

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

علی گل افشار (دانشجوی دکتری)

فرهاد دانشجو\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، آلبیتز ۱۳۹۵ (۱۳۹۵)  
د. ۲ - ۲۲ - شماره ۱ / ۳ / ۳۲ - ۲۵

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 متناوب 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 انحنا 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 انحنا در پلان، طیف ظرفیت، الگوی بار متناسب با جرم، نقطه‌ی کنترل.

## ۱. مقدمه

در طول سال‌های اخیر، روش تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده (NSP)<sup>۱</sup> به منزله‌ی روشی مناسب جهت بررسی رفتار سازه در ناحیه‌ی غیرخطی گسترش یافته و در آیین‌نامه‌های مختلف نیز برای بررسی سازه‌ها استفاده شده است.<sup>۲</sup> جهت بهبود کارایی 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 مشخص کردن 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.<sup>۳</sup>

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

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۴/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۳/۶/۴، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۱۴

سازه نیستند و می‌توانند ترکیبی از شکل‌های مودی سازه باشند،<sup>۴</sup> 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. کارایی روش پیشنهادی از طریق مقایسه‌ی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)<sup>۵</sup> در تعیین جابه‌جایی نقاط کنترل برای یک نمونه پل دارای انحنا در پلان انجام شده است.

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

با توجه به رابطه ۶، با در نظر گرفتن سازه‌ی یک درجه آزادی معادل، ارتباط بین جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل و جابه‌جایی سازه‌ی یک درجه آزادی معادل  $x_c(t)$  به صورت رابطه‌ی ۷ در نظر گرفته می‌شود:

$$u_c(t) = \Gamma_n * x_c(t) \quad (7)$$

$$\Gamma_n = \frac{\{\phi_n\}^T [M] \{I\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}}$$

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

$$\dot{u}_c(t) = \Gamma_n * \dot{x}_c(t) \quad (8)$$

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

$$\ddot{u}_c(t) = \Gamma_n * \ddot{x}_c(t) \quad (9)$$

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:

$$\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} \Gamma_n \ddot{x}_c(t) + \{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} \Gamma_n \dot{x}_c(t) + \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} \Gamma_n x_c(t) = -\{\phi_n\}^T [M] \{I\} \ddot{u}_g(t) \quad (10)$$

با در نظر گرفتن تعریف  $\Gamma_n$  بر اساس رابطه‌ی ۷ در رابطه‌ی ۱۰، معادله‌ی تعادل سازه‌ی یک درجه آزادی معادل مطابق رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$M_{en} \ddot{x}_c(t) + C_{en} \dot{x}_c(t) + K_{en} x_c(t) = -M_{en} \ddot{u}_g(t) \quad (11)$$

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:

$$M_{en} = \{\phi_n\}^T [M] \{I\} \quad (12)$$

$$C_{en} = \{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} \frac{\{\phi_n\}^T [M] \{I\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}} \quad (13)$$

$$K_{en} = \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} \frac{\{\phi_n\}^T [M] \{I\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}} \quad (14)$$

در صورتی که پیشینه‌ی 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 پیشینه در سیستم یک درجه آزادی معادل و بردار جابه‌جایی پیشینه در سیستم  $N$  درجه آزادی به صورت رابطه‌ی ۱۵ برقرار می‌شود:

$$\{u(t)\}_{\max} = \{\phi_n\} * \Gamma_n * Sd_{en} \quad (15)$$

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

## ۲. تعیین طیف ظرفیت بر حسب مود $n$ م سازه‌ی چند درجه آزادی

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

$$[M] \{\ddot{u}(t)\} + [C] \{\dot{u}(t)\} + [K] \{u(t)\} = -[M] \{I\} \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

که در آن،  $[M]$ ،  $[C]$ ،  $[K]$  ماتریس‌های  $N \times N$  سختی، میرایی، و جرم سازه است؛ و  $\{u(t)\}$ ،  $\{\dot{u}(t)\}$ ،  $\{\ddot{u}(t)\}$  بردارهای  $N \times 1$  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  $n$ ام  $\{\phi_n\}$  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:

$$\{u(t)\} = \{\phi_n\} * u_c(t) \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_N(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_{1n} \\ \phi_{2n} \\ \vdots \\ \phi_{Nn} \end{Bmatrix} * u_c(t)$$

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

$$\{\dot{u}(t)\} = \{\phi_n\} * \dot{u}_c(t) \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{u}_N(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_{1n} \\ \phi_{2n} \\ \vdots \\ \phi_{Nn} \end{Bmatrix} * \dot{u}_c(t)$$

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

$$\{\ddot{u}(t)\} = \{\phi_n\} * \ddot{u}_c(t) \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{u}_N(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_{1n} \\ \phi_{2n} \\ \vdots \\ \phi_{Nn} \end{Bmatrix} * \ddot{u}_c(t)$$

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

$$[M] \{\phi_n\} \ddot{u}_c(t) + [C] \{\phi_n\} \dot{u}_c(t) + [K] \{\phi_n\} u_c(t) = -[M] \{I\} \ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

با پیش‌ضرب رابطه‌ی ۵ در  $\{\phi_n\}^T$ ، رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} \ddot{u}_c(t) + \{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} \dot{u}_c(t) + \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} u_c(t) = -\{\phi_n\}^T [M] \{I\} \ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

آن  $\phi_{nc}$  مؤلفه‌ی مربوط به نقطه‌ی انتخابی در جهت جانبی موردنظر در بردار شکل مود  $m$  است:

$$u_{con} = \phi_{nc} * \Gamma_n * Sd_{en} \quad (16)$$

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:

$$Sd_{en} = \frac{u_{con}}{\phi_{nc} * \Gamma_n} \quad (17)$$

با توجه به رابطه‌ی ۱۷، ارتباط بین برش پایه در سازه‌ی یک درجه آزادی معادل ( $V_{en}$ ) و برش پایه‌ی سازه‌ی چند درجه آزادی ( $V_n$ ) به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ در نظر گرفته شود:

$$V_n = \Gamma_n * V_{en} \quad (18)$$

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

$$V_{en} = M_{en} * Sa_{en} \quad (19)$$

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:

$$V_n = \Gamma_n * M_{en} * Sa_{en} \quad (20)$$

با جایگذاری  $M_{en}$  از رابطه‌ی ۱۲ و جایگذاری  $\Gamma_n$  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:

$$Sa_{en} = \frac{V_n}{\frac{\{\phi\}_n^T [M] \{I\}}{\{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_n} \{\phi\}_n^T [M] \{I\}} \quad (21)$$

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

$$Sd_{en}^i = \frac{u_{con}^i}{\phi_{nc} * \Gamma_n} \quad (22)$$

$$Sa_{en}^i = \frac{V_n^i}{\frac{\{\phi\}_n^T [M] \{I\}}{\{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_n} \{\phi\}_n^T [M] \{I\}} \quad (23)$$

در رابطه‌ی ۲۲،  $u_{con}^i$  جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل در گام  $i$  در جهت جانبی موردنظر و  $Sd_{en}^i$  جابه‌جایی طیفی در طیف ظرفیت در گام  $i$  براساس شکل مود  $m$  است. در رابطه‌ی ۲۳،  $V_n^i$  برش پایه در گام  $i$  براساس شکل مود  $m$  است. شتاب طیفی در طیف ظرفیت در گام  $i$  براساس شکل مود  $m$  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  $u_{con,e}$  از بردار  $\{u\}_e$ .
۴. تعیین نیروی برشی جانبی کلی سازه‌ی چند درجه آزادی و جابه‌جایی نقطه‌ی کنترل در جهت جانبی موردنظر در گام  $i$  از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده  $(u_{con}^i, V^i)$ .
۵. تعیین جابه‌جایی طیفی در طیف ظرفیت جابه‌جایی در گام  $i$  ( $Sd^i$ ) از رابطه‌ی ۲۴ و تعیین شتاب طیفی در طیف ظرفیت شتاب در گام  $i$  ( $Sa^i$ ) از رابطه‌ی ۲۵.

$$Sd^i = \frac{u_{con}^i}{u_{con,e} * \frac{\{u\}_e^T [M] \{I\}}{\{u\}_e^T [M] \{u\}_e}} \quad (24)$$

$$Sa^i = \frac{V^i}{\frac{\{u\}_e^T [M] \{I\}}{\{u\}_e^T [M] \{u\}_e} \{u\}_e^T [M] \{I\}} \quad (25)$$

#### ۴. تعیین طیف تقاضا و تعیین تغییر مکان هدف

درخصوص تعیین طیف تقاضا، روش‌های متفاوتی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به طیف تقاضا با استفاده از میرایی مؤثر<sup>[۱]</sup> و یا طیف تقاضا با استفاده از شکل‌پذیری ثابت اشاره کرد.<sup>[۱۲]</sup> 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 تاریخی زمانی با استفاده از نرم‌افزار Seis-mosignal<sup>[۱۳]</sup> 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

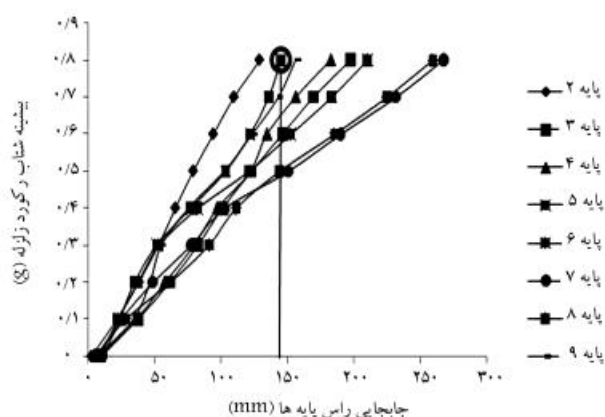
#### ۳. ارائه‌ی روش پیشنهادی جهت رسم طیف ظرفیت

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





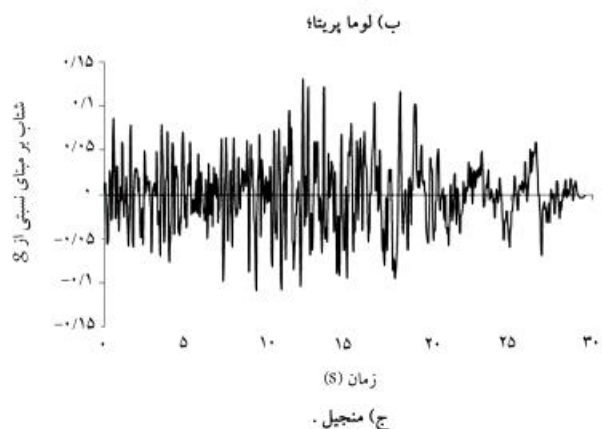
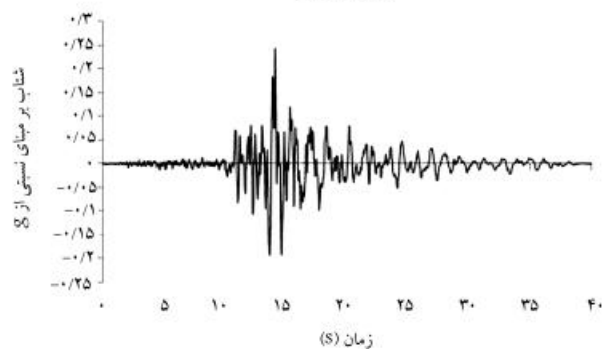
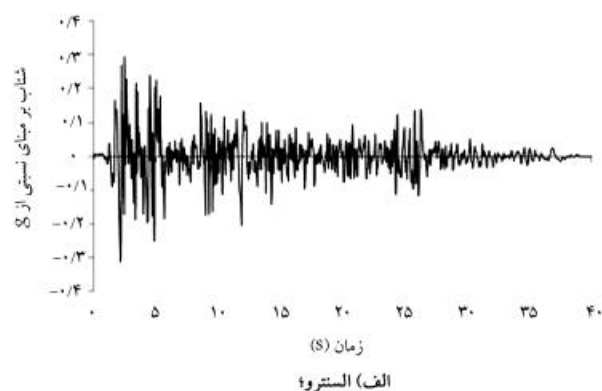
شکل ۶. تعیین زلزله‌ی متناظر با ظرفیت سازه در تحلیل دینامیکی افزایشده تحت رکورد زلزله‌ی السنترو.

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 ۰٫۷۸ 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 افزایشده 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 در نظر گرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی

الگوی بار متناسب با جرم در مورد پل مورد مطالعه براساس آیین‌نامه‌ی یوروکود<sup>[۲]</sup> 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<sup>[۹]</sup> با اعمال الگوی بار به سمت شمالی، طیف ظرفیت با در نظر گرفتن 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 نظر گرفته 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 تغییر مکان 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 در نظر گرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی رسم



شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی رکوردهای اعمال شده.

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<sup>[۱۶]</sup> 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 ۰٫۷۸ شتاب ثقل

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

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (%)
السترو	۱۴۵	-	-
لوماپریتا	۱۴۵	-	-
منجیل	۱۴۵	۱۳۳	-۸

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

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (%)
السترو	۱۴۵	۸۴	-۴۲
لوماپریتا	۱۴۵	۷۹	-۴۶
منجیل	۱۴۵	۶۲	-۵۷

$$DIFF = \frac{(\Delta_{NSP} - \Delta_{IDA})}{\Delta_{IDA}} \times 100 \quad (27)$$

مقایسه‌ی جابه‌جایی رأس پایه‌ی بحرانی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده (NSP) و تحلیل دینامیکی فزاینده (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.

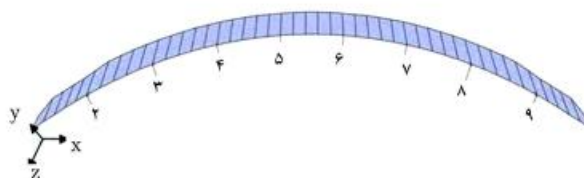
بررسی مقدار جابه‌جایی به دست آمده نشان می‌دهد که در اعمال الگوی بار به سمت جنوبی برای تمامی زلزله‌ها، میزان جابه‌جایی به دست آمده برای رأس پایه‌ی بحرانی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده نسبت به نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده با مقادیر کوچک‌تر است. در اعمال الگوی بار به سمت شمالی، جابه‌جایی به دست آمده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

## ۸. کاربرد روش پیشنهادی در الگوی بار متناسب با جرم و در نظر گرفتن نقطه‌ی کنترل در ناحیه‌ی وقوع جابه‌جایی

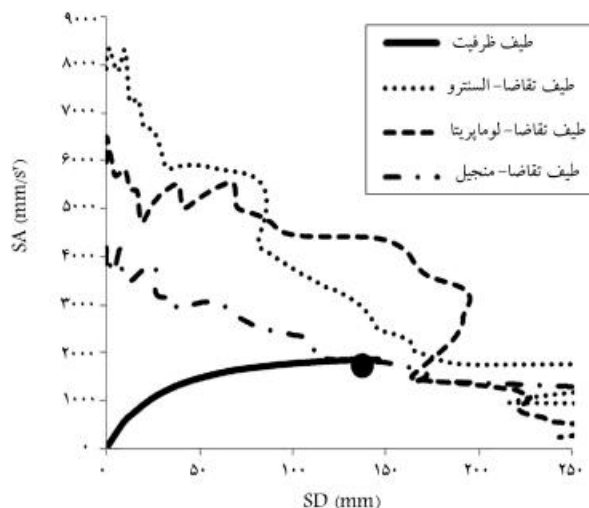
### بیشینه

با توجه به اینکه در مطالعات پژوهشگران در مورد پل‌ها نقطه‌ی جابه‌جایی بیشینه نیز به عنوان نقطه‌ی کنترل پیشنهاد شده است.<sup>[۱۵]</sup> بررسی تغییر شکل سازه نشان می‌دهد جابه‌جایی‌های بیشینه در محدوده‌ی پایه‌های ۷ و ۸ ایجاد می‌شوند، و جهت بررسی روش پیشنهادی در رسم طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف، رأس پایه‌های ۷ و ۸ به عنوان نقطه‌ی کنترل در نظر گرفته شده‌اند. طیف ظرفیت در اثر اعمال الگوی بار به سمت شمالی با در نظر گرفتن 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.

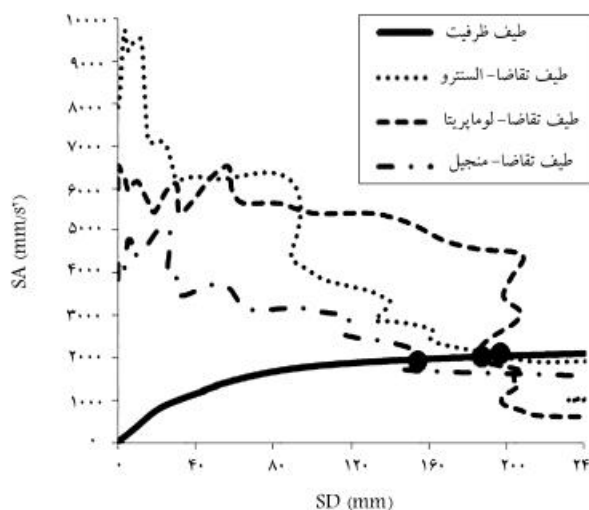
طیف ظرفیت در اثر اعمال الگوی بار به سمت جنوبی با در نظر گرفتن نقطه‌ی



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

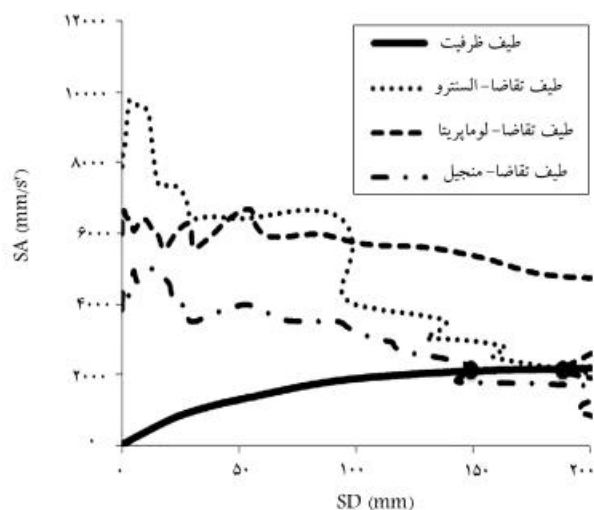


شکل ۸. تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا با در نظر گرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی (اعمال الگوی بار به سمت شمالی).

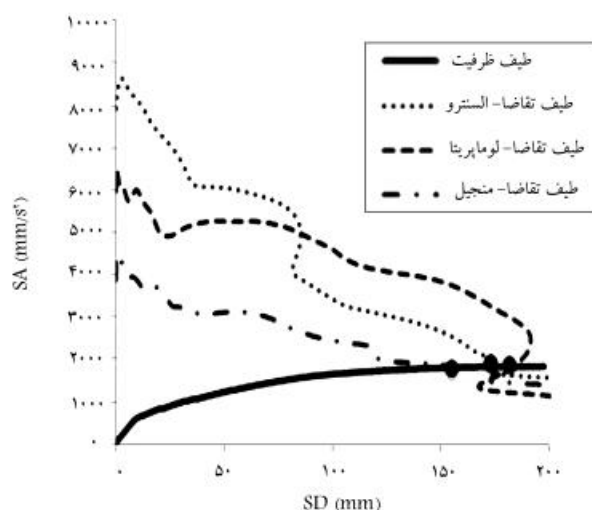


شکل ۹. تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا با در نظر گرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی (اعمال الگوی بار به سمت جنوبی).

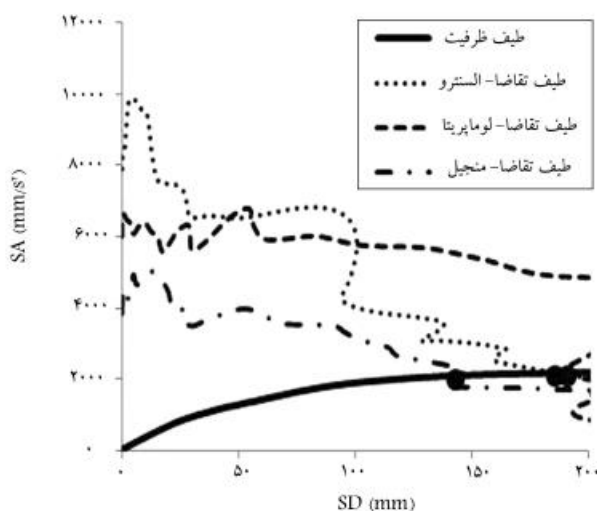
شده و نتایج آن به همراه طیف تقاضا در شکل ۹ نشان داده شده است، که در این حالت تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا در محدوده‌ی ظرفیت سازه برای تمامی زلزله‌ها ایجاد می‌شود. میزان اختلاف (DIFF) بین نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده از رابطه‌ی ۲۷ محاسبه می‌شود، که در آن  $\Delta_{NSP}$  میزان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



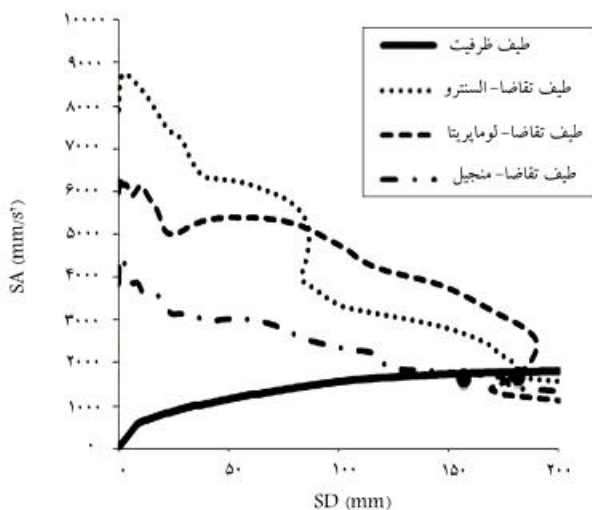
شکل ۱۲. تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا با در نظر گرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷ (اعمال الگوی بار به سمت جنوبی).



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



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



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

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

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (%)
السترو	۲۶۷	۲۳۴	-۱۲
لوماپریتا	۲۲۳	۲۳۴	۵
منجیل	۲۲۳	۱۸۶	-۱۷

بررسی جدول‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که اختلاف جابه‌جایی به دست‌آمده برای رأس پایه‌ی ۷ در اعمال الگوی بار جانبی به سمت شمالی نسبت به نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی بین ۲٪ و منهای ۱۸٪ بوده و در اعمال الگوی بار به سمت جنوبی بین ۵٪ و منهای ۱۷٪ است. همچنین بررسی اختلاف جابه‌جایی به دست‌آمده در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده برای رأس پایه‌ی ۸ نشان می‌دهد که اعمال الگوی بار به سمت جنوبی موجب

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

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (%)
السترو	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 پیشینه‌ی به دست‌آمده 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.

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

نام رکورد	جابه‌جایی (IDA)	جابه‌جایی (NSP)	اختلاف (%)
السنتر	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 (%)
السنتر	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 تعیین شده 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 در نظر گرفتن 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 تعیین شده در ردیف پنجم میزان اختلاف نتایج در ردیف‌های چهارم و سوم بوده و اختلاف‌های تعیین شده در ردیف هفتم، میزان اختلاف نتایج در ردیف‌های ششم و سوم است. بررسی جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده در رأس تمامی پایه‌ها در جدول ۸ با در نظر گرفتن 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. به‌طور کلی 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 در نظر گرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۷ نشان می‌دهد در اعمال الگوی بار به سمت شمالی برای پایه‌های ۳ الی ۹ بین منهای ۷٪ الی ۱۳٪ است. همچنین 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. 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 السنتر.

شماره‌ی پایه	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
بیشینه‌ی جابه‌جایی در تحلیل IDA	۱۲۹	۱۹۷	۱۸۲	۱۴۵	۲۱۰	۲۶۷	۲۵۹	۱۵۶
جابه‌جایی متناظر پایه‌ها در لحظه‌ی رسیدن پایه‌ی ۷ به جابه‌جایی بیشینه در تحلیل IDA	۳۷	۷۹	۱۱۱	۱۴۲	۲۱۰	۲۶۷	۲۵۹	۱۵۵
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
DIFF (%)	-۱۹	-۲۷	-۲۱	-۱۱	-۱۶	-۱۸	-۱۵	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
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 ۱۷ در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده برای زلزله‌ی لوماپریتا.

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

جدول ۱۰. میزان جابه‌جایی در رأس پایه‌های مختلف سازه در الگوی بار متناسب با جرم نقطه‌ی کنترل در رأس پایه‌ی ۱۷ در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده برای زلزله‌ی منجیل.

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

## ۹. نتیجه‌گیری

پلان مورد ارزیابی قرار گرفته است. به همین جهت، زلزله‌های متناظر با ظرفیت نهایی جابه‌جایی سازه به همراه پایه‌ی بحرانی از طریق تحلیل دینامیکی فزاینده 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 در نظر گرفتن نقاط کنترل در رأس پایه‌ی بحرانی و رأس پایه‌های با جابه‌جایی بیشینه، طیف ظرفیت از روش پیشنهادی تعیین و با توجه به موجود بودن طیف تقاضای زلزله‌های متناظر با ظرفیت، تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا مشخص و براساس آن، تغییر مکان هدف در رأس پایه‌ی بحرانی (پایه‌ی ۵) و

در این نوشتار روش پیشنهادی جهت رسم طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف با در نظر گرفتن 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 تغییر مکان هدف لحاظ می‌شود. با توجه به پیشنهاد پژوهشگران مبنی بر در نظر گرفتن رأس پایه‌ی بحرانی و رأس پایه با جابه‌جایی بیشینه به عنوان نقطه‌ی کنترل در پل‌ها، جهت بررسی روش پیشنهادی، کاربرد آن در یک نمونه پل چند دهانه و با انحناء در

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 در نظر گرفتن نقطه‌ی کنترل در رأس پایه با جابه‌جایی بیشینه (پایه‌ی ۷) توانسته است به‌طور کلی جابه‌جایی پایه‌های موجود در ناحیه‌ی تأثیر مودهای بالاتر ارتعاش را با اختلاف مناسبی نسبت به نتایج روش تحلیل دینامیکی فزاینده برآورد کند.

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 نامتقارن بودن 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 تعیین شده در نقاط کنترل با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و بیشینه‌ی جابه‌جایی آنها در زلزله‌های متناظر با ظرفیت از تحلیل دینامیکی فزاینده نشان می‌دهد که نتایج روش پیشنهادی برای تعیین طیف ظرفیت و تغییر مکان 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

### پانویس‌ها

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, Illinois (2010).
16. California Dept. of Transportation (Caltrans), *Caltrans Seismic Design Criteria*, Sacramento, Calif. (2010).