

بررسی آثار برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه در بارگذاری لرزه‌ی سازه‌ها بخش دوم: حرکت‌های ورودی پی

محمدرضا فلاهرز شیخ آبادی (کارشناس ارشد)

محسن غفوری آشتیانی* (استاد)

بزه‌نگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

در این نوشتار، با در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه، رابطه‌ی برای تعیین تحریک لرزه‌ی سازه‌های مستقر بر دو نوع سیستم پی گسترده و منفرد ارائه شده است. برای این منظور ابتدا تأثیرات شکل هندسی پی بر حرکت ورودی این دو نوع سیستم پی به صورت پارامتریک بررسی و سپس توابع تبدیل متناظر با حرکات ورودی این پی‌ها استخراج شده‌اند. همچنین بخشی پارامتریک برای مقایسه‌ی مؤلفه‌های دورانی و انتقالی ورودی دو نوع سیستم پی گسترده و منفرد انجام شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی ورودی سازه با سیستم پی منفرد که دارای طبقات با دیافراگم صلب است، تقریباً برابر با مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی سازه‌ی مشابه با پی گسترده‌ی صلب است.

واژگان کلیدی: مؤلفه‌های دورانی، سرعت فاز، محورهای اصلی، هم‌گرایی، برهم‌کنش سینماتیک.

m.falamarz@gmail.com
mohsen.ashtiany@gmail.com

۱. مقدمه

بارگذاری سازه‌ها هنگامی که پی در خاک مدفون باشد، حتی بیشتر هم خواهد شد و در نظر نگرفتن آن در طراحی‌ها را می‌توان به منزله‌ی نقصی در بارگذاری سازه‌ی در نظر گرفت.^[۱،۲]

هدف این نوشتار، محاسبه‌ی مؤلفه‌های ورودی پی‌ها با در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه در دو حوزه‌ی تاریخچه‌ی زمانی و بسامدی است. از این رو ابتدا فرایندی برای تعیین کلیه‌ی مؤلفه‌های ورودی پی، براساس نوع سیستم آن ارائه می‌شود. سپس به صورت پارامتریک، تأثیر شکل هندسی و نوع سیستم پی در چگونگی تغییر مؤلفه‌های ورودی بررسی و ارزیابی خواهد شد.

۲. تعیین «شتاب ورودی پی‌ها» با در نظر گرفتن اثرات

برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه

در این بخش فرایند محاسبه‌ی مؤلفه‌های شتاب ورودی پی‌ها برای دو نوع سیستم پی ارائه می‌شود:

۱. سازه‌های با سیستم پی گسترده؛
۲. سازه‌های با سیستم پی منفرد.

۱.۲. شتاب ورودی سازه‌های با سیستم پی گسترده

در صورتی که مجموعه‌ی پی از پی‌های منفرد همانند شکل ۱ ب. با کلاف‌بندی مناسب

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۱۰، اصلاحیه ۱۳۸۹/۶/۳، پذیرش ۱۳۸۹/۹/۲.

و $\{k_{xp}, k_{yp}, k_{zp}, k_{\theta xp}, k_{\theta yp}, k_{\theta zp}\}$ به ترتیب مؤلفه‌های حرکتی زمین در راستای محورهای اصلی سازه و سختی‌های متناظر با مش p ام هستند. با استفاده از اصل کمینه انرژی، بهینه‌ترین حرکت پی که به ازای آن کمترین انرژی مصرف شود، به صورت رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial E}{\partial u_x^F} = \frac{\partial E}{\partial u_y^F} = \frac{\partial E}{\partial u_z^F} = \frac{\partial E}{\partial \theta_x^F} = \frac{\partial E}{\partial \theta_y^F} = \frac{\partial E}{\partial \theta_z^F} = 0 \quad (3)$$

با حل معادلات حاصل از رابطه‌ی ۳، روابط محاسبه‌ی حرکت‌های ورودی پی مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شوند:

$$[K] \cdot \{u^F\} = \{F^g\} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 & 0 & \sum_{p=1}^N z_p k_{yp} & -\sum_{p=1}^N y_p k_{xp} \\ 0 & K_y & 0 & -\sum_{p=1}^N z_p k_{yp} & 0 & \sum_{p=1}^N x_p k_{yp} \\ 0 & 0 & K_z & \sum_{p=1}^N y_p k_{zp} & -\sum_{p=1}^N x_p k_{zp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\theta x} & -\sum_{p=1}^N y_p x_p k_{zp} & -\sum_{p=1}^N z_p x_p k_{yp} \\ 0 & 0 & 0 & -\sum_{p=1}^N y_p x_p k_{zp} & -\sum_{p=1}^N z_p x_p k_{yp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_x^F \\ u_y^F \\ u_z^F \\ \theta_x^F \\ \theta_y^F \\ \theta_z^F \end{bmatrix} = \sum_{p=1}^N \left([\hat{K}_p] \cdot \{u_p^g\} \right) \quad (4)$$

که در آن درایه‌های روی قطر اصلی ماتریس مشخصه‌ی پی $[K]$ طبق روابط ۵ برابرند با:

$$K_x = \sum_{p=1}^N k_{xp} \quad K_{\theta x} = \sum_{p=1}^N (k_{\theta xp} + z_p^i k_{yp} + y_p^i k_{zp})$$

$$K_y = \sum_{p=1}^N k_{yp} \quad K_{\theta y} = \sum_{p=1}^N (k_{\theta yp} + z_p^i k_{xp} + x_p^i k_{zp})$$

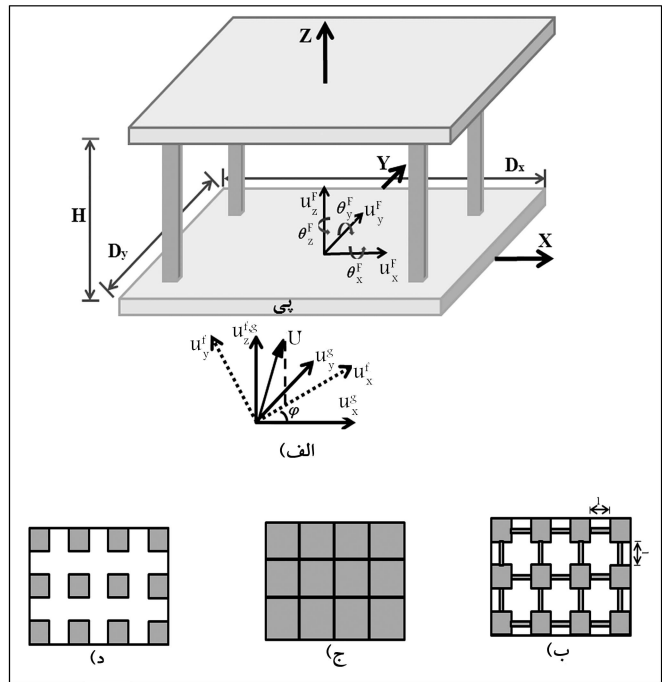
$$K_z = \sum_{p=1}^N k_{zp} \quad K_{\theta z} = \sum_{p=1}^N (k_{\theta zp} + x_p^i k_{yp} + y_p^i k_{xp}) \quad (5)$$

و ماتریس تأثیر پی منفرد p ام $[\hat{K}_p]$ ، نیز مطابق رابطه‌ی ۶ برابر است با:

$$[\hat{K}_p] =$$

$$= \begin{bmatrix} k_{xp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{yp} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{zp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{yp} z_p & k_{zp} y_p & k_{\theta xp} & 0 & 0 \\ k_{xp} z_p & 0 & -k_{zp} x_p & 0 & k_{\theta yp} & 0 \\ -k_{xp} y_p & k_{yp} x_p & 0 & 0 & 0 & k_{\theta zp} \end{bmatrix} \quad (6)$$

حال در صورتی که جهت غالب انتشار امواج زلزله مطابق با شکل ۱ الف به طور مایل و با زاویه‌ی φ نسبت به محور x سازه باشد، کافی است راستای معادل حرکت زمین در امتداد محورهای اصلی سازه محاسبه شود. برای این منظور اگر مؤلفه‌های حرکتی زمین (میدان



شکل ۱. مدل پی و سازه‌ی در نظر گرفته شده.

و قوی به یکدیگر متصل باشند، می‌توان فرض کرد که این نوع سیستم پی، رفتاری سینماتیک تقریباً مشابه یک پی گسترده دارد. با فرض صلب بودن پی، پی گسترده‌ی شکل ۱ ج را می‌توان حالت خاصی از پی‌های منفرد (مش‌ها) پیوسته با فاصله‌ی $l = 0$ فرض کرد و در هر دو حالت می‌توان شتاب ۶ مؤلفه‌ی ورودی را به صورت یکسان تخمین زد. اگر ۶ مؤلفه‌ی حرکتی در نقطه‌ی روی سطح پی (نقطه‌ی مرجع) $\{u^F\}^T = \{u_x^F, u_y^F, u_z^F, \theta_x^F, \theta_y^F, \theta_z^F\}$ باشد، جابجایی پی منفرد p ام (مش) p ام مطابق رابطه‌ی ۱ محاسبه خواهد شد:

$$U_p^F = \begin{bmatrix} U_{xp}^F \\ U_{yp}^F \\ U_{zp}^F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_x^F - y_p \theta_z^F + z_p \theta_y^F \\ u_y^F + x_p \theta_z^F - z_p \theta_x^F \\ u_z^F - x_p \theta_y^F + y_p \theta_x^F \end{bmatrix} \quad (1)$$

در صورتی که فرض شود خاک در کشش هم کار می‌کند و نیروی اصطکاک بین خاک و پی آن قدر زیاد است که لغزشی بین خاک و پی رخ نمی‌دهد، با اختصاص ۶ درجه‌ی آزادی به مرکز هر پی منفرد (مش)، معادله‌ی انرژی حاکم بر حرکت کلی پی با فرض بی‌جرم بودن آن مطابق رابطه‌ی ۲ است:

$$E = \sum_{p=1}^N \left[\frac{1}{2} k_{xp} (U_{xp}^F - u_{xp}^g)^2 + \frac{1}{2} k_{yp} (U_{yp}^F - u_{yp}^g)^2 + \frac{1}{2} k_{zp} (U_{zp}^F - u_{zp}^g)^2 \right] + \sum_{p=1}^N \left[\frac{1}{2} k_{\theta xp} (\theta_x^F - \theta_{xp}^g)^2 + \frac{1}{2} k_{\theta yp} (\theta_y^F - \theta_{yp}^g)^2 + \frac{1}{2} k_{\theta zp} (\theta_z^F - \theta_{zp}^g)^2 \right] \quad (2)$$

که در آن:

$$\{u_p^g\}^T = \{u_{xp}^g, u_{yp}^g, u_{zp}^g, \theta_{xp}^g, \theta_{yp}^g, \theta_{zp}^g\}$$

$(E[\ddot{\theta}^g \ddot{u}^g] = 0)$ ، برابر با رابطه ی ۱۰ خواهند شد:

$$diag \left\{ S^F(\omega) \right\}_{\epsilon \times \epsilon} = \left[\begin{array}{c} \frac{S_x^g(\omega)}{N^{\uparrow}} \cdot A_N \\ \frac{S_y^g(\omega)}{N^{\uparrow}} \cdot A_N \\ \frac{S_z^g(\omega)}{N^{\uparrow}} \cdot A_N \\ \frac{k_{\theta x}^{\uparrow} S_{\theta x}^g(\omega)}{(K_{\theta x}|_{z=0})^{\uparrow}} \cdot A_N + \frac{k_z^{\uparrow} S_z^g(\omega)}{(K_{\theta x}|_{z=0})^{\uparrow}} \cdot A_y \\ \frac{k_{\theta y}^{\uparrow} S_{\theta y}^g(\omega)}{(K_{\theta y}|_{z=0})^{\uparrow}} \cdot A_N + \frac{k_z^{\uparrow} S_z^g(\omega)}{(K_{\theta y}|_{z=0})^{\uparrow}} \cdot A_x \\ \left[\begin{array}{c} \frac{k_{\theta z}^{\uparrow} S_{\theta z}^g(\omega)}{K_{\theta z}^{\uparrow}} \cdot A_N + \frac{k_x^{\uparrow} S_x^g(\omega)}{K_{\theta z}^{\uparrow}} \cdot A_y + \frac{k_y^{\uparrow} S_y^g(\omega)}{K_{\theta z}^{\uparrow}} \cdot A_x \\ -\rho_{xy} \frac{k_x k_y \sqrt{S_y^g(\omega) S_x^g(\omega)}}{K_{\theta z}^{\uparrow}} \cdot A_{xy} \end{array} \right] \end{array} \right] \quad (10)$$

که در آن $S_x^g(\omega), S_y^g(\omega), S_z^g(\omega)$ به ترتیب چگالی طیفی مؤلفه های افقی زلزله در راستای محورهای x و y و z هستند. در صورت نبود چگالی طیفی مؤلفه های دورانی زلزله می توان چگالی طیفی مؤلفه های شتاب گهواره ای زلزله را برابر با $S_{\theta x}^g(\omega) = S_{\theta y}^g(\omega) = \omega^{\uparrow} S_z^g(\omega) / V_A^{\uparrow}$ و چگالی طیفی مؤلفه ی شتاب پیچشی زلزله را نیز برابر با $S_z^g(\omega) = (\omega^{\uparrow} / 4 V_A^{\uparrow}) (S_x^g(\omega) + S_y^g(\omega))$ در نظر گرفت.^[۹] که در آن V_A سرعت ظاهری متناظر امواج زلزله است. به این ترتیب می توان ۶ مؤلفه ی چگالی طیفی ورودی پی را محاسبه کرد. همچنین در صورتی که فرض شود راستای انتشار امواج لرزه ای، هم امتداد با محورهای اصلی تحریک باشد؛ ρ_{xy} برابر صفر می شود. با وجود این، با توجه به اینکه در حال حاضر تحلیل سازه ها در حوزه ی بسامدی تحت تحریک اثر هم زمان ۶ مؤلفه ی زلزله ممکن نیست، از این رو در ادامه، روشی در حوزه ی تاریخچه ی زمانی برای محاسبه ی ۶ مؤلفه ی ورودی با استفاده از رابطه ی ۱۰ ارائه می شود. ابتدا با توجه به رابطه ی ۱۱ و با فرض $\rho_{xy} = 0$ ، رابطه ی ۱۰ به صورت رابطه ی ۱۱ بازنویسی می شود:

$$T^F(\omega) = \left\{ \begin{array}{c} (T_x^F(\omega))^{\uparrow} \\ (T_y^F(\omega))^{\uparrow} \\ (T_z^F(\omega))^{\uparrow} \\ (T_{\theta x}^F(\omega))^{\uparrow} \\ (T_{\theta y}^F(\omega))^{\uparrow} \\ (T_{\theta z}^F(\omega))^{\uparrow} \end{array} \right\} \equiv \left\{ \begin{array}{c} \frac{S_x^F(\omega)}{S_x^g(\omega)} \\ \frac{S_y^F(\omega)}{S_y^g(\omega)} \\ \frac{S_z^F(\omega)}{S_z^g(\omega)} \\ \frac{S_{\theta x}^F(\omega)}{S_{\theta x}^g(\omega)} \\ \frac{S_{\theta y}^F(\omega)}{S_{\theta y}^g(\omega)} \\ \frac{S_{\theta z}^F(\omega)}{S_{\theta z}^g(\omega)} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{A_N}{N^{\uparrow}} \\ \frac{A_N}{N^{\uparrow}} \\ \frac{A_N}{N^{\uparrow}} \\ \frac{k_{\theta x}^{\uparrow} \omega^{\uparrow}}{V_A^{\uparrow} (K_{\theta x}|_{z=0})^{\uparrow}} \cdot A_N + \frac{k_z^{\uparrow}}{(K_{\theta x}|_{z=0})^{\uparrow}} \cdot A_y \\ \frac{k_{\theta y}^{\uparrow} \omega^{\uparrow}}{V_A^{\uparrow} (K_{\theta y}|_{z=0})^{\uparrow}} \cdot A_N + \frac{k_z^{\uparrow}}{(K_{\theta y}|_{z=0})^{\uparrow}} \cdot A_x \\ \frac{k_{\theta z}^{\uparrow} \omega^{\uparrow} (1 + r_{xy}^{\uparrow}(\omega))}{4 V_A^{\uparrow} K_{\theta z}^{\uparrow}} \cdot A_N + \frac{k_x^{\uparrow} r_{xy}^{\uparrow}(\omega)}{K_{\theta z}^{\uparrow}} \cdot A_y + \frac{k_y^{\uparrow}}{K_{\theta z}^{\uparrow}} \cdot A_x \end{array} \right\} \quad (11)$$

که در آن نسبت $r_{xy}(\omega)$ برابر با $|\ddot{u}_x^g(i\omega)| / |\ddot{u}_y^g(i\omega)|$ است. با فرض اینکه فاز

آزاد) در جهت انتشار برابر $\{u_p^f\}^T = \{u_{x'p}^f, u_{y'p}^f, u_{z'p}^f, \theta_{x'p}^f, \theta_{y'p}^f, \theta_{z'p}^f\}$ و $T(\varphi)$ ماتریس کسینوس هادی باشد، مؤلفه های حرکتی زمین در راستای محورهای اصلی سازه $\{u_p^g\} = [T(\varphi)] \cdot \{u_p^f\}$ و چگالی طیفی های متناظر با آن ها $\{S_{pq}^g(\omega)\}_{\epsilon \times \epsilon} = [T(\omega)] \cdot \{S_{pq}^f(\omega)\}_{\epsilon \times \epsilon} \cdot [T(\varphi)]^T$ خواهند شد. با توجه به این فرضیات، چگالی طیفی ورودی پی مطابق رابطه ی ۷ محاسبه خواهد شد:

$$\{S_{\varphi}^F(\omega)\}_{\epsilon \times \epsilon} = [K]_{\epsilon \times \epsilon}^{-1} \cdot \left\{ \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \left([\hat{K}_p]_{\epsilon \times \epsilon} \cdot \{S_{pq}^g(\omega)\}_{\epsilon \times \epsilon} \cdot [\hat{K}_q]_{\epsilon \times \epsilon}^T \right) \right\} \cdot [K]_{\epsilon \times \epsilon}^{-1} \quad (12)$$

در حالت خاص، برای یک پی سطحی هنگامی که حرکت زمین در راستای محورهای اصلی سازه ($\varphi = 0$) باشد، با بازنویسی رابطه ی ۴ بر حسب شتاب ورودی پی و با فرضیات یکسان بودن سختی های متناظر مش ها و قرار گرفتن مبدا دستگاه مختصات در محل مرکز سختی پی، درایه های غیرقطری ماتریس $[K]$ همگی صفر خواهند شد.

در این صورت شتاب ورودی پی از رابطه ی ۸ محاسبه خواهد شد:

$$\{ \ddot{u}^F \} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \ddot{u}_{xp}^g \\ \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \ddot{u}_{yp}^g \\ \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \ddot{u}_{zp}^g \\ \frac{k_{\theta x}^{\uparrow}}{K_{\theta x}^{\uparrow}} \sum_{p=1}^N \ddot{\theta}_{xp}^g + \frac{k_z^{\uparrow}}{K_{\theta x}^{\uparrow}} \sum_{p=1}^N y_p \ddot{u}_{zp}^g \\ \frac{k_{\theta y}^{\uparrow}}{K_{\theta y}^{\uparrow}} \sum_{p=1}^N \ddot{\theta}_{yp}^g - \frac{k_z^{\uparrow}}{K_{\theta y}^{\uparrow}} \sum_{p=1}^N x_p \ddot{u}_{zp}^g \\ \frac{k_{\theta z}^{\uparrow}}{K_{\theta z}^{\uparrow}} \sum_{p=1}^N \ddot{\theta}_{zp}^g - \frac{k_x^{\uparrow}}{K_{\theta z}^{\uparrow}} \sum_{p=1}^N y_p \ddot{u}_{xp}^g + \frac{k_y^{\uparrow}}{K_{\theta z}^{\uparrow}} \sum_{p=1}^N x_p \ddot{u}_{yp}^g \end{array} \right\}_{\epsilon \times 1} \quad (13)$$

درایه های قطری ماتریس چگالی طیفی شتاب ورودی $\{S_{\varphi}^F(\omega)\}$ متناظر با رابطه ی ۸، در صورتی که تابع هم گزائی γ_{pq} و هم بستگی ρ_{xy} به ترتیب برابر با $S_{pq} / \sqrt{S_{pp} S_{qq}}$ و $S_{xy} / \sqrt{S_{xx} S_{yy}}$ و در نظر گرفته شوند، طبق تعریف رابطه ی ۹:

$$A_N = \left(N + 2 \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=p+1}^N \text{Re al}(\gamma_{pq}) \right) \\ A_x = \left(\sum_{p=1}^N x_p^{\uparrow} + 2 \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=p+1}^N x_p x_q \text{Re al}(\gamma_{pq}) \right) \\ A_y = \left(\sum_{p=1}^N y_p^{\uparrow} + 2 \sum_{p=1}^{N-1} \sum_{q=p+1}^N y_p y_q \text{Re al}(\gamma_{pq}) \right) \\ A_{xy} = \left(\sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N x_p y_q \gamma_{pq} \right) \quad (9)$$

و با فرض ناهمبسته بودن مؤلفه های دورانی و انتقالی زلزله نسبت به هم

حرکتی مؤلفه‌های ورودی پی برابر با رابطه‌ی ۱۲ باشد:

$$\varphi^F(\omega) = \varphi^g(\omega) \pm \psi \varphi^T(\omega) \quad (12)$$

که در آن $\varphi^g(\omega)$ فاز حرکتی مؤلفه‌های میدان آزاد، ψ عددی از بازه‌ی $0 \leq \psi \leq 1/2$ و $\varphi^T(\omega)$ بیان‌گر تغییرات فاز ورودی پی برابر با: $\omega D_x / V_A$ است D_x بُعد پی در جهت انتشار امواج است). به این ترتیب تبدیل فوریه‌ی مؤلفه‌های ورودی پی مطابق رابطه‌ی ۱۳ خواهند شد:

$$\begin{pmatrix} \ddot{u}_x^F(i\omega) \\ \ddot{u}_y^F(i\omega) \\ \ddot{u}_z^F(i\omega) \\ \ddot{\theta}_x^F(i\omega) \\ \ddot{\theta}_y^F(i\omega) \\ \ddot{\theta}_z^F(i\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x^F(\omega) \cdot \ddot{u}_x^g(i\omega) \cdot e^{\pm i\psi\varphi_x^T(\omega)} \\ T_y^F(\omega) \cdot \ddot{u}_y^g(i\omega) \cdot e^{\pm i\psi\varphi_y^T(\omega)} \\ T_z^F(\omega) \cdot \ddot{u}_z^g(i\omega) \cdot e^{\pm i\psi\varphi_z^T(\omega)} \\ T_{\theta_x}^F(\omega) \cdot \frac{|\ddot{u}_x^g(i\omega)|}{|\ddot{\theta}_x^g(i\omega)|} \cdot \ddot{\theta}_x^g(i\omega) \cdot e^{\pm i\psi\varphi_{\theta_x}^T(\omega)} \\ T_{\theta_y}^F(\omega) \cdot \frac{|\ddot{u}_y^g(i\omega)|}{|\ddot{\theta}_y^g(i\omega)|} \cdot \ddot{\theta}_y^g(i\omega) \cdot e^{\pm i\psi\varphi_{\theta_y}^T(\omega)} \\ T_{\theta_z}^F(\omega) \cdot \frac{|\ddot{u}_z^g(i\omega)|}{|\ddot{\theta}_z^g(i\omega)|} \cdot \ddot{\theta}_z^g(i\omega) \cdot e^{\pm i\psi\varphi_{\theta_z}^T(\omega)} \end{pmatrix} \quad (13)$$

با محاسبه‌ی معکوس تبدیل فوریه‌ی رابطه‌ی ۱۳، مجموعه‌ی پی از ۶ مؤلفه‌ی تاریخچه‌ی زمانی ورودی پی به دست می‌آیند، که از آن‌ها می‌توان برای تحریک سازه‌ی مورد نظر و تعیین بحرانی‌ترین پاسخ اعضای سازه در هر بارگذاری استفاده کرد.

۲.۲. شتاب ورودی سازه‌های دارای سیستم پی منفرد با کلاف‌بندی ضعیف

برای سازه‌هایی با سیستم پی منفرد مطابق شکل ۱د، در صورتی که طبقات سازه دارای دیافراگم صلب در صفحه نباشند، تحریک چنین سازه‌هایی در حالت کلی مشابه سازه‌های چندتکیه‌گاهی انجام می‌گیرد. در غیر این صورت می‌توان مؤلفه‌های حرکتی ورودی سازه را با میانگین‌گیری بر روی مؤلفه‌های حرکتی اولین طبقه‌ی آن محاسبه کرد. به این ترتیب با فرضیات و روشی مشابه حالت پی گسترده، مؤلفه‌های شتاب شبه‌استاتیکی سازه با فرض اینکه سختی‌های پیچشی و انتقالی ستون p ام به ترتیب برابر با $k_{\theta p} = k_{\theta}$ ، $k_{x p} = k_{y p} = k$ باشند، مطابق رابطه‌ی ۱۴ محاسبه خواهند شد:

$$\{\ddot{U}^{qs}\} = \begin{pmatrix} \ddot{u}_x^{qs} \\ \ddot{u}_y^{qs} \\ \ddot{\theta}_z^{qs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{p=1}^N (\ddot{u}_{x p}^g + h_1 \ddot{\theta}_y^g)}{N} \\ \frac{\sum_{p=1}^N (\ddot{u}_{y p}^g + h_1 \ddot{\theta}_x^g)}{N} \\ \frac{k}{K_{\theta}} \sum_{p=1}^N \left([\ddot{u}_{y p}^g + h_1 \ddot{\theta}_x^g] \cdot x_p + [\ddot{u}_{x p}^g + h_1 \ddot{\theta}_y^g] \cdot y_p \right) + \frac{k_{\theta}}{K_{\theta}} \sum_{p=1}^N (\ddot{\theta}_{z p}^g) \end{pmatrix} \quad (14)$$

که در آن h_1 ارتفاع طبقه‌ی اول با دیافراگم صلب سازه از تراز پایه است و سختی پیچشی کلی طبقه‌ی صلب K_{θ} ، نیز برابر با $\sum_{p=1}^N (kx_p + ky_p + k_{\theta})$ در نظر گرفته می‌شود. با فرض $k_{\theta} = GJ/h_1$ و $k = 12EI/h_1^3$ که در آن‌ها E, G, J, I به ترتیب ممان سطح حول محور x و y ، ممان قطبی سطح،

مدول برشی و مدول کشسانی هر ستون هستند و به این ترتیب با تعریف نسبت‌های $K_{\theta}/k = \sum_{p=1}^N (x_p^2 + y_p^2) + Nh_1^3/12(1+\nu)$ که به ترتیب برابر با $1/r_{k\theta}$ ، $1/r_k$ و $K_{\theta}/k_{\theta} = (12(1+\nu)/h_1^3) \cdot \sum_{p=1}^N (x_p^2 + y_p^2) + N$ هستند ν ضریب پواسون ستون است)، چگالی طیفی مؤلفه‌های شتاب شبه‌استاتیکی متناظر با رابطه‌ی ۱۴ با فرض ناهمبسته بودن مؤلفه‌های حرکتی زمین، مطابق رابطه‌ی ۱۵ محاسبه خواهند شد:

$$S^{qs}(\omega) = \begin{pmatrix} \frac{S_x^g(\omega) + h_1^3 S_{\theta_y}^g(\omega)}{N^2} A_N \\ \frac{S_y^g(\omega) + h_1^3 S_{\theta_x}^g(\omega)}{N^2} A_N \\ \left[r_k^2 \left([S_y^g(\omega) + h_1^3 S_{\theta_x}^g(\omega)] \cdot A_x \right) + [S_x^g(\omega) + h_1^3 S_{\theta_y}^g(\omega)] \cdot A_y \right] \\ + r_{k\theta}^2 S_{\theta_z}^g(\omega) A_N \end{pmatrix} \quad (15)$$

به سادگی می‌توان نشان داد که تابع تبدیل متناظر با رابطه‌ی ۱۵ مطابق رابطه‌ی ۱۶ است:

$$T^{qs}(\omega) = \begin{pmatrix} (T_x^{qs}(\omega))^T \\ (T_y^{qs}(\omega))^T \\ (T_{\theta_z}^{qs}(\omega))^T \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \frac{S_x^g(\omega)}{S_y^g(\omega)} \\ \frac{S_y^g(\omega)}{S_{\theta_z}^g(\omega)} \\ \frac{S_{\theta_z}^g(\omega)}{S_y^g(\omega)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1+h_1^3 \omega^2 r_{zx}^T(\omega)/V_A^T}{N^2} A_N \\ \frac{1+h_1^3 \omega^2 r_{zy}^T(\omega)/V_A^T}{N^2} A_N \\ \left[r_k^2 \left([1 + h_1^3 \omega^2 r_{zy}^T(\omega)/V_A^T] \cdot A_x \right) + [r_{xy}^T(\omega) + h_1^3 \omega^2 r_{zy}^T(\omega)/V_A^T] \cdot A_y \right] \\ + \frac{r_{k\theta}^2 \omega^2 (1+r_{xy}^T(\omega))}{2V_A^T} A_N \end{pmatrix} \quad (16)$$

که در آن نسبت‌های $r_{zx}(\omega)$ ، $r_{zy}(\omega)$ به ترتیب برابر با $|\ddot{u}_z^g(i\omega)|/|\ddot{u}_x^g(i\omega)|$ و $|\ddot{u}_z^g(i\omega)|/|\ddot{u}_y^g(i\omega)|$ هستند. به این ترتیب با توجه به رابطه‌ی ۱۶، تبدیل فوریه‌ی ۳ مؤلفه‌ی شتاب اولین طبقه با دیافراگم صلب سازه مطابق رابطه‌ی ۱۷ محاسبه خواهد شد:

$$\begin{pmatrix} \ddot{u}_x^{qs}(i\omega) \\ \ddot{u}_y^{qs}(i\omega) \\ \ddot{\theta}_z^{qs}(i\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x^{qs}(\omega) \cdot \ddot{u}_x^g(i\omega) \cdot e^{\pm i\psi\varphi_x^T} \\ T_y^{qs}(\omega) \cdot \ddot{u}_y^g(i\omega) \cdot e^{\pm i\psi\varphi_y^T} \\ T_{\theta_z}^{qs}(\omega) \cdot \frac{|\ddot{u}_z^g(i\omega)|}{|\ddot{\theta}_z^g(i\omega)|} \cdot \ddot{\theta}_z^g(i\omega) \cdot e^{\pm i\psi\varphi_{\theta_z}^T} \end{pmatrix} \quad (17)$$

با محاسبه‌ی معکوس تبدیل فوریه‌ی رابطه‌ی ۱۷، مجموعه‌ی پی از ۳ مؤلفه‌ی تاریخچه‌ی زمانی ورودی پی به دست می‌آید. برای محاسبه‌ی حرکت‌های ورودی طبقات دیگر

این سازه، می توان از تابع تبدیل رابطه ی ۱۸ استفاده کرد:

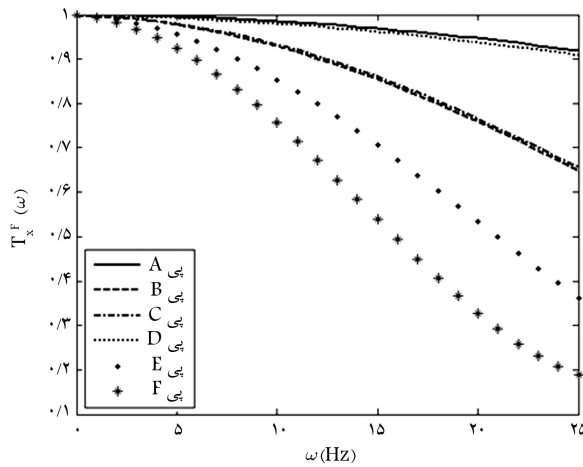
$$T_j^{qs}(\omega) = \left\{ \begin{array}{l} (T_{xj}^{qs}(\omega))^2 \\ (T_{yj}^{qs}(\omega))^2 \\ (T_{\theta zj}^{qs}(\omega))^2 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1+h_j^2 \omega^2 r_{zx}^2(\omega)/V_A^2}{1+h_j^2 \omega^2 r_{zy}^2(\omega)/V_A^2} A_N \\ \left[\begin{array}{l} r_k^2 \left([1+h_j^2 \omega^2 r_{zy}^2(\omega)/V_A^2] \cdot A_x \right. \right. \\ \left. \left. + [r_{xy}^2(\omega) + h_j^2 \omega^2 r_{zy}^2(\omega)/V_A^2] \cdot A_y \right) \right. \\ \left. \left. + \frac{r_{k\theta}^2 \omega^2 (1+r_{xy}^2(\omega))}{V_A^2} A_N \right] \right\} \quad (18)$$

در این جا $b_l = 2$ و $a_l = 5 \times 10^{-6}$ (کم ترین همگرانی) فرض شده و سرعت ظاهری برابر با $V_A = 1 - 2 \text{ Km/s}$ در نظر گرفته شده اند. همچنین از فرضیاتی به جز آنهایی که در این نوشتار در نظر گرفته شده اند، نتایج به دست آمده در ادامه می تواند متفاوت باشد.

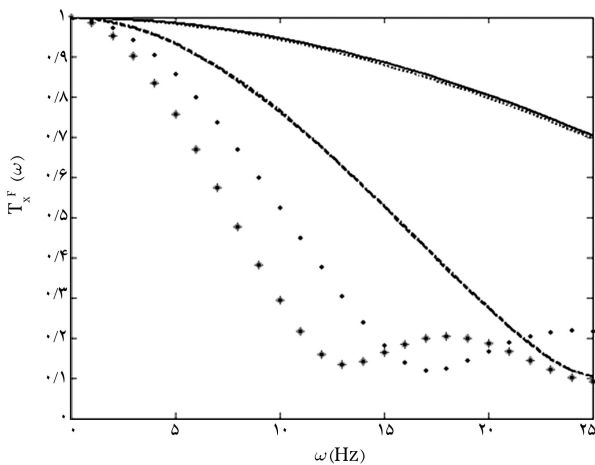
به منظور مقایسه بین ورودی های حالت سازه با پی گسترده و سازه با پی منفرد (با کلاف بندی ضعیف)، تعداد پی های منفرد برابر با تعداد مش های پی گسترده و هم مرکز با آن ها در نظر گرفته شده است (جدول ۱). همچنین برای محاسبه ی سختی فنر های زیر هر پی منفرد (مش) فرض شده است که پی ها بر روی ساختگاه با خاک نرم به مشخصات $\nu_s = 0.38$, $G = 24 \text{ Mpa}$ مستقر شده اند [۱۱] و همچنین فرض می شود ارتفاع طبقه ی اول سازه دارای طبقات با دیافراگم صلب و برابر با ۵ متر و ستون های سازه، بتنی و دارای ضریب پواسون برابر با $\nu_c = 0.2$ باشند.

۱.۳. بررسی مؤلفه ی شتاب انتقالی ورودی پی

شکل های ۲ و ۳ به ترتیب نشان دهنده ی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه ی انتقالی سیستم پی گسترده و منفرد (سازه ی دارای طبقات با دیافراگم صلب) در راستای محور x ,



الف) $V_A = 2 \text{ Km/s}$



ب) $V_A = 1 \text{ Km/s}$

شکل ۲. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه ی انتقالی سیستم پی گسترده در راستای محور x بر اساس شکل هندسی سازه در پلان.

۳. بررسی تأثیر ابعاد پی بر شتاب ورودی سازه ها

با توجه به تأثیر نوع و شکل هندسی پی بر مؤلفه های انتقالی و دورانی، در این بخش تأثیرات طول، نسبت ابعادی پی ها و جهت تحریک بر ورودی سازه ها، برای پی های با مشخصات داده شده در جدول ۱، تحت تأثیر ۶ مؤلفه ی زلزله بررسی شده اند. برای بررسی اثرات نسبت ابعادی بر ورودی پی ها، از پی های A, C, E استفاده شده است که به ترتیب دارای نسبت طول به عرض ۱، ۲، ۳ و ۴ هستند. همچنین برای بررسی اثرات طول بعد بر ورودی پی ها، ورودی پی های A و B ، و به منظور بررسی جهت انتشار امواج نیز ورودی پی های C و D با هم مقایسه شده اند. در این مطالعه محور x هم راستا با جهت اصلی انتشار امواج لرزه یی فرض شده و از تابع همگرانی در رابطه ی ۱۹، برای تخمین تغییرات مکانی حرکت زمین و همبستگی بین دو نقطه ی p و q روی سطح زمین، استفاده شده است [۱۱]:

$$\gamma_{pq}(x, y, i\omega) = |\gamma_{pq}| \exp\left(-\frac{i\omega x}{V_A}\right) = \exp\left[-\left(\alpha_1(\omega)x^2 + \alpha_2(\omega)y^2\right)\omega\right] \exp\left(-\frac{i\omega x}{V_A}\right) \quad (19)$$

که در آن $|\gamma_{pq}|$ و $\exp(-i\omega x/V_A)$ به ترتیب بیانگر فقدان همبستگی و اختلاف فاز بین دو نقطه ی p و q است و:

$$\alpha_l(\omega) = \frac{a_l}{\ln(\omega) + b_l} \quad \omega \geq 0.314 \text{ rad/s} \quad l = 1, 2 \quad (20)$$

جدول ۱. مشخصات پی های بررسی شده.

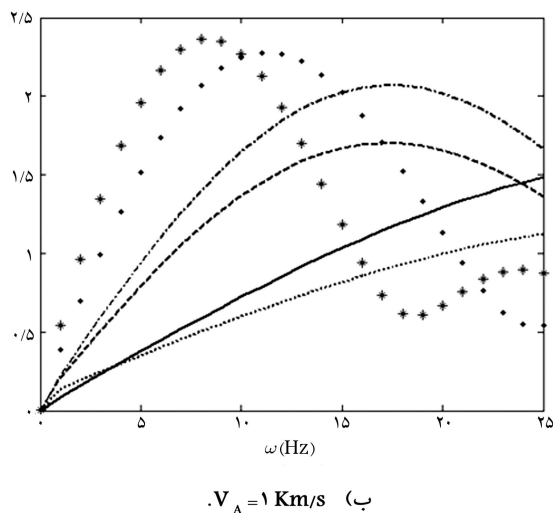
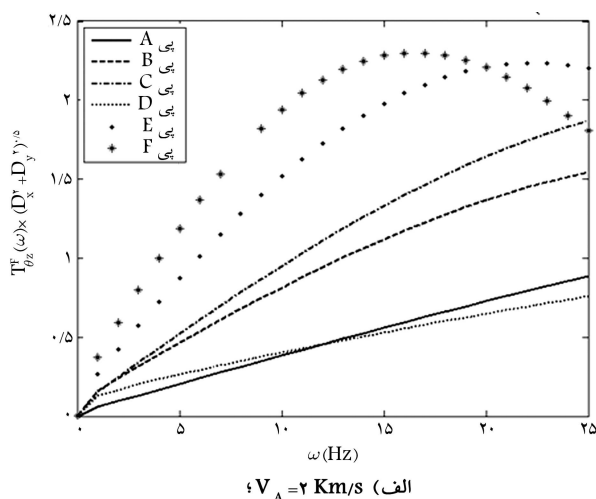
مشخصات پی ها	پی A	پی B	پی C	پی D	پی E	پی F
$D_x - m$	۲۰	۴۰	۴۰	۲۰	۶۰	۸۰
$D_y - m$	۲۰	۴۰	۲۰	۴۰	۲۰	۲۰
N_x	۲	۴	۴	۲	۶	۸
N_y	۲	۴	۲	۴	۲	۲
N	۴	۱۶	۸	۸	۱۲	۱۶

معمول و غالب بسامدی حرکت شدید زمین، مؤلفه‌های شتاب انتقالی ورودی دو نوع سیستم پی گسترده و منفرد (با دیافراگم طبقه‌ی صلب) را یکسان فرض کرد.

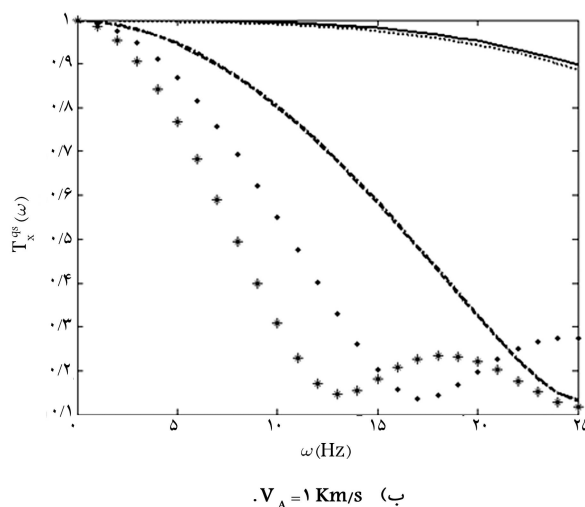
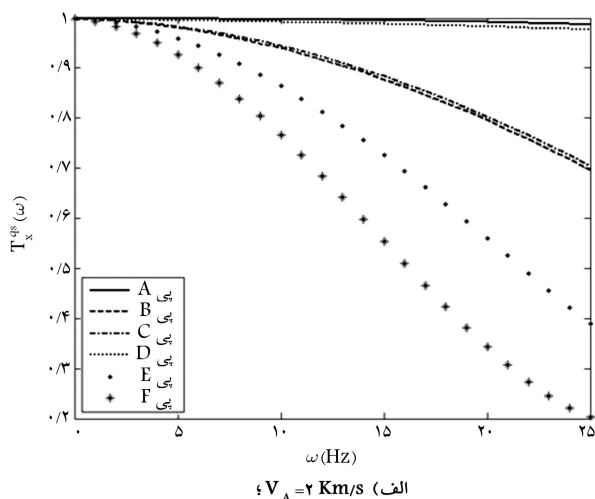
۲.۳. بررسی مؤلفه‌ی شتاب پیچشی ورودی پی

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تغییرات تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی $T_{\theta z} \cdot (D_x^I + D_y^I)^{1/2}$ ، سیستم پی گسترده و منفرد (با طبقه‌ی دارای دیافراگم صلب) در راستای محور z ، براساس شکل هندسی سازه در پلان و سرعت‌های فاز ۱ و ۲ کیلومتر بر ثانیه هستند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود رفتار کلی تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی برای هر دو نوع سیستم پی مشابه و مقادیر تابع تبدیل نرمال‌شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی متناظر با سیستم پی منفرد بیش از سیستم پی گسترده است.

همچنین با توجه به این شکل‌ها واضح است که به ازای یک سرعت ظاهری ثابت، با افزایش بسامد تحریک، پی‌هایی که طول بیشتری در جهت انتشار امواج لرزه‌یی (D_x) داشته باشند؛ سریع‌تر به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسند (مانند پی (F) و برای پی‌های با طول مساوی در جهت x مانند پی‌های B و C، هرچه



شکل ۴. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی پیچشی سیستم پی گسترده در راستای محور z براساس شکل هندسی سازه در پلان.



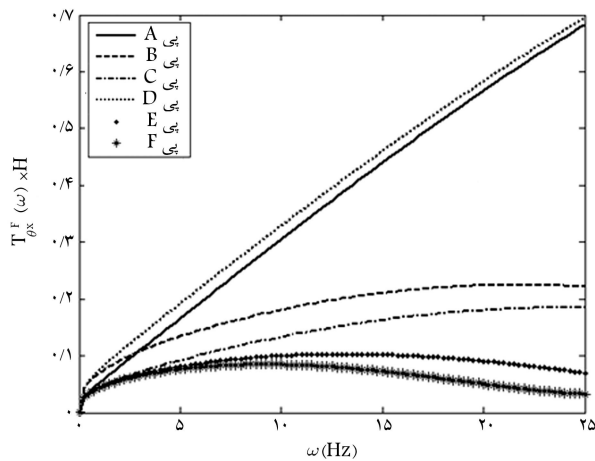
شکل ۳. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی انتقالی سیستم پی منفرد دارای طبقه‌ی اول با دیافراگم صلب در راستای محور z براساس شکل هندسی سازه در پلان.

براساس شکل هندسی سازه در پلان و سرعت‌های فاز ۱ و ۲ کیلومتر بر ثانیه هستند. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود به ازای یک سرعت ظاهری ثابت، با افزایش بسامد تحریک و بُعد پی در جهت انتشار امواج لرزه‌یی (D_x)، تابع تبدیل $T_{\theta z}$ روندی نزولی دارد. همچنین با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود هرچه بُعد پی در جهت انتشار امواج لرزه‌یی بیشتر باشد، روند کاهش سریع‌تر است و لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بُعد سازه، دامنه‌ی مؤلفه‌ی انتقالی ورودی پی با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد و مقدار این کاهش برای سیستم پی گسترده بیش از سیستم پی منفرد است.

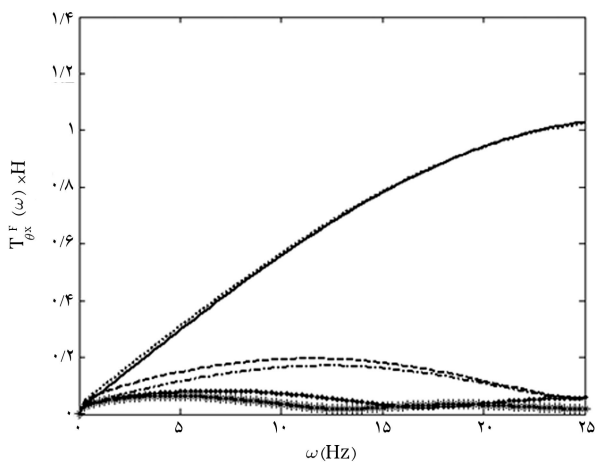
با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، اگرچه به نظر می‌رسد که برای سازه‌های با سیستم پی گسترده‌ی صلب یا سیستم پی منفرد (با دیافراگم صلب) با بُعد کمتر از ۴۰ متر، در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه لزومی ندارد، ولی برای سازه‌های با طول بُعد بیش از ۴۰ متر، در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه حائز اهمیت است و می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه سطح نیروی وارد بر این سازه‌ها شود.

همچنین چنان که مشاهده می‌شود تفاوت بین مقادیر $T_{\theta z}$ در دو نوع سیستم پی چندان قابل توجه نیست، از این رو به نظر می‌رسد که بتوان با توجه به محدودده‌ی

نرمال شده $T_{\theta x-y}(\omega) \cdot H$ سیستم پی گسترده براساس شکل هندسی پی حول محورهای x و y ، و به ازای سرعت‌های فاز ۱ و ۲ کیلومتر بر ثانیه هستند، که در آن‌ها H به منزله‌ی ارتفاع معادل سازه‌ی تعریف شده و برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که هرچه پی دارای طول بیشتری در راستای محور y و طول کمتری در راستای محور x باشد، $T_{\theta x}^F$ بزرگ‌تری خواهد داشت. از این رو همان‌طور که مشاهده می‌شود پی F کمترین و پی D بیشترین مقادیر $T_{\theta x}^F$ را دارند. این درحالی است که $T_{\theta y}^F$ برخلاف $T_{\theta x}^F$ ، چندان به تغییرات بُعد پی در جهت y حساس نیست. همچنین هرچه بُعد پی در راستای محور x بیشتر باشد، $T_{\theta y}^F$ سریع‌تر به بیشینه‌ی مقدار خود میل می‌کند و این مقدار بیشینه، از بیشترین مقدار $T_{\theta y}^F$ پی‌های با بُعد کوچک‌تر در راستای محور x ، کمتر است. همچنین با مقایسه‌ی شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که به ازای کلیه‌ی بسامدها، $T_{\theta x}^F$ همواره به صورت قابل توجهی بزرگ‌تر از $T_{\theta y}^F$ است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از بیشتر و غالب بودن تغییرات مکانی حرکت زمین در راستای محور x نسبت به محور y دانست (با فرض اینکه جهت غالب انتشار امواج لرزه‌ی در راستای محور x باشد). همچنین با مقایسه‌ی شکل ۲ با شکل‌های ۴، ۶ و ۷ مشخص می‌شود که برای سیستم پی گسترده، مؤلفه‌های دورانی ورودی پی

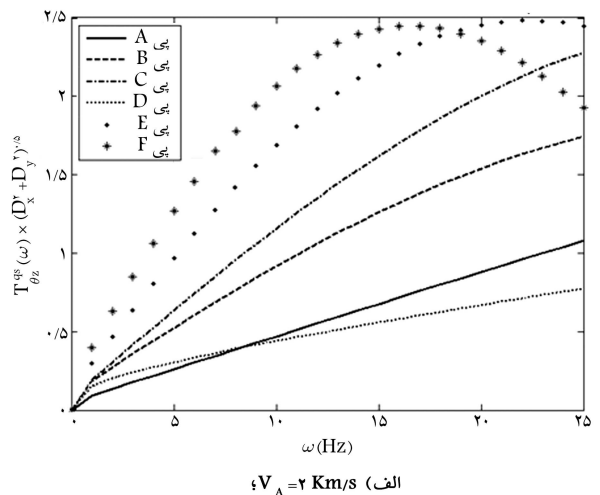


الف) $V_A = 2 \text{ Km/s}$

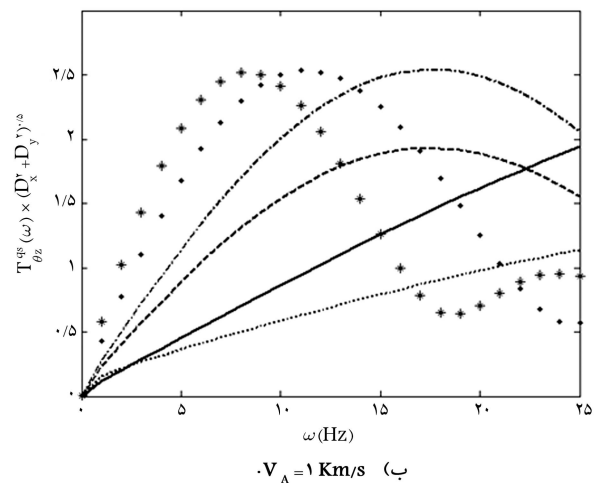


ب) $V_A = 1 \text{ Km/s}$

شکل ۶. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی گهواره‌ی سیستم پی گسترده در راستای محور x براساس شکل هندسی سازه در پلان.



الف) $V_A = 2 \text{ Km/s}$



ب) $V_A = 1 \text{ Km/s}$

شکل ۵. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی پیچشی سیستم پی منفرد دارای طبقه‌ی اول با دیافراگم صلب در راستای محور z براساس شکل هندسی سازه در پلان.

طول پی در جهت عمود بر راستای غالب انتشار امواج لرزه‌ی (D_y) کمتر باشد، بیشینه‌ی مقدار تابع تبدیل نرمال شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی بیشتر خواهد بود. با این حال، به طور کلی حساسیت تابع تبدیل نرمال شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی به تغییرات بُعد پی در راستای محور x بیش از محور y است که دلیل آن ناشی از بیشتر بودن تغییرات مکانی حرکت زمین در راستای محور x نسبت به محور y است. با مقایسه‌ی تابع تبدیل نرمال شده در شکل‌های ۴ و ۵ به ازای مقادیر متفاوت سرعت فاز مشاهده می‌شود که با کاهش سرعت فاز، بیشینه‌ی مقدار تابع تبدیل نرمال شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی به سمت بسامدهای کوچک‌تر انتقال می‌یابد. از این رفتار تابع تبدیل و وابستگی آن به سرعت فاز، نتیجه‌ی مهم حاصل می‌شود و آن این است که نمی‌توان فقط براساس طول بُعد پی یک سازه، نحوه‌ی رفتار تابع تبدیل آن را پیش‌بینی کرد و این واقعیت ناشی از وابستگی بسامدی قابل توجه تابع تبدیل نرمال شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی به سرعت فاز متناظر با تحریک لرزه‌ی است. از این رو بدون مشخص بودن تحریک لرزه‌ی یک سازه، نمی‌توان نحوه‌ی تأثیرگذاری تابع تبدیل مؤلفه‌ی پیچشی متناظر با پی را بر بسامدهای مختلف تحریک لرزه‌ی ورودی برآورد کرد.

۳.۳. بررسی مؤلفه‌ی شتاب گهواره‌ی ورودی پی

شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌های گهواره‌ی

کامل اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه برای تعیین مؤلفه‌های دورانی ورودی پی‌ها الزامی است.

۴. نتیجه‌گیری

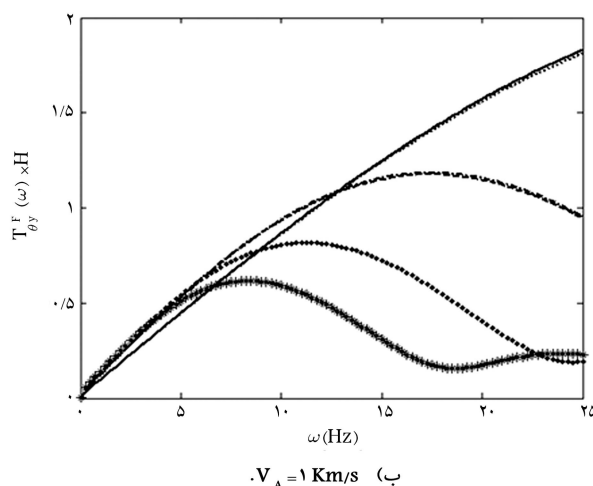
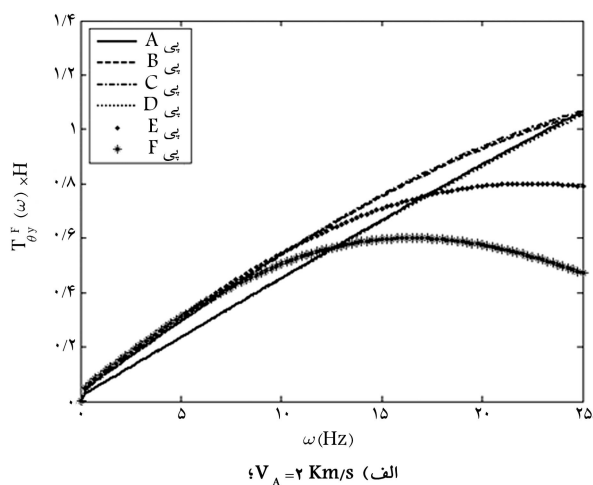
هدف نوشتار حاضر ارائه‌ی رویکردی برای تعیین تحریک لرزه‌ی پی‌ها با در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه است. از این رو، روشی برای در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه برای تعیین کلیه‌ی مؤلفه‌های ورودی دو نوع سیستم پی (گسترده و منفرد)، به صورت بسامدی و تاریخچه‌ی زمانی ارائه شد. با استفاده از روابط به دست آمده، تأثیرات شکل هندسی و نوع سیستم پی‌ها در تغییر مؤلفه‌های دورانی و انتقالی ورودی پی‌ها بررسی و ارزیابی شدند. برای سیستم پی منفرد دو حالت رفتاری در نظر گرفته و فرض شد در صورتی که پی‌های منفرد با کلاف‌بندی مناسب و قوی به هم متصل شده باشند، رفتار سینماتیک مشابه پی گسترده دارند. همچنین بحثی روی تحریک ورودی سازه‌های مستقر بر روی سیستم پی منفرد با کلاف‌بندی ضعیف، ارائه شد. اهم نتایج این تحقیق با توجه به فرضیات انجام شده عبارتند از:

الف) به طور کلی در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های انتقالی ورودی سازه‌های پی گسترده و یا دارای طبقه‌ی اول صلب به ابعاد بزرگ‌تر از ۴۰ متر، باعث کاهش قابل توجه مؤلفه‌های انتقالی ورودی سازه و نتیجتاً کاهش نیروهای طراحی سازه می‌شود.

ب) با افزایش بُعد پی و کاهش سرعت فاز متناظر با انتشار امواج لرزه‌ی پی، مؤلفه‌های انتقالی ورودی پی کاهش می‌یابند. این کاهش برای سازه‌های پی گسترده و یا دارای طبقه‌ی اول صلب به ابعاد بزرگ‌تر از ۴۰ متر، قابل توجه است. از این رو در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه منجر به طراحی بهینه‌ی سازه‌هایی همچون سدها یا سازه‌ی راکتور هسته‌ی می‌شود.

ج) مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی ورودی سازه دارای طبقات با دیافراگم صلب که سیستم پی آن منفرد است، را می‌توان به طور تقریبی برابر با مؤلفه‌های انتقالی و پیچشی ورودی سازه پی گسترده‌ی صلب، به شرطی که ابعاد پلان دو سازه یکسان باشد، برابر فرض کرد.

د) مؤلفه‌های دورانی ورودی پی بیش از مؤلفه‌های انتقالی متناظر به شکل هندسی و سرعت فاز متناظر با مؤلفه‌های تحریک لرزه‌ی وابسته است و پیش‌بینی بزرگی مؤلفه‌های دورانی ورودی پی‌ها فقط براساس ابعاد پی و بدون در نظر گرفتن کامل اثرات برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه، برخلاف مؤلفه‌های انتقالی متناظر ممکن نیست.



شکل ۷. بررسی تغییرات تابع تبدیل مؤلفه‌ی گهواره‌ی سیستم پی گسترده در راستای محور y براساس شکل هندسی سازه در پلان.

بیش از مؤلفه‌های انتقالی ورودی متناظر به شکل هندسی پی وابسته هستند که دلیل این امر را می‌توان با توجه به رفتار غیریک‌توخت تابع‌های تبدیل مؤلفه‌های دورانی در مقایسه با تابع تبدیل مؤلفه‌ی انتقالی متناظر توجیه کرد. نکته‌ی حائز اهمیت دیگر این است که تابع‌های تبدیل مؤلفه‌های گهواره‌ی زلزله مشابه تابع تبدیل نرمال شده‌ی مؤلفه‌ی پیچشی زلزله، کاملاً به تغییرات سرعت فاز وابسته است و پیش‌بینی رفتار آن‌ها بدون توجه به سرعت فاز متناظر با مؤلفه‌های تحریک لرزه‌ی پی ورودی، ممکن نیست. در نظر گرفتن این مسئله در کنار توجه به بیشتر بودن محتوای بسامدی مؤلفه‌های دورانی نسبت به مؤلفه‌های انتقالی نشان می‌دهد که در نظر گرفتن

منابع (References)

- Li, B.; Al-Bermani, F.G.A. and Kitipornchai, S. "Maximum response of asymmetric structures subject to a multicomponent earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**, pp. 1047-1066 (1993).
- Veletsos, A.S.; Prasad, A.M. and Wu, W.H. "Trans-

fer functions for rigid rectangular foundations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**, pp. 5-17 (1997).

- Sarma, S.K. and Srbulov, M. "A simplified method for prediction of kinematic soil-foundation interaction effects on peak horizontal acceleration of a rigid foundation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**, pp. 815-836 (1996).

4. Hadid, M. and Berrah, M.K. "Structural response for stochastic kinematic interaction ", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**, pp. 97-114 (2001).
5. Kim, S. and Stewart, J.P. "Kinematic soil-structure interaction from strong motion recordings", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **129**, pp. 323-335 (2003).
6. Lin, Y.Y., *Kinematic Soil-Structure Interaction Effects on Maximum Inelastic Displacement Demands of SDOF System*, The 14th WCEE, Beijing China (2008).
7. Aviles, J.; Suarez, M. and Sanchez-Sesma, F.J. "Effects of wave passage on the relevant dynamic properties of structures with flexible foundation ", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**, pp. 139-159 (2002).
8. Stewart, J.P.; Kim, S.; Beilak, J.; Dobry, R. and Power, S.M. "Revisions to soil-structure interaction procedures in NEHRP design provision", *Earthquake Spectra*, **19**, pp. 677-696 (2003).
9. Ghafory-Ashtiany, M. and Singh, M.P. "Structural response for six correlated earthquake components", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, pp. 103-119 (1986).
10. Hao, H. "Characteristics of torsional ground motions ", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**, pp. 599-610 (1996).
11. Pais, A. and Kausel, E. "Approximate formulas for dynamic stiffnesses of rigid foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **7**, pp. 213-227 (1988).

EVALUATION OF THE EFFECTS OF KINEMATIC SOIL STRUCTURE INTERACTION ON SEISMIC LOADING OF STRUCTURES PART II: FOUNDATION INPUT MOTIONS

M. R. Falamarz-Sheikhabadi

m.falamarz@gmail.com

M. Ghafory-Ashtiany*

mohsen.ashtiany@gmail.com

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology Tehran

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 28, Issue 2, Page 35-43, Original Article

© Sharif University of Technology

Abstract

As seismic waves pass through foundations, high frequency waves of free-field motions will be filtered by them. To obtain these filtered motions, called foundation input motions (FIMs), the effects of kinematic interaction between the foundation and surrounding medium, due to the spatial variation of earthquake ground motion (SVEGM), should be considered. For the structures supported on the large mat foundations, considering the effects of kinematic soil structure interaction may lead to filtering of the high-frequency components of the translational response and significant rotational

motions. Therefore, the contribution of rotational components may be detrimental in the seismic response of structures, such as vertically irregular structures, short-period (stiff) structures such as nuclear reactors, and even secondary systems or equipment mounted on structures that are sensitive to high frequency components of motion.

The main objective of this paper is to present a new procedure for evaluating all six input components of structures supported on two foundation systems: rigid mat and single foundations. To achieve this objective, at first, the transfer functions of foundation input motions are derived. Then, a parametric study is performed on the rigid mat foundation system, in order to estimate the effects of the geometrical shape of such a foundation system on the foundation input motion. Moreover, a numerical study is performed on the two different foundation systems; mat and single, in order to compare relations between input rotational and translational components in the structural loading. The results imply that the input translational and torsional accelerations of structures with rigid floor diaphragms, which are supported on the single foundation system, are approximately equal to the same structures with rigid mat foundation systems.

Key Words: rotational components, phase velocity, principal axes, coherency, kinematic interaction.

* corresponding author

Received 1 March 2010; received in revised form 10 October 2010; accepted 10 November 2010