

# توسعه روش طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف بدون در نظرگیری نقطه کنترل در پل‌های دارای انحناء در پلان

علی گل افشار<sup>۱</sup>، فرهاد دانشجو<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

danesh\_fa@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۰

**چکیده-** در تحلیل و طراحی پل‌ها تحت تأثیر نیروی جانبی بر اساس عملکرد برای ترسیم طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف در روش متداول یک نقطه بر روی پل به عنوان نقطه کنترل باید مشخص شود و با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده منحنی برش پایه در برابر جابه‌جایی نقطه کنترل ترسیم شده و سپس این منحنی به طیف ظرفیت تبدیل می‌شود. در خصوص تعیین محل نقطه کنترل، پیشنهادهایی به وسیله‌ی پژوهشگران ارائه شده است که می‌توان به راس پایه بحرانی و یا نقطه دارای تغییر مکان بیشینه اشاره کرد که در تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده محل نقطه دارای تغییر مکان بیشینه در تمام گام‌های تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده ثابت نبوده و می‌تواند تغییر کند پس انتخاب محل‌های مختلف به عنوان نقطه کنترل در پل‌ها در محاسبه طیف ظرفیت پل در ناحیه غیرخطی تأثیرگذار است. در این مقاله روش جدیدی برای ترسیم طیف ظرفیت تغییر مکان و تعیین تغییر مکان هدف بدون نیاز به نقطه کنترل در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده ارائه می‌شود. در روش پیشنهادی، رسم طیف ظرفیت با استفاده از وضعیت لحظه‌ای کل سازه در هر گام از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده انجام شده و وضعیت گام به گام کل سازه در تعیین طیف ظرفیت اثر گذار است. با توجه به وابستگی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده به محل نقطه کنترل، ویژگی روش پیشنهادی عدم وابستگی به یک نقطه کنترل در تعیین طیف ظرفیت و تغییر مکان هدف است. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی در تعیین تغییر مکان هدف، یک پل دارای انحناء در پلان تحت اثر زلزله در جهت عرضی واقع شده و تغییر مکان بیشینه در راس پایه بحرانی در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به دست آمده است. سپس تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده با استفاده از الگوی بار متناسب با شکل مود اصلی سازه در جهت ارتعاش عرضی بر روی سازه انجام گرفته و تغییر مکان هدف در راس پایه بحرانی با روش متداول با تعیین نقطه کنترل و روش پیشنهادی بدون تعیین نقطه کنترل بدست آمده است. مقایسه نتایج تغییر مکان هدف در راس پایه بحرانی نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی در کاهش اختلاف بین تغییر مکان راس پایه بحرانی از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده نسبت به تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی است.

**واژگان کلیدی:** نقطه کنترل، طیف ظرفیت تغییر مکان، تغییر مکان هدف، پل دارای انحناء در پلان

هدف برای بررسی رفتار سازه‌ها با استفاده از تحلیل

۱- مقدمه

استاتیکی غیرخطی فزاینده در آیین‌نامه‌ها گسترش یافته

امروزه استفاده از روش طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان

نقطه کنترل در راس پایه بحرانی برای رسم طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف به عنوان یک گزینه پیشنهاد شده است. همچنین در مطالعه دیگری به وسیله همین پژوهشگران [۸] برای بهبود نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده، استفاده از تغییر شکل سازه در تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده برای تعیین تغییر مکان هدف در نقطه کنترل در مورد پل‌ها پیشنهاد شده است. با توجه به مطالعات پژوهشگران مشخص شده است که محل نقطه کنترل در نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده اثر گذار است، پس هدف این مقاله، ارائه روش جدیدی برای ترسیم طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف بدون نیاز به مشخص نمودن نقطه کنترل است. در روش پیشنهادی با توجه به عدم نیاز به نقطه کنترل، تعیین وضعیت سازه در تغییر مکان هدف وابسته به یک نقطه کنترل نیست.

## ۲- ترسیم طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف با در نظر گیری نقطه کنترل (روش متداول)

### ۲-۱- ترسیم منحنی ظرفیت با استفاده تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده برای یک نقطه کنترل

در این روش پس از تهیه مدل سازه، یک نیروی برشی جانبی کلی تعیین شده و با در نظر گیری شکل توزیع نیرو برای درجه آزادی  $\lambda_m$  با توجه به شکل مود  $\{\phi_n\}$  و جرم موجود در درجه آزادی  $\lambda_m$ ، شکل توزیع نیرو به صورت رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$\Psi_{jn} = m_j \phi_{jn} \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $\Psi_{jn}$  شکل توزیع نیرو در درجه آزادی  $\lambda_m$  در مود  $\lambda_m$  بوده،  $m_j$  جرم متمرکز موجود در درجه آزادی  $\lambda_m$  و

است [۲،۱]. در روش متداول طیف ظرفیت، برای ترسیم طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف، با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و با مشخص نمودن یک نقطه کنترل در روی سازه چنددرجه‌آزادی، منحنی برش پایه کل سازه در برابر جابه‌جایی نقطه کنترل استخراج شده و به طیف ظرفیت سازه یک‌درجه‌آزادی معادل تبدیل می‌شود [۲،۱]. استفاده از این روش برای ترسیم طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف در مورد پل‌ها هم مورد مطالعه پژوهشگران مختلف بوده است [۳،۴،۵،۶،۷،۸]. تعیین محل نقطه کنترل در پل‌ها در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی فزاینده، یکی از مسایل مطرح است و در این زمینه پیشنهادهایی از سوی پژوهشگران برای محل نقطه کنترل ارائه شده است [۴،۵،۶،۷]. در مطالعات برخی پژوهشگران در بررسی پل‌ها، نقطه دارای جابه‌جایی بیشینه در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی فزاینده به عنوان نقطه کنترل پیشنهاد شده است [۵،۶]. با توجه به اینکه محل نقطه دارای جابه‌جایی بیشینه می‌تواند در تمام گام‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده ثابت نبوده و تغییر نماید، در این صورت انتخاب نقطه کنترل در رسم طیف ظرفیت و تعیین تغییر مکان هدف، نیاز به بررسی بیشتر خواهد داشت. همچنین بررسی مطالعات انجام شده به وسیله پژوهشگران دیگر [۶] و [۷] نشان می‌دهد که انتخاب نقطه کنترل در پل‌ها در تعیین طیف ظرفیت تغییر مکان-شتاب با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده تأثیر گذار است و این تأثیر می‌تواند در شکل و مقدار طیف ظرفیت تغییر مکان-شتاب سازه بروز نموده و شدت آن می‌تواند در ناحیه غیرخطی چشم‌گیرتر باشد. در مطالعات پژوهشگران [۷] در یک نمونه پل دارای انحناء در پلان، با انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی فزاینده و بررسی طیف ظرفیت تغییر مکان-شتاب نقاط کنترل متفاوت، در نظرگیری

در رابطه (۳)  $Sd_n^i$  تغییر مکان طیفی مربوط به سازه یک درجه آزادی معادل،  $\Gamma_n$  ضریب مشارکت مود  $n$ م سازه چنددرجه آزادی در جهت جانبی مورد نظر،  $\phi_{cn}$  مولفه بردار شکل مود  $n$ م در محل نقطه کنترل در جهت جانبی مورد نظر،  $[M]$  ماتریس جرم سازه چنددرجه آزادی و  $\{I\}$  بردار تاثیر بوده که اعضای آن در درجات آزادی هم امتداد با حرکت زمین دارای مقدار واحد بوده و در سایر درجات آزادی برابر مقدار صفر است. برای تعیین شتاب طیفی در هر گام  $i$  نیز از  $V_n^i$  در رابطه (۴) استفاده می شود.

$$Sa_n^i = \frac{V_n^i}{M\alpha_n} \quad (4)$$

$$\alpha_n = \frac{1}{M} \frac{\{\phi_n\}^T [M] \{I\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}}$$

در رابطه (۴)  $Sa_n^i$  شتاب طیفی مربوط به سازه یک درجه آزادی معادل در گام  $i$ ام،  $M$  جرم کل سازه چنددرجه آزادی و  $\alpha_n$  نسبت جرم موثر مود  $n$ م در جهت جانبی مورد نظر به جرم کل سازه چنددرجه آزادی است.

### ۲-۳- ترسیم طیف تقاضا

پس از تعیین طیف ظرفیت، نیاز به تعیین طیف تقاضا است. در خصوص تعیین طیف تقاضا روش های متفاوتی وجود دارد که از آن جمله می توان به طیف تقاضا با استفاده از میرایی موثر [۲، ۱] و یا طیف تقاضا با استفاده از شکل پذیری ثابت اشاره کرد [۹]. در این مطالعه از طیف تقاضا با شکل پذیری ثابت استفاده شده است و تعیین طیف تقاضا بر اساس پاسخ سازه های یک درجه آزادی تحت اثر زلزله در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با استفاده از نرم افزار Seismosignal [۱۰] انجام شده است.

شکل مود  $n$ م در درجه آزادی  $i$ ام است. با افزایش نیروی برشی جانبی کلی بصورت گام به گام میزان نیروی جانبی در گام  $i$ ام از تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده برای درجه آزادی  $i$ ام از رابطه (۲) محاسبه می شود. در رابطه (۲)  $V_n^i$  نیروی برشی جانبی کلی در گام  $i$ ام بوده که بر اساس شکل مود  $n$ م در بین درجات آزادی توزیع می شود.

$$F_{jn}^i = \frac{\Psi_{jn}}{\sum \Psi_{jn}} V_n^i \quad (2)$$

با انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده، در گام  $i$ ام اطلاعات مورد نیاز مانند جابه جایی ها و نیروها ثبت می شود. انجام تحلیل تا جایی ادامه می یابد که سازه به یک وضعیت حدی برسد. برای رسم منحنی ظرفیت سازه چنددرجه آزادی، با توجه به مشخص بودن نیروی برشی جانبی کلی در گام  $i$ ام  $V_n^i$  و مشخص بودن جابه جایی در نقطه کنترل در گام  $i$ ام  $\Delta_{cn}^i$ ، منحنی ظرفیت بر اساس نیروی برشی جانبی کلی و جابه جایی در نقطه کنترل رسم می شود.

### ۲-۲- ترسیم طیف ظرفیت برای یک نقطه کنترل

با انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده با توزیع نیرو بر اساس شکل مود  $n$ م و پس از ترسیم منحنی ظرفیت، این منحنی به طیف ظرفیت سازه یک درجه آزادی معادل تبدیل می شود. برای تعیین تغییر مکان طیفی در طیف ظرفیت در هر گام  $i$ ، از جابه جایی نقطه کنترل در منحنی ظرفیت مطابق رابطه (۳) استفاده می شود.

$$Sd_n^i = \frac{\Delta_{cn}^i}{\Gamma_n \phi_{cn}} \quad (3)$$

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

**۲-۴- تعیین نقطه هدف**

برای تعیین نقطه هدف که محل تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا است، یک حدس اولیه برای نقطه هدف با مختصات  $(Sd_{np}, Sa_{np})$  بر روی طیف ظرفیت در نظر گرفته شده و سپس طیف ظرفیت به صورت یک منحنی دوخطی ارائه می‌شود به گونه‌ای که سطح زیر منحنی دوخطی و سطح زیر طیف ظرفیت با یکدیگر برابر باشند. منحنی دوخطی شامل دو ناحیه خطی و غیرخطی بوده و نقطه تسلیم نیز در این منحنی با مختصات  $(Sd_{ny}, Sa_{ny})$  بر اساس تقاطع ناحیه خطی و غیرخطی مشخص می‌شود. در مرحله بعد مشخصات منحنی دوخطی شامل نسبت بین تغییر مکان طیفی در نقطه هدف و تغییر مکان طیفی در نقطه تسلیم  $\frac{Sd_{np}}{Sd_{ny}}$  به عنوان پارامتر شکل‌پذیری و نسبت شیب منحنی در ناحیه غیرخطی به شیب ناحیه خطی به همراه درصد میرایی مربوط به مود  $n$  به عنوان پارامترهای ورودی به نرم افزار داده شده و طیف تقاضا با شکل‌پذیری ثابت رسم می‌شود. با رسم طیف تقاضا، نقطه تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا به دست آمده و با نقطه اولیه مقایسه می‌شود، چنانچه اختلاف تغییر مکان طیفی در نقطه تقاطع و تغییر مکان طیفی در حدس اولیه کمتر از ۰.۵٪ تغییر مکان طیفی در حدس اولیه باشد تعیین نقطه هدف انجام گرفته است و در غیر این صورت نقطه تقاطع جدید به عنوان حدس اولیه در نظر گرفته شده و مراحل بالا تکرار می‌شود تا نقطه تقاطع مناسب طیف ظرفیت و طیف تقاضا مشخص شود.

**۲-۵- تعیین جابه‌جایی نقطه کنترل در نقطه هدف**

پس از تعیین نقطه هدف بر اساس بند (۲-۴) مقدار جابه‌جایی در نقطه کنترل از رابطه (۵) تعیین می‌شود.

$$\Delta_{cn} = \Gamma_n \phi_{cn} Sd_{nt} \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $Sd_{nt}$  میزان تغییر مکان طیفی در نقطه هدف است.

**۳- روش پیشنهادی جدید برای رسم طیف ظرفیت بدون نیاز به تعیین نقطه کنترل**

رابطه (۶) معادله تعادل دینامیکی یک سازه  $N$  درجه آزادی را تحت شتاب زمین  $(\ddot{u}_g(t))$  نشان می‌دهد.

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

در رابطه (۶)  $[M]$ ،  $[C]$ ،  $[K]$  ماتریس‌های  $N \times N$  سختی، میرایی و جرم سازه بوده و  $\{u(t)\}$ ،  $\{\dot{u}(t)\}$ ،  $\{\ddot{u}(t)\}$  بردارهای  $N \times 1$  جابه‌جایی، سرعت و شتاب سازه نسبت به حرکت تکیه گاه و تابعی از زمان است.  $\{I\}$  نیز بردار تاثیر بوده که اعضای آن در درجات آزادی هم امتداد با حرکت زمین برابر مقدار واحد بوده و در سایر درجات آزادی برابر مقدار صفر است. اگر فرض شود که بردار جابه‌جایی در هر لحظه از شکل مود ارتعاش  $n$ ام  $\{\phi_n\}$  تبعیت کند، شکل مود ارتعاش در حین تحلیل و رفتار غیرخطی ثابت بماند و همچنین فرض شود که پاسخ به وسیله‌ی یک مود ارتعاش کنترل شود، آنگاه بردار جابه‌جایی بر حسب جابه‌جایی نقطه کنترل  $u_c(t)$  با استفاده از رابطه (۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_N(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \phi_{1n} \\ \phi_{2n} \\ \vdots \\ \phi_{Nn} \end{Bmatrix} * u_c(t) \quad (7)$$

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

با مشتق‌گیری از رابطه (۷) ارتباط بردار سرعت در سازه  $N$  درجه آزادی و سرعت در نقطه کنترل  $\dot{u}_c(t)$  بصورت رابطه (۸) نوشته می‌شود.

جابه‌جایی نقطه کنترل و جابه‌جایی سازه یک‌درجه‌آزادی معادل  $x_e(t)$  به صورت رابطه (۱۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$u_c(t) = \Gamma_n * x_e(t) \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)  $\Gamma_n = \frac{\{\phi_n\}^T [M] \{I\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}}$  ضریب مشارکت مود  $n$ ام می‌باشد.

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۲) ارتباط بین سرعت در نقطه کنترل و سرعت در سازه یک‌درجه‌آزادی معادل از رابطه (۱۳) تعیین می‌شود.

$$\dot{u}_c(t) = \Gamma_n * \dot{x}_e(t) \quad (13)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۳) ارتباط بین شتاب در نقطه کنترل و شتاب در سازه یک‌درجه‌آزادی معادل مطابق رابطه (۱۴) است.

$$\ddot{u}_c(t) = \Gamma_n * \ddot{x}_e(t) \quad (14)$$

با جای‌گذاری روابط (۱۲) الی (۱۴) در رابطه (۱۱) معادله تعادل سازه یک‌درجه‌آزادی معادل مطابق رابطه (۱۵) تعیین می‌شود.

$$\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} \Gamma_n \ddot{x}_e(t) + \{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} \Gamma_n \dot{x}_e(t) + \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} \Gamma_n x_e(t) = -\{\phi_n\}^T [M] \{I\} \ddot{u}_g(t) \quad (15)$$

با جای‌گذاری  $\Gamma_n$  در رابطه (۱۵)، معادله تعادل سازه یک‌درجه‌آزادی معادل مطابق رابطه (۱۶) به صورت ساده شده نوشته می‌شود.

$$M_{en} \ddot{x}_e(t) + C_{en} \dot{x}_e(t) + K_{en} x_e(t) = -M_{en} \ddot{u}_g(t) \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)  $M_{en}$  جرم سازه یک‌درجه‌آزادی معادل،  $C_{en}$  میرایی سازه یک‌درجه‌آزادی معادل و  $K_{en}$  سختی سازه یک‌درجه‌آزادی معادل است که در روابط (۱۷) الی

$$\begin{cases} \dot{u}(t) \\ \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{u}_N(t) \end{cases} = \begin{cases} \phi_{1n} \\ \phi_{2n} \\ \vdots \\ \phi_{Nn} \end{cases} * \dot{u}_c(t) \quad (8)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۸) ارتباط بردار شتاب در سازه  $N$  درجه‌آزادی و شتاب در نقطه کنترل نیز مطابق رابطه (۹) تعیین می‌شود.

$$\begin{cases} \ddot{u}(t) \\ \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{u}_N(t) \end{cases} = \begin{cases} \phi_{1n} \\ \phi_{2n} \\ \vdots \\ \phi_{Nn} \end{cases} * \ddot{u}_c(t) \quad (9)$$

در حقیقت این فرض بدان معنی است که رفتار سازه چنددرجه‌آزادی را می‌توان به رفتار سازه یک‌درجه‌آزادی معادل تبدیل کرد که فرکانس دورانی طبیعی نامیرای سازه یک‌درجه‌آزادی معادل  $\omega_{en}$  با فرکانس دورانی طبیعی نامیرای مود  $n$ ام آن سیستم چنددرجه‌آزادی  $\omega_n$  برابر باشد و همچنین رفتار سازه چنددرجه‌آزادی از رفتار مود  $n$ ام و شکل مود  $n$ ام یعنی  $\{\phi_n\}$  تبعیت کند.

با جای‌گذاری روابط (۷) الی (۹) در رابطه (۶)، رابطه (۱۰) ارائه می‌شود.

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

با پیش ضرب رابطه (۱۰) در  $\{\phi_n\}^T$  رابطه (۱۱) نوشته می‌شود.

$$\begin{cases} \{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} \ddot{u}_c(t) + \{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} \dot{u}_c(t) + \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} u_c(t) = -\{\phi_n\}^T [M] \{I\} \ddot{u}_g(t) \end{cases} \quad (11)$$

با در نظر گیری یک سازه یک‌درجه‌آزادی معادل ارتباط بین

$$\{u^i\} = \{\phi_n\} * q^i \quad (22)$$

با استفاده از رابطه (۲۰) که فرکانس دورانی طبیعی نامیرای سازه یک‌درجه‌آزادی معادل را بیان می‌کند و ضرب صورت و منخرج کسر موجود در زیر رادیکال رابطه (۲۰) در  $(q^i * q^i)$  رابطه تعیین فرکانس دورانی طبیعی نامیرای سازه یک‌درجه‌آزادی معادل در گام  $i$  ام از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده مطابق رابطه (۲۳) نوشته می‌شود.

$$\omega_{en}^i = \sqrt{\frac{q_i \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} q_i}{q_i \{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\} q_i}} \quad (23)$$

با جای‌گذاری رابطه (۲۲) در رابطه (۲۳) رابطه (۲۴) نوشته می‌شود.

$$\omega_{en}^i = \sqrt{\frac{\{u^i\}^T [K] \{u^i\}}{\{u^i\}^T [M] \{u^i\}}} \quad (24)$$

با جای‌گذاری رابطه (۲۱) در رابطه (۲۴) فرکانس دورانی طبیعی نامیرای سازه یک‌درجه‌آزادی معادل در هر گام  $i$  از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده از رابطه (۲۵) تعیین می‌شود.

$$\omega_{en}^i = \sqrt{\frac{\{u^i\}^T \{F^i\}}{\{u^i\}^T [M] \{u^i\}}} \quad (25)$$

با تعیین فرکانس دورانی طبیعی نامیرای سازه یک‌درجه‌آزادی معادل مطابق رابطه (۲۵) در هر گام از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و تعیین طیف ظرفیت شتاب از رابطه (۴)، تعیین طیف ظرفیت تغییر مکان از رابطه (۲۶) انجام می‌شود.

$$Sd_n^i = \frac{Sa_n^i}{(\omega_{en}^i)^2} \quad (26)$$

$$M_{en} = \{\phi_n\}^T [M] \{I\} \quad (17)$$

$$C_{en} = \{\phi_n\}^T [C] \{\phi_n\} \frac{\{\phi_n\}^T [M] \{I\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}} \quad (18)$$

$$K_{en} = \{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\} \frac{\{\phi_n\}^T [M] \{I\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}} \quad (19)$$

در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده نیز فرض می‌شود سازه چنددرجه‌آزادی را می‌توان به سازه یک‌درجه‌آزادی معادل  $n$  مود آن معادل‌سازی نمود، به‌گونه‌ای که فرکانس طبیعی دورانی نامیرای سازه یک‌درجه‌آزادی معادل برابر با فرکانس طبیعی دورانی نامیرای  $n$  مود سازه چنددرجه‌آزادی در نظر گرفته می‌شود. در این صورت رابطه (۲۰) برقرار می‌شود.

$$\omega_{en} = \omega_n = \sqrt{\frac{\{\phi_n\}^T [K] \{\phi_n\}}{\{\phi_n\}^T [M] \{\phi_n\}}} \quad (20)$$

در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده برش پایه در گام  $i$  ام  $V_n^i$  با استفاده از شکل مود  $n$  با یک رژیم خاص بین درجات آزادی توزیع می‌شود و سپس تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام می‌گیرد و نیروی توزیع شده در درجه آزادی  $i$  برابر  $F_{jn}^i$  و بردار نیرو به صورت  $\{F^i\}$  قابل تعیین است. پس از انجام تحلیل، جابه‌جایی هر درجه آزادی  $i$  برابر  $u_z^i$  و بردار جابه‌جایی  $\{u^i\}$  خواهد بود. در این حالت رابطه (۲۱) بین بردار نیرو و جابه‌جایی برقرار است.

$$\{F^i\} = [K] \{u^i\} \quad (21)$$

با فرض اینکه جابه‌جایی محاسبه شده در هر گام  $i$  از شکل مود ارتعاش  $n$  پیروی می‌کند رابطه (۲۲) در نظر گرفته می‌شود.

صورتی که در روش متداول با در نظر گیری نقطه کنترل، از جابه جایی نقطه کنترل استفاده می شود.

۳- اثر رفتار غیرخطی در روش پیشنهادی در تعیین فرکانس سازه یک درجه آزادی معادل بر اساس بردار جابه جایی در تمام نقاط سازه لحاظ شده و در روش متداول با در نظر گیری نقطه کنترل این اثر فقط در جابه جایی نقطه کنترل لحاظ می شود.

۴- برای تعیین فرکانس سازه یک درجه آزادی معادل و رسم طیف ظرفیت در روش پیشنهادی علاوه بر استفاده از بردار جابه جایی سازه چند درجه آزادی، شکل توزیع نیروی جانبی (بردار نیرو) و نحوه توزیع جرم (ماتریس جرم) نیز در نظر گرفته می شود.

## ۵- معرفی پل مورد مطالعه و چگونگی مدل سازی

برای بررسی روش پیشنهادی از مدل سه بعدی پل دارای انحنا از مطالعات بردت و همکاران [۱۱] استفاده شده است. نرم افزار استفاده شده در مدل سازی ZEUS-NL [۱۲] است. پل دارای انحنا مورد مطالعه با طول ۳۴۴ متر دارای نه دهانه و هشت پایه بوده و عرشه بتنی آن دارای مقطع جعبه ای است. دهانه های ابتدا و انتهای پل دارای طول ۳۲ متر و دهانه های میانی دارای طول ۴۰ متر می باشند. پایه های پل به صورت تک ستونی با مقطع دایره بوده و شعاع انحنا عرشه برابر ۲۰۰ متر است. اتصال پایه ها به تکیه گاهشان نیز به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی اتصال عرشه به پایه ها و کوله ها از المان های اتصال شامل فنرهای با رفتار خطی و غیرخطی استفاده شده و در مدل سازی پایه و عرشه نیز از المان های تیر-ستون استفاده شده است که رفتار غیر خطی در آنها بر اساس المان های فایبر در نظر گرفته می شود. در

با توجه به مطالب عنوان شده مراحل رسم طیف ظرفیت تغییر مکان - شتاب از روش پیشنهادی به صورت زیر است.

- استخراج بردار جابه جایی گرهی از نتایج خروجی و تعیین بردار بار جانبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده در گام ۱ام.
- محاسبه فرکانس سازه یک درجه آزادی معادل بر اساس رابطه (۲۵) از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده سازه چند درجه آزادی در گام ۱ام.
- محاسبه شتاب طیفی از رابطه (۴) از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده سازه چند درجه آزادی در گام ۱ام.
- محاسبه تغییر مکان طیفی بر اساس رابطه (۲۶) در گام ۱ام.

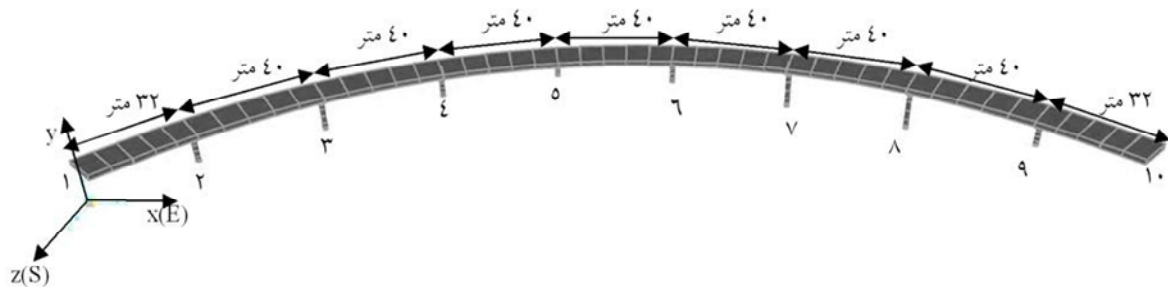
برای تعیین تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا به عنوان نقطه هدف از همان روش توضیح داده شده در بخش (۲-۴) استفاده می شود. برای تعیین وضعیت سازه در روش پیشنهادی در نقطه هدف، با توجه به اینکه نقطه هدف بر روی طیف ظرفیت واقع شده است گامی از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده که متناظر با تغییر مکان طیفی در نقطه هدف است تعیین شده و وضعیت سازه در آن گام مانند جابه جایی نقاط از نتایج خروجی مشخص می شود.

## ۴- ویژگی های روش پیشنهادی نسبت به روش متداول

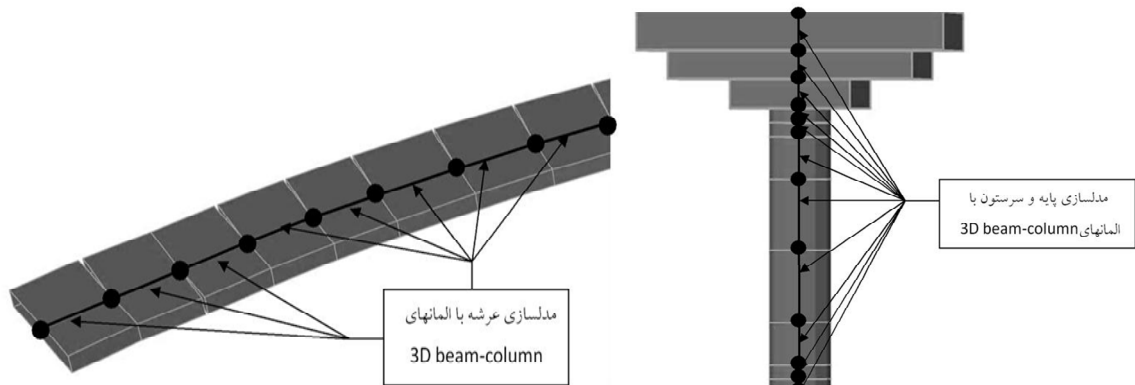
- ۱- رسم طیف ظرفیت سازه یک درجه آزادی معادل در روش پیشنهادی نیاز به در نظر گیری نقطه کنترل ندارد.
- ۲- برای رسم طیف ظرفیت سازه یک درجه آزادی معادل در روش پیشنهادی از بردار جابه جایی سازه در هر گام از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده استفاده شده در

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. کوله غربی با شماره ۱، کوله شرقی با شماره ۱۰ و پایه‌ها نیز با شماره‌های ۲ الی ۹ مشخص شده است. چگونگی مدل‌سازی عرشه، پایه و سرستون در شکل (۲) و نحوه قرارگیری پایه‌ها و در فضای سه بعدی در شکل (۳) نشان داده شده است.

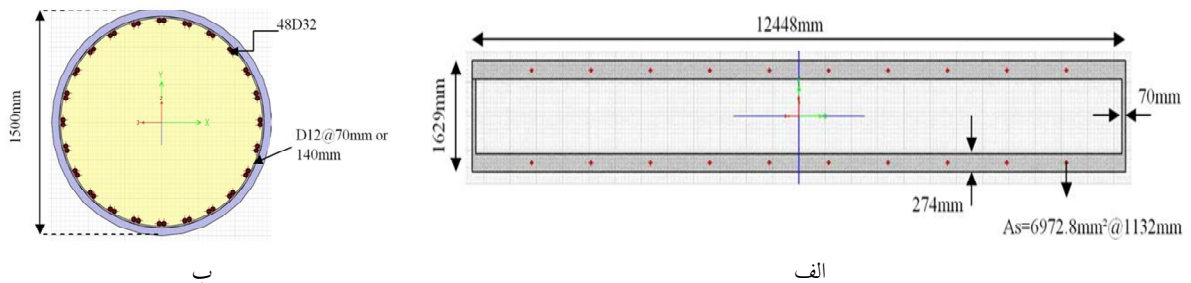
تحلیل‌های غیرخطی آثار ناشی از غیرخطی هندسی و غیر خطی ماده لحاظ می‌شود. مدل‌سازی جرم به صورت متمرکز در گره‌های مربوط به المان‌های عرشه و سرستون در نظر گرفته شده است. هندسه پل در فضای سه بعدی به همراه شماره پایه‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (۱) جهت شمالی-جنوبی متناظر با جهت ارتعاش عرضی (راستای  $Z$ ) و جهت شرقی-غربی متناظر



شکل (۱) هندسه سه بعدی پل مورد مطالعه به همراه شماره پایه‌ها، طول دهانه‌ها و جهت‌های محور مختصات

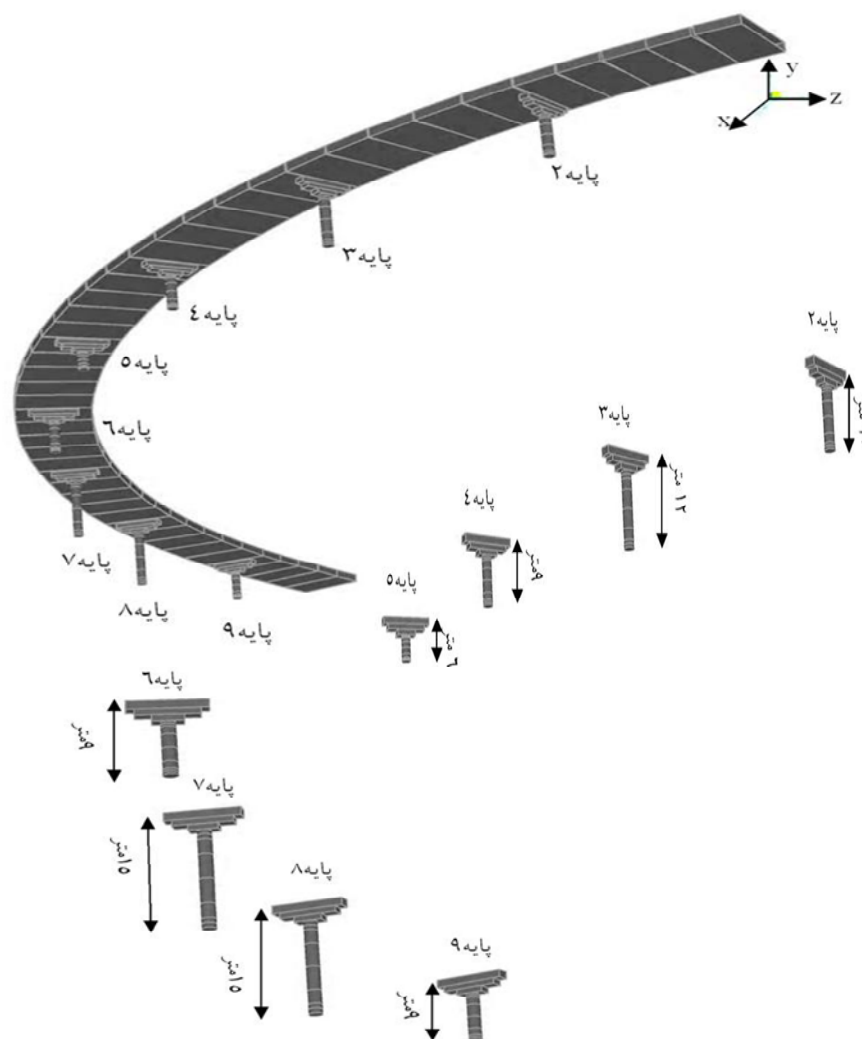


شکل (۲) چگونگی مدل‌سازی عرشه، پایه‌ها و سرستون با استفاده از المان‌های تیر-ستون



شکل (۳) مقطع اعضا: الف: پایه‌ها ب: عرشه





شکل (۴) چگونگی قرارگیری پایه‌ها و ارتفاع پایه‌ها در فضای سه‌بعدی در پل مورد مطالعه

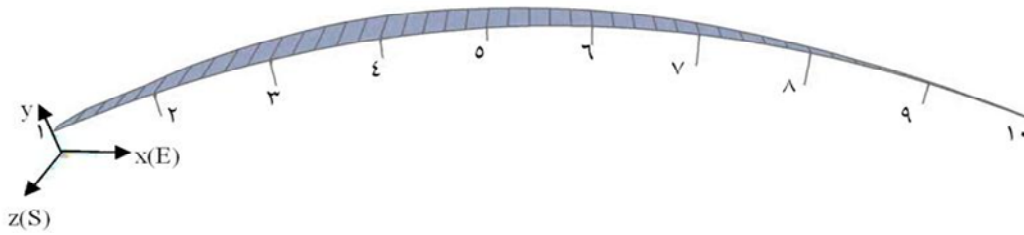
گیری زلزله‌های السنترو، مکزیکو و لوماپریتا به تعیین ظرفیت نهایی جابه‌جایی در پل مورد مطالعه پرداخته شده است.

در تحلیل دینامیکی افزایشی، پل مورد مطالعه در جهت عرضی (راستای z) تحت اثر زمین‌لرزه‌های السنترو، لوماپریتا، و مکزیکو با شدتهای مختلف قرار گرفته و بیشینه مقادیر جابه‌جایی راس پایه‌ها در جهت عرضی در هر مرحله ثبت می‌شود. مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشی و تحلیل دینامیکی افزایشی برای جابه‌جایی در راس پایه شماره ۵ انجام شده است.

با بررسی نتایج آنالیز مودال پل مورد نظر مشخص شد که مود اصلی سازه در جهت ارتعاش عرضی مود دوم سازه بوده و دارای در صد جرم موثر برابر با ۷۵٪ است.

### ۶- چگونگی تعیین زلزله متناظر با ظرفیت نهایی جابه‌جایی سازه با روش تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)

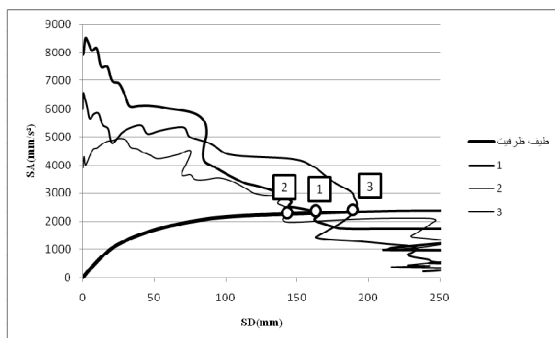
با توجه به اینکه نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به عنوان معیار برای بررسی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشی به کار می‌رود، در این قسمت با در نظر



شکل (۵) الگوی بار جانبی در تحلیل استاتیکی غیر خطی فراینده

و آنچه موجب اختلاف دو روش می‌شود چگونگی تعیین جابه‌جایی در راس پایه بحرانی بر اساس تغییر مکان طیفی در نقطه هدف است. با اعمال الگوی بار در جهت جنوبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فراینده نیز نقطه هدف و جابه‌جایی در راس پایه بحرانی در دو روش متداول و پیشنهادی تعیین شده است و مقایسه جابه‌جایی به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی فراینده و تحلیل دینامیکی افزایشی در زلزله های متناظر با ظرفیت نهایی سازه برای راس پایه ۵ در جدول (۳) نشان داده شده است. با تعیین جابه‌جایی در راس پایه ۵ بر اساس جدول (۳)، میزان اختلاف نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فراینده نسبت به تحلیل دینامیکی افزایشی در جدول (۴) نشان داده شده است. میزان اختلاف بر اساس رابطه (۲۷) تعیین شده است. در رابطه (۲۷)  $\Delta_{NSP}$  جابه‌جایی به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی فراینده در راس پایه ۵ است.

$$DIFF = \frac{(\Delta_{NSP} - 145)}{145} \times 100 \quad (27)$$



شکل (۶) طیف ظرفیت با در نظر گیری نقطه کنترل در راس پایه ۵ و طیف تقاضای زلزله های (۱-السترو ۲-مکزیکو ۳-لوما پریتا)

پس در تحلیل استاتیکی غیرخطی فراینده در روش متداول که نیاز به نقطه کنترل دارد برای ترسیم طیف ظرفیت از نقطه کنترل در راس پایه شماره ۵ استفاده شده است. برای انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی فراینده توزیع بار جانبی در جهت عرضی (راستای z) بر اساس شکل مود اصلی سازه در جهت ارتعاش عرضی با استفاده از رابطه (۱) انجام شده است و الگوی بار جانبی در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به وجود انحناء و ایجاد نامتقارنی در سازه الگوی بار جانبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فراینده یکبار در جهت شمالی و یکبار نیز در جهت جنوبی به سازه اعمال شده است. سپس با ترسیم طیف ظرفیت در روش متداول با در نظر گیری نقطه کنترل در راس پایه شماره ۵ و ترسیم طیف ظرفیت در روش پیشنهادی، نقطه هدف بر اساس تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا در هر دو روش تعیین شده و بر اساس آن، میزان جابه‌جایی در راس پایه بحرانی نیز در هر دو روش محاسبه شده است. ترسیم طیف ظرفیت در روش متداول با در نظر گیری نقطه کنترل در راس پایه شماره ۵ در اعمال الگوی بار جانبی در جهت شمالی و تعیین نقطه تقاطع طیف ظرفیت و طیف تقاضا در شکل (۶) نشان داده شده است. ترسیم طیف ظرفیت در روش پیشنهادی بدون نیاز به مشخص نمودن نقطه کنترل در اعمال الگوی بار جانبی در جهت شمالی و تعیین نقطه تقاطع طیف ظرفیت و طیف تقاضا در شکل (۷) نشان داده شده است. بررسی میزان تغییر مکان طیفی در نقطه هدف برای دو روش در شکل (۶) و (۷) نشان می‌دهد میزان تغییر مکان طیفی در نقطه هدف در دو روش به یکدیگر نزدیک می‌باشد

موجود برای ترسیم طیف ظرفیت و همچنین نحوه تعیین جابه‌جایی در راس پایه بحرانی بر اساس تغییر مکان طیفی در نقطه هدف است.

جدول (۳) جابه‌جایی محاسبه شده در راس پایه بحرانی در تحلیل استاتیکی غیر خطی فزاینده و تحلیل دینامیکی فزاینده

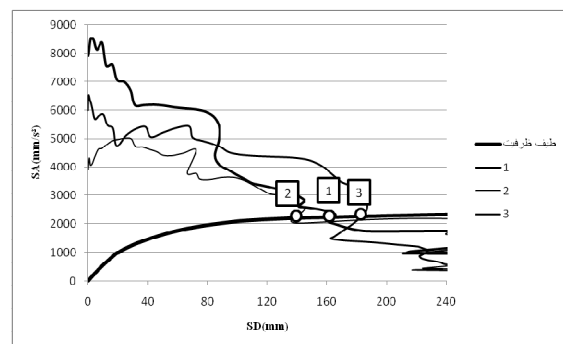
زلزله اعمالی متناظر با ظرفیت جابه‌جایی در پل مورد مطالعه	جابه‌جایی در راس پایه شماره ۵ (میلی‌متر)				
	تحلیل دینامیکی فزاینده	تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده		تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده	
		الگوی بار در جهت شمالی	الگوی بار در جهت جنوبی	الگوی بار در جهت شمالی	الگوی بار در جهت جنوبی
پل مورد مطالعه	افزاینده	روش متداول	روش پیشنهادی	روش متداول	روش پیشنهادی
السترو	۱۴۵	۱۸۵	۱۵۲	۱۵۹	۱۰۶
لوما پرتا	۱۴۵	۲۱۱	۱۶۸	۱۸۵	۱۱۱
مکزیکو	۱۴۵	۱۶۱	۱۳۱	۲۰۳	۱۱۶

جدول (۴) اختلاف جابه‌جایی محاسبه شده در راس پایه بحرانی در روش متداول و پیشنهادی

زلزله اعمالی متناظر با ظرفیت جابه‌جایی در پل مورد مطالعه	اختلاف			
	الگوی بار در جهت شمالی		الگوی بار در جهت جنوبی	
	روش متداول	روش پیشنهادی	روش متداول	روش پیشنهادی
السترو	۲۸	۵	۱۰	-۲۷
لوما پرتا	۴۶	۱۶	۲۸	-۲۳
مکزیکو	۱۱	-۱۰	۴۰	-۲۰

### ۸- نتیجه گیری

در مقاله ارائه شده روشی برای تعیین طیف ظرفیت و تغییر مکان هدف بدون نیاز به در نظر گیری نقطه کنترل در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده ارائه شد. در روش پیشنهادی فرکانس سازه یک‌درجه‌آزادی معادل در هر گام از نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده سازه چنددرجه‌آزادی بر اساس بردارهای جابه‌جایی، بردار نیرو و ماتریس جرم محاسبه شده و وضعیت سازه چنددرجه‌آزادی



شکل (۷) طیف ظرفیت در روش پیشنهادی و طیف تقاضای زلزله های (۱-السترو ۲-مکزیکو ۳-لوما پرتا)

نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده با اعمال الگوی بار در جهت شمالی برای جابه‌جایی راس پایه ۵ نشان می‌دهد میزان جابه‌جایی تعیین شده با در نظر گیری نقطه کنترل در راس پایه شماره ۵ بیش از جابه‌جایی راس پایه ۵ در زلزله های متناظر با ظرفیت سازه بوده و محدوده اختلاف نتایج بین ۱۱٪ و ۴۶٪ است. کاربرد روش پیشنهادی نشان می‌دهد در اعمال الگوی بار جانبی به سمت شمالی محدوده اختلاف نتایج بین ۱۰٪- و ۱۶٪ بوده و میزان جابه‌جایی تعیین شده برای راس پایه ۵ در زلزله‌های السترو و لوما پرتا بیش از جابه‌جایی راس پایه ۵ در زلزله‌های متناظر با ظرفیت سازه است. در زلزله مکزیکو نیز روش پیشنهادی میزان جابه‌جایی در راس پایه ۵ را کمتر از جابه‌جایی راس پایه ۵ در زلزله متناظر با ظرفیت سازه تعیین می‌کند. در اعمال الگوی بار به سمت جنوبی نیز جابه‌جایی تعیین شده در راس پایه ۵ با در نظر گیری نقطه کنترل در راس آن بیش از جابه‌جایی آن در زلزله‌های متناظر با ظرفیت بوده و در روش پیشنهادی جابه‌جایی تعیین شده کمتر از جابه‌جایی راس پایه ۵ در زلزله های متناظر با ظرفیت بوده و در زلزله های لوما پرتا و مکزیکو استفاده از روش پیشنهادی در اعمال بار در جهت جنوبی منجر به کاهش اختلاف نسبت به روش متداول شده است. از عوامل تأثیر گذار در ایجاد اختلاف در دو روش متداول و پیشنهادی تفاوت روابط

با ظرفیت نهایی از تحلیل دینامیکی افزایش یافته نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی نسبت به روش متداول در کاهش اختلاف نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده است.

## ۹- منابع

- [1] Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40, Redwood City, CA, 1996.
- [2] Applied Technology Council, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA-440, Washington, DC, 2005.
- [3] Pinho, R.; Monteiro, R.; Casarotti, C., "Assessment of Continuous Span Bridges Through Nonlinear Static Procedures", Earthquake Spectra, 25, 2009, 143-159.
- [4] Isakovic, T.; Fischinger, M., "Higher Modes in Simplified Inelastic Seismic Analysis of Single Column Bent Viaducts", Earthq Eng Struct Dyn, 35, 2006, 95-114.
- [5] Isakovic, T.; Lazaro, M.; Fischinger, M., "Applicability of Pushover Method for the Seismic Analysis of Single-Column Bent Viaducts", Earthq Eng Struct Dyn, 37, 2008, 1185-1202.
- [6] Mergos, P.; Sextos, A.; Kappos, A., "Seismic Assessment of a Major Bridge Using Pushover Analysis". International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences, Corfu, Greece, 24-30 July, 2003, Paper No.333.
- [7] Paraskeva, TS.; Kappos, A.; Sextos, A., "Extension of Modal Pushover Analysis to Seismic Assessment of Bridges", Earthq Eng Struct Dyn, 35, 2006, 1269-1293.
- [8] Paraskeva, TS.; Kappos, A., "Further Development of a Multimodal Pushover Analysis Procedure for Seismic Assessment of Bridges", Earthq Eng Struct Dyn, 39, 2010, 211-222.
- [9] Chopra AK., "Dynamics of Structures". 3rd ed: California, Pearson Education Inc, 2006, pp 275-277.
- [10] SeismoSoft. Seismosignal. Available from URL: <http://www.seismosoft.com>, 2011.
- [11] Burdette, NJ.; Elnashai, AS., "Effect of Asynchronous Earthquake Ground Motion on Complex Bridges. II Result and Implications on Assessment". J of Bridge Eng, 13, 2008, 166-172.
- [12] Elnashai, AS.; Papanikolaou V.; Lee, DH., "ZEUS-NL", Mid America Earthquake Center, Illinois, 2010.
- [13] California Dept. of Transportation (Caltrans), Caltrans seismic design criteria, Sacramento, Calif, 2010.

به صورت گام به گام در تعیین فرکانس سازه یک درجه آزادی معادل لحاظ می‌شود. با تعیین فرکانس سازه یک درجه آزادی معادل، تغییر مکان طیفی سازه یک درجه آزادی معادل بر اساس شتاب طیفی و فرکانس به دست آمده در هر گام از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده محاسبه شده و طیف ظرفیت ترسیم می‌شود. پس از ترسیم طیف ظرفیت، نقطه هدف بر اساس تقاطع طیف ظرفیت و تقاضا تعیین می‌شود. با توجه به اینکه نقطه هدف روی طیف ظرفیت واقع شده است گامی از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده که متناظر با تغییر مکان طیفی در نقطه هدف است تعیین شده و وضعیت سازه در آن گام مانند جابه‌جایی نقاط از نتایج خروجی مشخص می‌شود. برای بررسی روش، کاربرد آن در یک نمونه پل چند دهانه و دارای انحناء در پلان برای تعیین جابه‌جایی در راس پایه بحرانی سازه مورد ارزیابی قرار گرفت. به همین منظور زلزله‌های متناظر با ظرفیت نهایی جابه‌جایی سازه به همراه پایه بحرانی از طریق تحلیل دینامیکی افزایش یافته مشخص شد. با تعیین زلزله‌های متناظر با ظرفیت نهایی جابه‌جایی سازه، از آنها برای تعیین طیف تقاضا و تعیین نقطه هدف و جابه‌جایی در راس پایه بحرانی در تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده استفاده شد. با تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده پل با استفاده از الگوی بار بر اساس شکل مود اصلی سازه در جهت ارتعاش عرضی و اعمال آن در جهت شمالی و جنوبی، طیف ظرفیت در روش متداول با در نظرگیری نقطه کنترل در راس پایه بحرانی و روش پیشنهادی بدون مشخص نمودن نقطه کنترل ترسیم شد و پس از تعیین نقطه هدف، میزان جابه‌جایی در راس پایه بحرانی مشخص شد. بررسی اختلاف بین جابه‌جایی تعیین شده در راس پایه بحرانی از تحلیل استاتیکی غیرخطی فزاینده و جابه‌جایی راس پایه بحرانی در زلزله‌های متناظر

# Drawing Capacity Spectrum and Determining of Target Displacement without Control Point For Horizontally Curved Bridges

A. Golafshar<sup>1</sup>, F. Daneshjoo<sup>2\*</sup>

1- PhD. Student of Earthquake Eng., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Prof., Earthquake Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

danesh\_fa@modares.ac.ir

## Abstract:

Nonlinear Static pushover (NSP) analysis has become a popular tool for the seismic assessment of buildings and bridges. One of the well-known methods to determine the target displacement during NSP is Capacity Spectrum Method (CSM). In the Conventional CSM, capacity spectrum is drawn based on the location of control point to determine the target displacement. Because of dependency of displacement capacity spectrum on the location of control point, determination of displacement capacity spectrum needs further evaluation and can be time consuming specially for complicated structures. Previous studies have been proposed different choices for location of control point in the bridges such as the point with the maximum displacement or the top point of critical pier. In this paper the CSM has been developed for drawing capacity spectrum. The proposed method is based on determination of displacement capacity spectrum from pushover analysis of MDOF system without selection of any control point. The proposed method is based on derivation of frequency of SDOF system based on current situation of MDOF system for each mode and step. Moreover, nonlinear behavior of MDOF system is considered in frequency of SDOF system step by step. After derivation of frequency of SDOF system, displacement capacity spectrum of SDOF system at each mode and step is determined based on the current frequency and current acceleration capacity spectrum. In this paper for both of the proposed and conventional methods, demand curve is obtained by time history analysis of a SDOF system and specifications of bilinear capacity spectrum. In the proposed method, determination of displacement for each point is based on NSP step that SDOF bilinear capacity curve intersect to demand curve. For evaluation of proposed and conventional methods a horizontally curved bridge have been selected and critical pier and earthquake corresponding to displacement capacity of bridge is determined through Incremental Dynamic Analysis (IDA). Then the proposed and conventional methods in the horizontally curved bridge are applied during NSP with force distribution based on first transverse mode shape. Assessing the result reveals that displacement from proposed and conventional method are different because of different formulations and dependency of proposed method to displacement vector, force vector and mass matrix of structures during NSP while the conventional method depends only to displacement of one point. Another feature that distinguishes proposed from conventional

method and causes different results is the way that target displacement is determined from target spectrum displacement for top of critical pier. Finally comparison of top displacement of critical pier from proposed and conventional methods with those derived from (IDA) shows the efficiency of proposed method to reduce difference between the NSP and IDA results.

**Keywords:** Control point, Displacement capacity spectrum, Target Displacement, Curved bridge