}}{\{u\}_e^T [M] \{u\}_e} \qquad (۲۶)$$

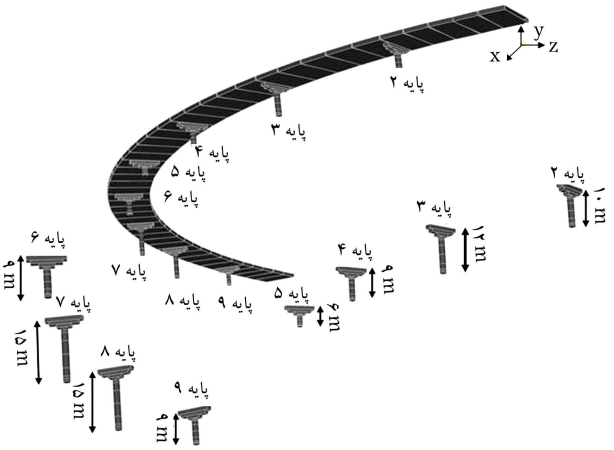
۵. معرفی پل مورد مطالعه و نحوه‌ی مدل‌سازی

برای بررسی روش پیشنهادی از مدل پل دارای انحنا در مطالعات بردت و همکاران،[۱۴] استفاده شده است. نرم‌افزار مورد استفاده در مدل‌سازی، نرم‌افزار ZEUS-NL،[۱۵] است. پل دارای انحناء مورد مطالعه با طول ۳۴۴ متر، ۹ دهانه و ۸ پایه و نیز عرشه‌ی بتنی با مقطع جعبه‌یی دارد. دهانه‌های ابتدا و انتهای پل با طول ۳۲ متر و دهانه‌های میانی با طول ۴۰ متر هستند. پایه‌های پل به‌صورت تک ستونی با مقطع دایره و شعاع انحناء عرشه برابر ۲۰۰ متر است. اتصال پایه‌ها به تکیه‌گاه‌شان به‌صورت گیردار درنظر گرفته شده است.

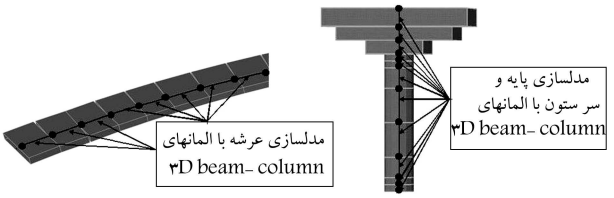
برای مدل‌سازی اتصال عرشه به پایه و کوله‌ها از المان‌های اتصال شامل فنرهای با رفتار خطی و غیرخطی و در مدل‌سازی پایه و عرشه نیز از المان‌های تیر ـ ستون استفاده و رفتار غیرخطی در آنها براساس المان‌های فایبر در نظر گرفته شده است. در تحلیل‌های غیرخطی، اثرات ناشی از غیرخطی هندسی و غیرخطی ماده لحاظ شده است. مدل‌سازی جرم به‌صورت متمرکز در گره‌های مربوط به المان‌های عرشه و سرستون در نظر گرفته شده است. هندسه‌ی پل در فضای سه بُعدی به همراه شماره‌ی پایه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۱، جهت شمالی ـ جنوبی متناظر با جهت ارتعاش عرضی (راستای z) و جهت شرقی ـ غربی متناظر با جهت ارتعاش طولی (راستای x) است. جهت جنوبی منطبق بر جهت مثبت محور z و جهت شرقی منطبق بر جهت مثبت محور x است. کوله‌ی غربی با شماره‌ی ۱، کوله‌ی شرقی با شماره‌ی ۱۰ و پایه‌ها نیز با شماره‌های ۲ الی ۹ مشخص شده‌اند. نحوه‌ی قرارگیری پایه‌ها و ارتفاع آنها نیز در فضای سه بُعدی بر حسب متر در شکل ۲، نحوه‌ی مدل‌سازی عرشه، پایه و سرستون در شکل ۳ و مقطع عرشه و پایه نیز در شکل ۴ نشان داده شده است.



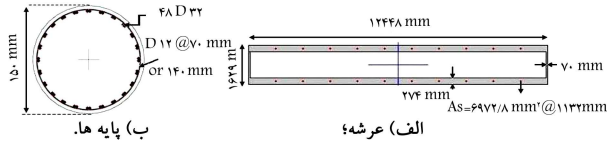
شکل ۱. هندسه‌ی پل مورد مطالعه در فضای سه بُعدی به همراه شماره‌ی پایه‌ها، طول دهانه‌ها، و جهات محورهای مختصات.



شکل ۲. نحوه‌ی قرارگیری پایه‌ها و ارتفاع پایه‌ها در فضای سه بُعدی در پل مورد مطالعه.



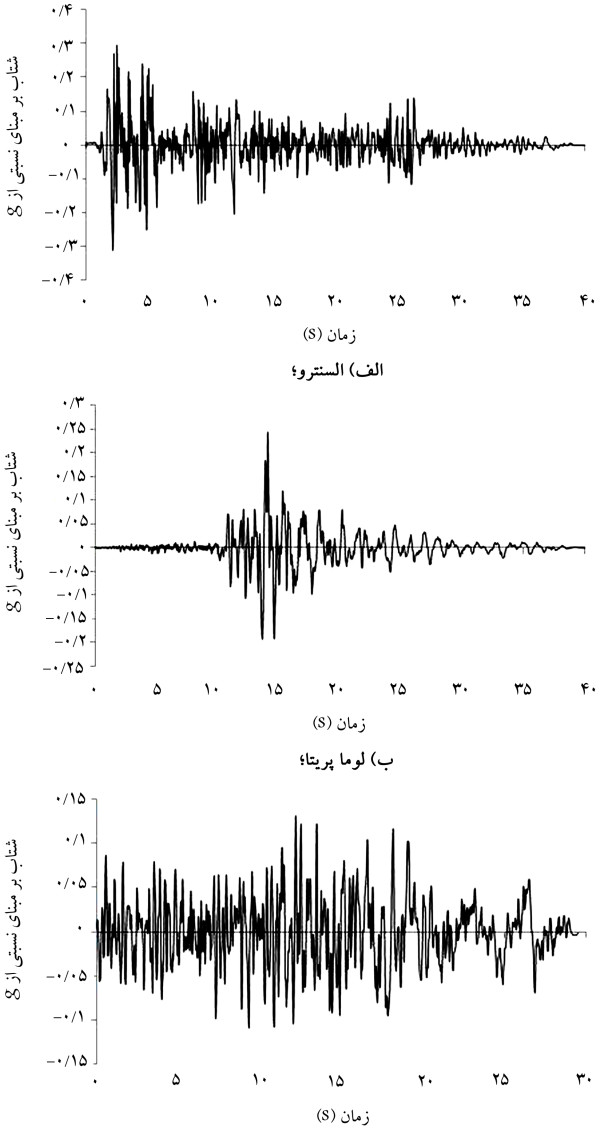
شکل ۳. نحوه‌ی مدل‌سازی عرشه، پایه‌ها و سرستون با استفاده از المان‌های تیر ـ ستون.



شکل ۴. مقطع اعضا.

۶. انجام تحلیل دینامیکی افزاینده و تعیین پایه‌ی بحرانی

با توجه به اینکه نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به‌عنوان معیار برای بررسی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده به‌کار می‌رود، در این قسمت با درنظرگرفتن سه زلزله به تعیین ظرفیت نهایی جابه‌جایی در پل مورد مطالعه تحت اثر زلزله پرداخته شده است. تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله‌های السنترو، لوماپریتا، و منجیل در شکل ۵ نشان داده شده است. در تحلیل دینامیکی افزاینده، پل مورد مطالعه در جهت عرضی (راستای z) تحت اثر زمین‌لرزه‌های السنترو، لوماپریتا، و منجیل با شدت‌های مختلف قرار گرفته و بیشینه‌ی مقادیر جابه‌جایی رأس پایه‌ها در جهت عرضی در هر مرحله ثبت شده است. افزایش شدت زمین‌لرزه از طریق ضرب یک کمیت اسکالر به‌عنوان ضریب مقیاس در مقادیر تاریخچه‌ی زمانی شتاب هر زلزله انجام می‌شود. افزایش شدت زمین‌لرزه تا جایی ادامه می‌یابد که برای یکی از پایه‌ها، جابه‌جایی بیشینه‌ی رأس آن پایه به ظرفیت جابه‌جایی آن پایه برسد. ضریب مقیاسی که در آن بیشینه‌ی جابه‌جایی در رأس یکی از پایه‌ها به ظرفیت جابه‌جایی آن پایه می‌رسد، به‌عنوان مقیاس ایجادکننده‌ی ظرفیت نهایی و پایه‌ی موردنظر به‌عنوان پایه‌ی بحرانی در نظر گرفته شده است. برای درنظرگرفتن میرایی در تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی از میرایی رایلی استفاده شده است. برای تعیین ظرفیت جابه‌جایی در رأس



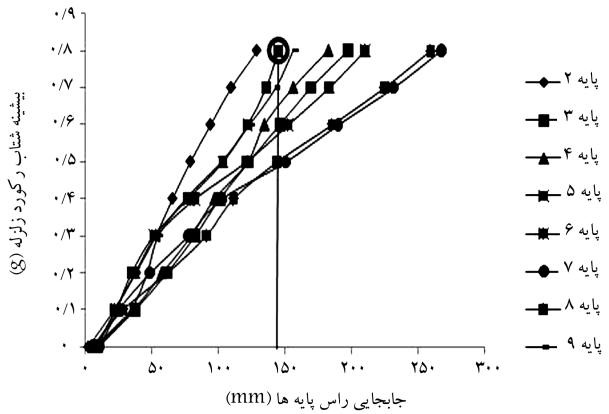
شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی رکوردهای اعمال‌شده.

جدول ۱. ظرفیت جابه‌جایی رأس پایه‌ها.

شماره‌ی پایه	۲	۳	۴	۵
ظرفیت جابه‌جایی (میلی‌متر)	۳۵۸	۵۰۰	۲۹۵	۱۴۵
شماره‌ی پایه	۶	۷	۸	۹
ظرفیت جابه‌جایی (میلی‌متر)	۲۹۵	۷۵۷	۷۵۷	۲۹۵

پایه‌های پل نیز از روابط آیین‌نامه‌ی CALTRANS،[۱۶] استفاده شده است. براساس روابط آیین‌نامه‌ی مذکور، میزان ظرفیت جابه‌جایی رأس پایه‌های پل محاسبه و نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای تعیین زلزله‌های متناظر با ظرفیت نهایی جابه‌جایی سازه، نتایج بیشینه‌ی شتاب زلزله در برابر جابه‌جایی بیشینه‌ی رأس پایه‌ها برای شدت‌های متفاوت از زلزله‌ی السنترو به‌طور نمونه در شکل ۶ نشان داده شده است، که در آن جابه‌جایی بیشینه در رأس پایه‌ی ۵ در زلزله‌ی السنترو با PGA برابر با ۰٫۸ شتاب ثقل



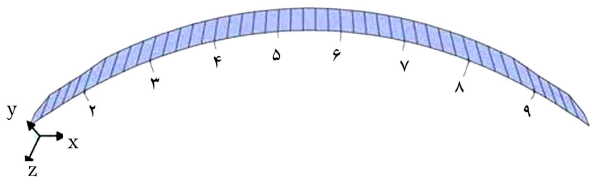
شکل ۶. تعیین زلزله‌ی متناظر با ظرفیت سازه در تحلیل دینامیکی افزاینده تحت رکورد زلزله‌ی السنترو.

به ظرفیت جابه‌جایی آن یعنی مقدار ۱۴۵ میلی‌متر رسیده و برای بقیه‌ی پایه‌ها، بیشینه‌ی جابه‌جایی در رأس آنها کمتر از مقادیر ظرفیت جابه‌جایی در رأس آنهاست. لذا زلزله‌ی السنترو متناظر با ظرفیت نهایی سازه هنگامی است که این زلزله با PGA برابر با ۰٫۸ شتاب ثقل به سازه وارد می‌شود و پایه‌ی بحرانی پایه‌ی ۵ است.

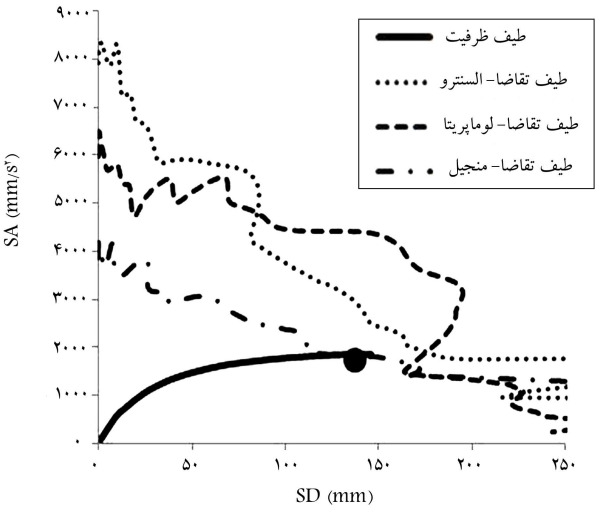
با انجام تحلیل‌های مشابه برای زلزله‌های لوماپریتا و منجیل نیز نتایج تحلیل دینامیکی افزاینده بررسی و در آنها مشخص شده است در مقیاسی از زلزله که جابه‌جایی بیشینه در رأس پایه‌ی ۵ به ظرفیت جابه‌جایی آن می‌رسد، جابه‌جایی هیچ‌کدام از پایه‌های دیگر هنوز به ظرفیت جابه‌جایی نرسیده است؛ لذا، در زلزله‌های لوماپریتا و منجیل نیز پایه‌ی بحرانی پایه‌ی ۵ بوده و بیشینه‌ی شتاب زلزله متناظر با ظرفیت نهایی برای زلزله‌ی لوماپریتا برابر ۰٫۶۱ شتاب ثقل و برای زلزله‌ی منجیل برابر ۰٫۳۹ شتاب ثقل است. با تعیین زلزله‌های متناظر با ظرفیت سازه از زلزله‌های موردنظر برای تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده استفاده می‌شود.

۷. کاربرد روش پیشنهادی در الگوی بار متناسب با جرم و درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی

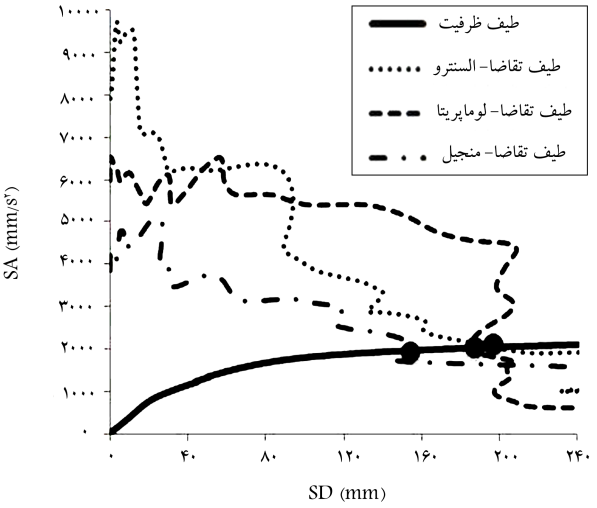
الگوی بار متناسب با جرم در مورد پل مورد مطالعه براساس آیین‌نامه‌ی یوروکد،[۲] و جرم متمرکز در گره‌ها در راستای محور z و در دو سمت شمالی و جنوبی به‌طور مجزا به سازه اعمال می‌شود. نحوه‌ی توزیع بار در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در مطالعات پژوهشگران رأس پایه‌ی بحرانی به‌عنوان نقطه‌ی کنترل پیشنهاد شده است،[۷] با اعمال الگوی بار به سمت شمالی، طیف ظرفیت با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی و طیف تقاضای زلزله‌های موردنظر در شکل ۸ نمایش داده شده است. در صورتی که محدوده‌ی ظرفیت سازه در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده تا نقطه‌ی بیشینه‌ی ظرفیت باربری جانبی سازه در نظرگرفته شود، طیف ظرفیت در شکل ۸ نقطه‌ی تقاطعی با طیف تقاضا در زلزله‌های السنترو و لوماپریتا نخواهد داشت و فقط نقطه‌ی تقاطع با طیف زلزله‌ی منجیل خواهد بود. لذا در این حالت تغییرمکان هدف و جابه‌جایی متناظر در رأس پایه‌ی بحرانی فقط برای زلزله‌ی منجیل محاسبه شده است. در اثر اعمال الگوی بار جانبی به سمت جنوبی نیز طیف ظرفیت با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی رسم



شکل ۷. توزیع بار جانبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده.



شکل ۸. تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی (اعمال الگوی بار به سمت شمالی).



شکل ۹. تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی (اعمال الگوی بار به سمت جنوبی).

شده و نتایج آن به همراه طیف تقاضا در شکل ۹ نشان داده شده است، که در این حالت تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا در محدوده‌ی ظرفیت سازه برای تمامی زلزله‌ها ایجاد می‌شود. میزان اختلاف (DIFF) بین نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده از رابطه‌ی ۲۷ محاسبه می‌شود، که در آن Δ_{NSP} میزان جابه جایی تعیین‌شده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و Δ_{IDA} میزان جابه‌جایی تعیین‌شده از روش تحلیل دینامیکی افزاینده ناشی از اعمال زلزله‌ی متناظر با ظرفیت نهایی است:

جدول ۲. مقایسه‌ی جابه‌جایی در رأس پایه‌ی بحرانی براساس الگوی بار به سمت شمال.

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (٪)
السنترو	۱۴۵	-	-
لوماپریتا	۱۴۵	-	-
منجیل	۱۴۵	۱۳۳	−۸

جدول ۳. مقایسه‌ی جابه‌جایی در رأس پایه‌ی بحرانی براساس الگوی باربه سمت جنوب.

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (٪)
السنترو	۱۴۵	۸۴	−۴۲
لوماپریتا	۱۴۵	۷۹	−۴۶
منجیل	۱۴۵	۶۲	−۵۷

$$\mathrm{DIFF} = \frac{(\Delta_{\mathrm{NSP}} - \Delta_{\mathrm{IDA}})}{\Delta_{\mathrm{IDA}}} \times ۱۰۰ \qquad (۲۷)$$

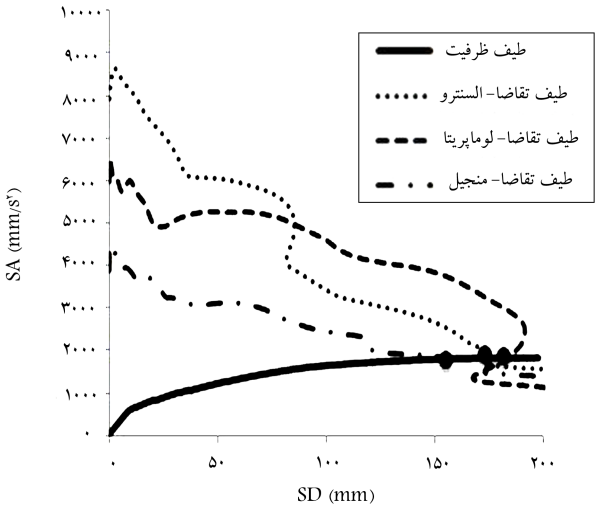
مقایسه‌ی جابه‌جایی رأس پایه‌ی بحرانی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده (NSP) و تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در جدول ۲، نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده براساس اعمال الگوی بار به سمت شمالی و نتایج جدول ۳، براساس اعمال الگوی بار به سمت جنوبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده بوده است.

بررسی مقدار جابه‌جایی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در اعمال الگوی بار به سمت جنوبی برای تمامی زلزله‌ها، میزان جابه‌جایی به‌دست‌آمده برای رأس پایه‌ی بحرانی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده نسبت به نتایج تحلیل دینامیکی افزاینده با مقادیر کوچک‌تر است. در اعمال الگوی بار به سمت شمالی، جابه‌جایی به‌دست‌آمده برای رأس پایه‌ی بحرانی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده برای زلزله‌ی منجیل به نتیجه‌ی تحلیل دینامیکی افزاینده نزدیک و اختلاف آن منهای ۸٪ است.

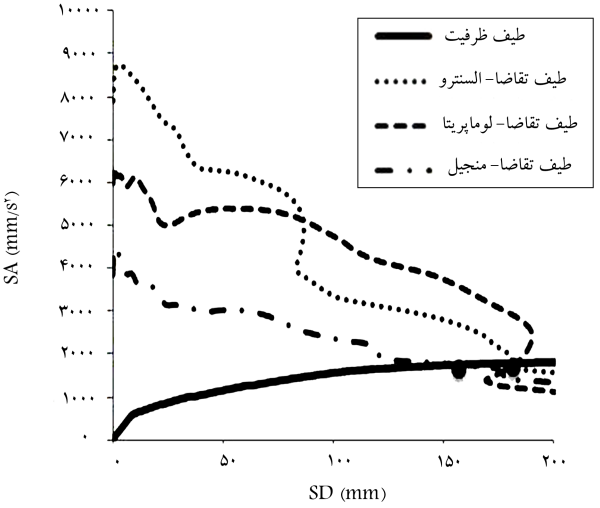
۸. کاربرد روش پیشنهادی در الگوی بار متناسب با جرم و درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در ناحیه‌ی وقوع جابه‌جایی بیشینه

با توجه به اینکه در مطالعات پژوهشگران در مورد پل‌ها نقطه‌ی با جابه‌جایی بیشینه نیز به‌عنوان نقطه‌ی کنترل پیشنهاد شده است.[۵و۴] بررسی تغییرشکل سازه نشان می‌دهد جابه‌جایی‌های بیشینه در محدوده‌ی پایه‌های ۷ و ۸ ایجاد می‌شوند، و جهت بررسی روش پیشنهادی در رسم طیف ظرفیت و تعیین تغییرمکان هدف، رأس پایه‌های ۷ و ۸ به‌عنوان نقطه‌ی کنترل درنظرگرفته شده‌اند. طیف ظرفیت در اثر اعمال الگوی بار به سمت شمالی با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌های ۷ و ۸ به همراه طیف تقاضای زلزله‌های اعمالی و نقطه‌ی تقاطع طیف ظرفیت و طیف تقاضا در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

طیف ظرفیت در اثر اعمال الگوی بار به سمت جنوبی با درنظرگرفتن نقطه‌ی



شکل ۱۰. تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷ (اعمال الگوی بار به سمت شمالی).



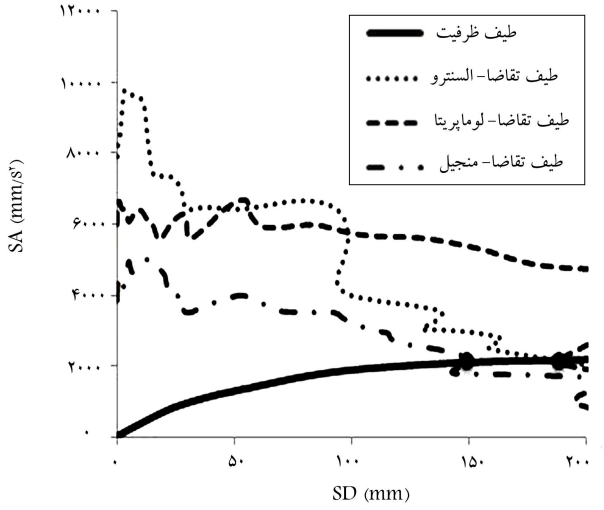
شکل ۱۱. تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۸ (اعمال الگوی بار به سمت شمالی).

جدول ۴. مقایسه‌ی جابه‌جایی در رأس پایه‌ی ۷ براساس الگوی بار به سمت شمال.

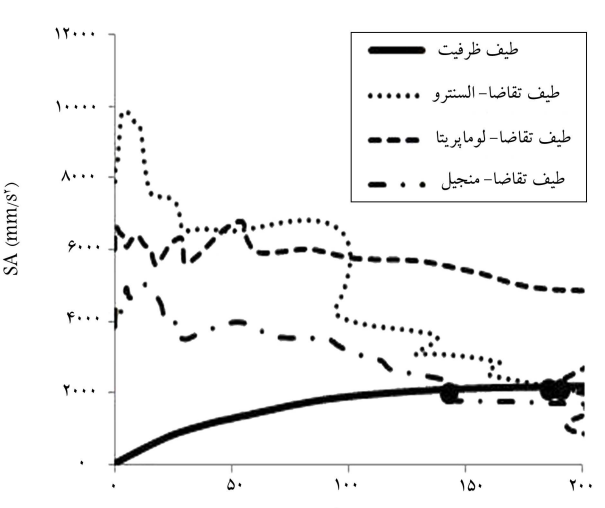
نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (٪)
السنترو	۲۶۷	۲۱۹	−۱۸
لوماپریتا	۲۲۳	۲۲۸	۲
منجیل	۲۲۳	۱۹۵	−۱۳

کنترل در رأس پایه‌های ۷ و ۸ به همراه طیف تقاضای زلزله‌های اعمالی و نقطه‌ی تقاطع طیف ظرفیت و طیف تقاضا در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است.

میزان جابه‌جایی رأس پایه‌های ۷ و ۸ در الگوی بار متناسب با جرم برای زلزله‌های مختلف به همراه جابه‌جایی بیشینه‌ی به‌دست‌آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی در رأس پایه‌های ۷ و ۸ در جدول‌های ۴ الی ۷ نشان داده شده است. نتایج جدول‌های ۴ و ۶ براساس اعمال الگوی بار به سمت شمالی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و نتایج جدول‌های ۵ و ۷ براساس اعمال الگوی بار به سمت جنوبی هستند.



شکل ۱۲. تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷ (اعمال الگوی بار به سمت جنوبی).



شکل ۱۳. تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۸ (اعمال الگوی بار به سمت جنوبی).

جدول ۵. مقایسه‌ی جابه‌جایی در رأس پایه‌ی ۷ براساس الگوی بار به سمت جنوب.

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (٪)
السنترو	۲۶۷	۲۳۴	−۱۲
لوماپریتا	۲۲۳	۲۳۴	۵
منجیل	۲۲۳	۱۸۶	−۱۷

بررسی جدول‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که اختلاف جابه‌جایی به‌دست‌آمده برای رأس پایه‌ی ۷ در اعمال الگوی بار جانبی به سمت شمالی نسبت به نتایج تحلیل دینامیکی افزاینده بین ۲٪ و منهای ۱۸٪ بوده و در اعمال الگوی بار به سمت جنوبی بین ۵٪ و منهای ۱۷٪ است.

همچنین بررسی اختلاف جابه‌جایی به‌دست‌آمده در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده برای رأس پایه‌ی ۸ نشان می‌دهد که اعمال الگوی بار به سمت جنوبی موجب

جدول ۶. مقایسه‌ی جابه‌جایی در رأس پایه‌ی ۸ براساس الگوی بار به سمت شمال.

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (٪)
السنترو	۲۵۹	۱۷۹	−۳۱
لوماپریتا	۲۱۷	۱۷۹	−۱۸
منجیل	۲۳۰	۱۵۷	−۳۲

جدول ۷. مقایسه‌ی جابه‌جایی در رأس پایه‌ی ۸ براساس الگوی بار به سمت جنوب.

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (٪)
السنترو	۲۵۹	۲۴۷	−۵
لوماپریتا	۲۱۷	۲۵۲	۱۶
منجیل	۲۱۳	۱۹۵	−۱۵

تعیین جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر برای رأس پایه‌ی ۸ می‌شود و همچنین میزان جابه‌جایی به‌دست‌آمده برای رأس پایه‌ی ۸ در اثر اعمال الگوی بار جانبی به سمت جنوبی به نتایج تحلیل دینامیکی افزاینده نزدیک‌تر است. اختلاف جابه‌جایی تعیین‌شده برای رأس پایه‌ی ۸ نسبت به نتایج تحلیل دینامیکی افزاینده در اثر اعمال الگوی بار به سمت شمالی بین ۱۸−٪ و ۳۲−٪ و در اعمال الگوی بار به سمت جنوبی بین ۱۵−٪ و ۱۶−٪ بوده است.

۱.۸. بررسی جابه‌جایی در رأس پایه‌های دیگر سازه با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷

جهت بررسی جابه‌جایی در رأس پایه‌های دیگر سازه در اثر اعمال الگوی بار متناسب با جرم در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده، میزان جابه‌جایی در رأس تمامی پایه‌ها متناظر با جابه‌جایی در رأس پایه‌ی ۷ (نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷) در جدول‌های ۸ الی ۱۰ به همراه جابه‌جایی رأس پایه‌ها از تحلیل دینامیکی افزاینده در زلزله‌ی متناظر با ظرفیت نشان داده شده است.

در جدول‌های ۸ الی ۱۰، میزان جابه‌جایی بیشینه‌ی رأس هر پایه در تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی در ردیف دوم و جابه‌جایی رأس هر پایه در زمانی که رأس پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی بیشینه‌ی خود می‌رسد، در ردیف سوم هر جدول نشان داده شده است. در جدول‌های ۸ الی ۱۰، اختلاف‌های تعیین‌شده در ردیف پنجم میزان اختلاف نتایج در ردیف‌های چهارم و سوم بوده و اختلاف‌های تعیین‌شده در ردیف هفتم، میزان اختلاف نتایج در ردیف‌های ششم و سوم است. بررسی جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده در رأس تمامی پایه‌ها در جدول ۸ با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷ نشان می‌دهد در اعمال الگوی بار به سمت شمالی میزان اختلاف برای پایه‌های ۵ الی ۹ کمتر از بقیه‌ی پایه‌ها بوده و در محدوده‌ی منهای ۱۸٪ الی ۶٪ است و در اعمال الگوی بار به سمت جنوبی پایه‌های ۵ الی ۸، اختلاف کمتری نسبت به بقیه‌ی پایه‌ها دارد و محدوده‌ی اختلاف بین منهای ۸٪ تا منهای ۱۲٪ است. به‌طورکلی می‌توان اظهار داشت که اختلاف جابه‌جایی در رأس پایه‌های موجود در سمت شرقی سازه (سمت وقوع جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر) نسبت به پایه‌های موجود در سمت دیگر سازه کمتر است.

بررسی جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده در جدول ۹ در رأس تمامی پایه‌ها با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷ نشان می‌دهد در اعمال الگوی بار به سمت شمالی برای پایه‌های ۳ الی ۸ میزان اختلاف از بقیه‌ی پایه‌ها کمتر بوده و در محدوده‌ی منهای ۵٪ تا ۲۰٪ است و در اعمال الگوی بار به سمت جنوبی محدوده‌ی اختلاف برای پایه‌های ۳ الی ۹ بین منهای ۷٪ الی ۱۳٪ است. همچنین بررسی جدول ۱۰ نیز نشان می‌دهد در اعمال الگوی بار به سمت شمالی پایه‌های ۵ الی ۹، اختلاف کمتری دارند و محدوده‌ی اختلاف بین منهای ۲۱٪ تا ۲۵٪ است. در اعمال الگوی بار به سمت جنوبی نیز پایه‌های ۶ الی ۹، اختلاف کمتری نسبت به بقیه‌ی پایه‌ها دارند و محدوده‌ی اختلاف بین منهای ۶٪ تا منهای ۱۶٪ است.

جدول ۸. میزان جابه‌جایی در رأس پایه‌های مختلف سازه در الگوی بار متناسب با جرم (نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷) در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده برای زلزله‌ی السنترو.

۱	شماره‌ی پایه	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۲	بیشینه‌ی جابه‌جایی در تحلیل IDA	۱۲۹	۱۹۷	۱۸۲	۱۴۵	۲۱۰	۲۶۷	۲۵۹	۱۵۶
۳	جابه‌جایی متناظر پایه‌ها در لحظه‌ی رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی بیشینه در تحلیل IDA	۳۷	۷۹	۱۱۱	۱۴۲	۲۱۰	۲۶۷	۲۵۹	۱۵۵
۴	جابه‌جایی متناظر پایه‌ها با رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی ۲۱۹ میلی‌متر در الگوی بار به سمت شمالی در تحلیل NSP	۳۰	۵۸	۸۸	۱۲۷	۱۷۷	۲۱۹	۲۱۹	۱۶۴
۵	DIFF (٪)	−۱۹	−۲۷	−۲۱	−۱۱	−۱۶	−۱۸	−۱۵	۶
۶	جابه‌جایی متناظر پایه‌ها با رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی ۲۳۴ میلی‌متر در الگوی بار به سمت جنوبی در تحلیل NSP	۲۶	۴۸	۷۷	۱۲۶	۱۹۰	۲۳۴	۲۳۹	۱۱۵
۷	DIFF (٪)	−۳۰	−۳۹	−۳۱	−۱۱	−۱۰	−۱۲	−۸	−۲۶

جدول ۹. میزان جابه‌جایی در رأس پایه‌های مختلف سازه در الگوی بار متناسب با جرم (نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷) در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده برای زلزله‌ی لوماپریتا.

۱	شماره‌ی پایه	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۲	بیشینه‌ی جابه‌جایی در تحلیل IDA	۱۳۹	۲۱۹	۱۸۴	۱۴۵	۱۹۲	۲۲۳	۲۱۷	۱۱۴
۳	جابه‌جایی متناظر پایه‌ها در لحظه‌ی رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی بیشینه در تحلیل IDA	۲	۴۹	۸۳	۱۳۶	۱۹۲	۲۲۳	۲۱۲	۱۰۸
۴	جابه‌جایی متناظر پایه‌ها با رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی ۲۲۸ میلی‌متر در الگوی بار به سمت شمالی در تحلیل NSP	۳۰	۵۹	۹۰	۱۳۱	۱۸۳	۲۲۸	۲۳۱	۱۷۸
۵	DIFF(٪)	۱۴۰۰	۲۰	۸	−۴	−۵	۲	۹	۶۵
۶	جابه‌جایی متناظر پایه‌ها با رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی ۲۳۴ میلی‌متر در الگوی بار به سمت جنوبی در تحلیل NSP	۲۶	۴۸	۷۷	۱۲۶	۱۹۰	۲۳۴	۲۳۹	۱۱۵
۷	DIFF (٪)	۱۲۰۰	−۲	−۷	−۷	−۲	۵	۱۳	۶

جدول ۱۰. میزان جابه‌جایی در رأس پایه‌های مختلف سازه در الگوی بار متناسب با جرم (نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷) در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده برای زلزله‌ی منجیل.

۱	شماره‌ی پایه	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۲	بیشینه‌ی جابه‌جایی در تحلیل IDA	۸۴	۱۳۶	۱۲۸	۱۴۵	۱۷۵	۲۲۳	۲۳۰	۱۰۲
۳	جابه‌جایی متناظر پایه‌ها در لحظه‌ی رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی بیشینه در تحلیل IDA	۷۰	۱۰۵	۱۲۸	۱۴۵	۱۷۵	۲۲۳	۲۳۰	۱۰۲
۴	جابه‌جایی متناظر پایه‌ها با رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی ۱۹۵ میلی‌متر در الگوی بار به سمت شمالی در تحلیل NSP	۲۹	۵۵	۸۲	۱۱۵	۱۵۹	۱۹۵	۱۸۸	۱۲۷
۵	DIFF (٪)	−۵۹	−۴۸	−۳۶	−۲۱	−۹	−۱۳	−۱۸	۲۵
۶	جابه‌جایی متناظر پایه‌ها با رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی ۱۸۷ میلی‌متر در الگوی بار به سمت جنوبی در تحلیل NSP	۲۳	۳۸	۵۹	۹۵	۱۴۸	۱۸۷	۱۹۳	۹۶
۷	DIFF (٪)	−۶۷	−۶۴	−۵۴	−۳۴	−۱۵	−۱۶	−۱۶	−۶

۹. نتیجه‌گیری

در این نوشتار روش پیشنهادی جهت رسم طیف ظرفیت و تعیین تغییرمکان هدف با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در هنگام استفاده از الگوی بار متناسب با جرم ارائه شده است. در روش پیشنهادی در الگوی بار متناسب با جرم، اثر مودهای ارتعاش، مستقیماً با اعمال بردار جابه‌جایی سازه در ترسیم طیف ظرفیت و تعیین تغییرمکان هدف لحاظ می‌شود. با توجه به پیشنهاد پژوهشگران مبنی بر درنظرگرفتن رأس پایه‌ی بحرانی و رأس پایه با جابه‌جایی بیشینه به‌عنوان نقطه‌ی کنترل در پل‌ها، جهت بررسی روش پیشنهادی، کاربرد آن در یک نمونه پل چند دهانه و با انحناء در پلان مورد ارزیابی قرار گرفته است. به همین جهت، زلزله‌های متناظر با ظرفیت نهایی جابه‌جایی سازه به همراه پایه‌ی بحرانی از طریق تحلیل دینامیکی افزاینده مشخص شده است. با تعیین زلزله‌های متناظر با ظرفیت نهایی جابه‌جایی سازه، نتایج جابه‌جایی رأس پایه‌ها در زلزله‌های متناظر با ظرفیت تعیین و برای بررسی روش پیشنهادی استفاده شده است. با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده براساس الگوی بار متناسب با جرم و درنظرگرفتن نقاط کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی و رأس پایه‌های با جابه‌جایی بیشینه، طیف ظرفیت از روش پیشنهادی تعیین و با توجه به موجودبودن طیف تقاضای زلزله‌های متناظر با ظرفیت، تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا مشخص و براساس آن، تغییرمکان هدف در رأس پایه‌ی بحرانی (پایه‌ی ۵) و

رأس پایه‌های دارای جابه‌جایی‌های بیشینه (پایه‌های ۷ و ۸) از روش پیشنهادی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده با الگوی بار متناسب با جرم تعیین شده است. با توجه به نامتقارن‌بودن سازه، اعمال الگوی بار و تعیین جابه‌جایی نقاط کنترل در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده به‌طور مجزا در جهت شمالی و جنوبی تعیین شده است. بررسی اختلاف بین جابه‌جایی تعیین‌شده در نقاط کنترل با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و بیشینه‌ی جابه‌جایی آنها در زلزله‌های متناظر با ظرفیت از تحلیل دینامیکی افزاینده نشان می‌دهد که نتایج روش پیشنهادی برای تعیین طیف ظرفیت و تغییرمکان هدف در نقاط کنترل وابسته به جهت اعمال بار جانبی و محل نقطه‌ی کنترل هستند و جابه‌جایی بیشینه ناشی از اعمال الگوی بار به سمت شمالی و جنوبی در نقاط کنترل، اختلاف کمتری با نتایج روش تحلیل دینامیکی فزاینده دارد. پس از تعیین جابه‌جایی در نقاط کنترل، برای بررسی جابه‌جایی در رأس تمامی پایه‌ها، با توجه به اختلاف کمتر نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده برای نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷، جابه‌جایی در رأس پایه‌های دیگر سازه متناظر با جابه‌جایی در رأس پایه‌ی ۷ از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده تعیین و با نتایج روش دینامیکی فزاینده مقایسه شده است. با توجه به اینکه ناحیه‌ی تأثیر مودهای بالاتر ارتعاش در پل مورد مطالعه پایه‌های ۶ الی ۹ هستند، استفاده از الگوی بار متناسب با جرم به همراه روش پیشنهادی با درنظرگرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه با جابه‌جایی بیشینه (پایه‌ی ۷) توانسته است به‌طورکلی جابه‌جایی پایه‌های موجود در ناحیه‌ی تأثیر مودهای بالاتر ارتعاش را با اختلاف مناسبی نسبت به نتایج روش تحلیل دینامیکی افزاینده برآورد کند.

پانوشت‌ها

1. nonlinear static pushover
2. incremental dynamic analysis

منابع (References)

1. Applied Technology Council, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40, **1**, Redwood City (1996).
2. European Committee for Standardization, *EC8: Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 2: Bridges*, Brussels (2005).
3. Pinho, R., Monteiro, R., Casarotti, C. and Delgado, R. "Assessment of continuous span bridges through nonlinear static procedures", *Earthquake Spectra*, **25**(1), pp. 143-159 (2009).
4. Isakovic, T. and Fischinger, M. "Higher modes in simplified inelastic seismic analysis of single column bent viaducts", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **35**(1), pp. 95-114 (2006).
5. Isakovic, T., Lazaro, M. and Fischinger, M. "Applicability of pushover methodes for the seismic analysis of single-column bent viaducts", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **37**(8), pp. 1185-1202 (2008).
6. Mergos, P., Sextos, A. and Kappos, A. "Seismic assessment of a major bridge using pushover analysis", *International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences*, Corfu, Greece, Paper No.333 (2003).
7. Paraskeva, T.S., Kappos, A. and Sextos, A. "Extension of modal pushover analysis to seismic assessment of bridges", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **35**(10), pp. 1269-1293 (2006).
8. Paraskeva, T.S. and Kappos, A. "Further development of a multimodal pushover analysis procedure for seismic assessment of bridges", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **39**(2), pp. 211-222 (2010).
9. Kunnath, S. "Identification of modal combinations for nonlinear static analysis of building structures", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **19**(4), pp. 246-259 (2004).
10. Sucuoglu, H. and Gunay, M. "Generalized force vectors for multi-mode pushover analysis", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **40**(1), pp. 55-74 (2011).
11. Jan, T., Liu, M. and Kao, Y. "An upper-bound pushover analysis for estimating the seismic demands of high-rise buildings", *Eng. Struct.*, **26**(1), pp.117-128 (2004).
12. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures*, Pearson Education Inc., 3rd Ed., pp. 275-277, California, USA (2006).
13. SeismoSoft, Seismosignal, Available from URL: http//www.seismosoft.com (2011).
14. Burdette, N.J. and Elnashai, A.S. "Effect of asynchronous earthquake ground motion on complex bridges, II result and implications on assessment", *J. of Bridge. Eng.*, **13**(2), pp. 166-172 (2008).
15. Elnashai, A.S., Papanikolaou, V. and Lee, D.H., *ZEUS-NL*, Mid. America Earthquake Center, Illinoise (2010).
16. California Dept. of Transportation (Caltrans), *Caltrans Seismic Design Crieteria*, Sacramento, Calif. (2010).