

# بررسی آثار برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه در بارگذاری لرزه‌یی سازه‌ها بخش اول: الگوهای بارگذاری لرزه‌یی سازه‌ها

محسن غفوری آشتیانی\* (استاد)

محمدرضا فلاه‌ز شیخ آبادی (کارشناس ارشد)  
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف  
دوره ۲-۱۳۸۲، شماره ۲، ص. ۳۴-۲۷

در این نوشتار الگوهای بارگذاری لرزه‌یی سازه‌های مهندسی ناشی از تغییرات مکانی حرکت زمین با در نظر گرفتن آثار مؤلفه‌های دورانی زلزله تعیین شده است. برای این منظور ابتدا روش‌های رایج محاسبه‌ی مؤلفه‌های دورانی در میدان آزاد بررسی و سپس با اصلاح تابع چگالی طیفی کانائی-تاجیمی رابطه‌ی جدیدی برای تعیین چگالی طیفی مؤلفه‌های دورانی از طریق مؤلفه‌های انتقالی متناظر ارائه می‌شود. سپس الگویی برای تعیین تغییرات مکانی حرکت نقاط مختلف روی سطح زمین ناشی از تحریکات لرزه‌یی، به صورت تاریخچه‌ی زمانی ارائه شده است. از الگوی ارائه شده می‌توان به منظور بارگذاری لرزه‌یی سازه‌های چند تکیه‌گاهی مانند پل‌ها استفاده کرد. همچنین از الگوی به دست آمده، برای لحاظ کردن آثار برهم‌کنش سینماتیک در تعیین مؤلفه‌های دورانی و انتقالی ورودی پی‌های گسترده‌ی صلب استفاده شده است. نتایج عددی تحقیق حاضر نشان می‌دهند که لحاظ نکردن اثرات برهم‌کنش سینماتیک در تحریک لرزه‌یی سازه‌های گسترده، می‌تواند منجر به بارگذاری نایمن آن‌ها شود.

واژگان کلیدی: مؤلفه‌های دورانی، سرعت فاز، محورهای اصلی، تأخیر فاز، همگرایی، تحریکات چند تکیه‌گاهی.

## مقدمه

شتاب‌نگاشتی و عدم قطعیت‌های موجود در نحوه‌ی محاسبه‌ی سرعت فاز افقی امواج لرزه‌یی و مشخص نبودن درصد مشارکت امواج حجمی و سطحی زلزله در ایجاد مؤلفه‌های دورانی، درک صحیحی از تأثیر آن‌ها بر رفتار سازه‌ها به دست نیامده است و یا منجر به نتیجه‌گیری‌های قابل بحث از میزان تأثیر مؤلفه‌های دورانی شده است. از طرفی امروزه در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله براساس تجربیات زلزله‌های گذشته فقط آثار مؤلفه‌های انتقالی زلزله برای طراحی ایمن سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود و این در حالی است که تحقیقات انجام شده تا به امروز به اثبات رسانده است که چنین فرضی در بارگذاری سازه‌هایی همچون پل‌ها،<sup>[۷]</sup> برج‌های لاغر نظیر برج‌های تلوویزیون و دودکش‌ها،<sup>[۸]</sup> سازه‌ی راکتور هسته‌یی،<sup>[۹]</sup> و یا حتی در صورت ارضای شرایط خاصی در طراحی سازه‌های چندطبقه‌ی شهری رایج،<sup>[۴،۳]</sup> کاملاً غیرمحافظة‌کارانه است و لحاظ نکردن مؤلفه‌های دورانی زلزله در بارگذاری لرزه‌یی سازه‌ها می‌تواند به منزله‌ی نقطه ضعف اصلی طراحی سازه‌های مدرن امروزی محسوب شود. تغییرات مکانی حرکت زمین علاوه بر القا مؤلفه‌های دورانی زلزله در پایه‌ی سازه‌ها، می‌تواند منجر به تحریکات چند تکیه‌گاهی سازه‌ها نیز بشود. هنگامی که فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌های سازه‌ها کم باشد، همچون ساختمان‌های متعارف شهری، معمولاً می‌توان از آثار تحریک چندتکیه‌گاهی سازه‌ها صرف‌نظر کرد، لیکن

اگرچه پیشرفت برنامه‌های رایانه‌یی تحلیل سازه‌ها بر مبنای روش‌های اجزای محدود، منجر به مدل کردن ساده و دقیق‌تر سازه‌ها نسبت به گذشته و در نتیجه افزایش شناخت قابل توجه پژوهشگران از رفتار دینامیک سازه‌های خاص با هندسه‌های پیچیده شده است، با این حال چگونگی بارگذاری لرزه‌یی چنین سازه‌هایی هنوز پیچیده است و نیاز به مطالعات بیشتری برای شناخت واقع‌بینانه‌ی رفتار سازه‌های خاص طی زلزله‌های شدید احساس می‌شود. با توجه به اینکه حرکت‌های متغیر زمین باعث برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه می‌شوند و منجر به تولید حرکت‌های دورانی، تحریکات چند تکیه‌گاهی، و تغییر مؤلفه‌های حرکتی ورودی پی‌ها نسبت به مؤلفه‌های حرکتی زمین در میدان آزاد می‌شوند، در این مطالعه تلاش خواهد شد تا روابطی برای بارگذاری لرزه‌یی سازه‌ها تحت این تحریکات ارائه شود.

محققان بسیاری تأثیر بارگذاری مؤلفه‌های دورانی زلزله بر رفتار سازه‌ها را از سال ۱۹۶۹ تا به امروز بررسی و ارزیابی کرده‌اند،<sup>[۱-۶]</sup> لیکن به دلیل کمبود اطلاعات

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۱۰، اصلاحیه ۱۳۸۹/۷/۱۸، پذیرش ۱۳۸۹/۸/۱۹.

بر روی سطح زمین ( $z = 0$ )، با فرض  $\partial u_z / \partial z = 0$  خواهد شد:

$$GU = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) & \frac{\partial u_y}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) & -\frac{\partial u_z}{\partial x} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) & 0 & -\frac{\partial u_z}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} & \frac{\partial u_z}{\partial y} & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

قسمت قرینه‌ی گرادیان بردار جابجایی، تانسور کرنش ( $\varepsilon$ ) در تغییرشکل‌ها و تغییرمکان‌های کوچک است و قسمت ضد قرینه‌ی گرادیان بردار جابجایی مربوط به تغییرشکل‌های چرخشی است و تانسور چرخش ( $\varphi$ ) نامیده می‌شود ( $GU = \varepsilon + \varphi$ ). با توجه به این اصل بردار تغییرشکل‌های چرخشی (بردار مؤلفه‌های دورانی) یک نقطه از سطح زمین طبق رابطه‌ی ۳ برابر خواهد شد با:

$$\theta(x, y, t) = \frac{\partial u_z}{\partial y} \vec{i} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \vec{j} + \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (3)$$

از این رو با مشخص‌بودن مؤلفه‌های انتقالی زلزله، با توجه به رابطه‌ی ۳، مؤلفه‌های دورانی زلزله در سطح زمین قابل محاسبه خواهند بود و به این ترتیب در صورتی‌که شتاب مؤلفه‌های انتقالی زلزله (رابطه‌ی ۴)، با صرف‌نظر از مشارکت امواج سطحی زلزله و براساس مشارکت امواج حجمی زلزله برابر باشند با:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_x &= \sum_{j=1}^N \left( \ddot{u}_{xj}^P + \ddot{u}_{xj}^{SV} + \ddot{u}_{xj}^{SH} \right) \\ \ddot{u}_y &= \sum_{j=1}^N \left( \ddot{u}_{yj}^P + \ddot{u}_{yj}^{SV} + \ddot{u}_{yj}^{SH} \right) \\ \ddot{u}_z &= \sum_{j=1}^N \left( \ddot{u}_{zj}^P + \ddot{u}_{zj}^{SV} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن بالاتویس‌های  $P$ ،  $SH$  و  $SV$  نشان‌دهنده‌ی نوع موج لرزه‌ی‌اند. با این فرض که سرعت فاز امواج برشی  $SH$  و  $SV$  با هم برابر باشند، شتاب مؤلفه‌های دورانی زلزله با استفاده از رابطه‌ی ۳ مطابق رابطه‌ی ۵ خواهد شد: [۳]

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_x &= \frac{\partial \ddot{u}_z}{\partial y} \Big|_{z=0} = - \sum_{j=1}^N i\omega_j \left( \frac{\ddot{u}_{zj}^P}{V_y^P(\omega_j)} + \frac{\ddot{u}_{zj}^{SV}}{V_y^S(\omega_j)} \right) \\ \ddot{\theta}_y &= - \frac{\partial \ddot{u}_z}{\partial x} \Big|_{z=0} = \sum_{j=1}^N i\omega_j \left( \frac{\ddot{u}_{zj}^P}{V_x^P(\omega_j)} + \frac{\ddot{u}_{zj}^{SV}}{V_x^S(\omega_j)} \right) \\ \ddot{\theta}_z &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\partial \ddot{u}_y}{\partial x} - \frac{\partial \ddot{u}_x}{\partial y} \right) \Big|_{z=0} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{j=1}^N i\omega_j \\ &\quad \left( \left[ \frac{\ddot{u}_{yj}^P}{V_y^P(\omega_j)} - \frac{\ddot{u}_{xj}^P}{V_x^P(\omega_j)} \right] + \left[ \frac{\ddot{u}_{yj}^{SV}}{V_y^S(\omega_j)} - \frac{\ddot{u}_{xj}^{SV}}{V_x^S(\omega_j)} \right] \right) \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن  $V_x(\omega) = \omega / \kappa_x$  و  $V_y(\omega) = \omega / \kappa_y$ ، به ترتیب سرعت‌های فاز در جهات  $x$  و  $y$  امواج لرزه‌ی و بالاتویس  $S$  نشان‌دهنده‌ی موج برشی است. برای ساده‌سازی رابطه‌ی ۵، با توجه به اینکه درصد مشارکت امواج فشاری زلزله در مقایسه

تجربه‌ی زلزله‌های گذشته همچون نورث ریج<sup>۱</sup> (۱۹۹۴) و کوبه<sup>۲</sup> (۱۹۹۵) نشان داده است که برای سازه‌هایی نظیر پل‌ها و خطوط لوله، حرکت‌های متغیر زمین می‌توانند باعث القای نیرو و تغییرشکل‌های داخلی در چنین سازه‌هایی شوند که نیاز است تا اثر آن‌ها در طراحی لرزه‌ی سازه مدنظر قرارگیرد. گرچه در طی سال‌های گذشته، روش‌های متعددی برای بارگذاری لرزه‌ی سازه‌های چند تکیه‌گاهی بر پایه‌ی اصول ارتعاشات تصادفی پیشنهاد شده است، [۱۰-۱۲] با وجود این، همه‌ی این روش‌ها ایرادی مشترک دارند و آن استفاده‌ی از آن‌ها فقط برای بررسی رفتار دینامیک سازه‌های چند تکیه‌گاهی در محدوده‌ی بسامد است. در این تحقیق تلاش خواهد شد تا الگوی بارگذاری ارائه شود که با استفاده از آن بتوان به‌سادگی از روش‌های تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی رایج برای تحلیل رفتار سازه‌های چند تکیه‌گاهی تحت تحریکات لرزه‌ی استفاده کرد.

حرکت‌های متغیر نقاط مختلف سطح زمین باعث می‌شوند در صورتی‌که سازه‌ی با یک پی صلب بر روی سطح زمین ساخته شود، به دلیل صلبیت پی نسبت به خاک مجاورش و عدم قابلیت تطابق خاک زیر پی با حرکت میدان آزاد، پی سازه میانگینی از حرکت میدان آزاد خاک را تجربه خواهد کرد که این حرکت، «حرکت ورودی پی» نام دارد. [۱۳-۱۵] طیف مؤلفه‌های حرکت انتقالی ورودی پی‌های گسترده در بسامدهای بالا معمولاً نسبت به طیف مؤلفه‌های حرکت انتقالی زمین در میدان آزاد دارای غنای بسامدی کمتری است و این امر می‌تواند باعث ایجاد تفاوت قابل توجه نقش رفتار سینماتیک پی‌های صلب در بارگذاری لرزه‌ی سازه‌های سخت، و کاهش (یا افزایش) سطح نیروهای لرزه‌ی وارد بر آن‌ها شود. لحاظ‌نکردن این تغییر در بارگذاری لرزه‌ی می‌تواند منجر به تحلیل غیر واقع‌گرایانه و یا ناایمن چنین سازه‌هایی شود.

در تحقیق حاضر، ابتدا با اصلاح تابع چگالی طیفی کائانی-تاجیمی، رابطه‌ی برای تعیین چگالی طیفی مؤلفه‌های دورانی زلزله در شرایط نزدیک گسل ارائه شده است. سپس با استفاده از اصول ارتعاشات تصادفی رابطه‌ی برای تعیین مؤلفه‌های حرکتی نقاط مختلف روی سطح زمین در هنگام وقوع زلزله ارائه می‌شود. به این ترتیب می‌توان از روابط ارائه‌شده در این مطالعه برای بارگذاری تاریخیچه‌ی زمانی سازه‌های چند تکیه‌گاهی تحت تحریکات لرزه‌ی استفاده کرد. در پایان با در نظر گرفتن آثار برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه، روشی برای تعیین مؤلفه‌های حرکتی ورودی پی‌های گسترده‌ی صلب ارائه شده است.

## مؤلفه‌های دورانی متناظر با یک نقطه از سطح زمین

بردار جابجایی حرکت لرزه‌ی زمین در راستای محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  (در دستگاه مختصات کارتزین) را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱ نشان داد:

$$U(x, y, z, t) = u_x(\kappa_x x + \kappa_y y + \kappa_z z - i\omega t) \vec{i} + u_y(\kappa_x x + \kappa_y y + \kappa_z z - i\omega t) \vec{j} + u_z(\kappa_x x + \kappa_y y + \kappa_z z - i\omega t) \vec{k} \quad (1)$$

که در آن  $\kappa_z$  عدد موج در راستای جهت  $z$ ، و  $\kappa_x$  و  $\kappa_y$  بیان‌گر بسامد حرکت است. با توجه به اینکه دوران به بردار جابجایی ربط دارد، گرادیان بردار جابجایی ( $GU$ ) از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید که یک تانسور مرتبه‌ی دوم است و در حالت کلی قرینه نیست و می‌توان آن را به دو تانسور قرینه و ضد قرینه تجزیه کرد. از این رو در صورتی‌که دستگاه مختصات کارتزین بر روی سطح زمین تعریف شود، گرادیان بردار جابجایی

$$S_{\theta_y}^g(\omega) = \omega^2 \frac{S_z^g(\omega)}{V_A^2}$$

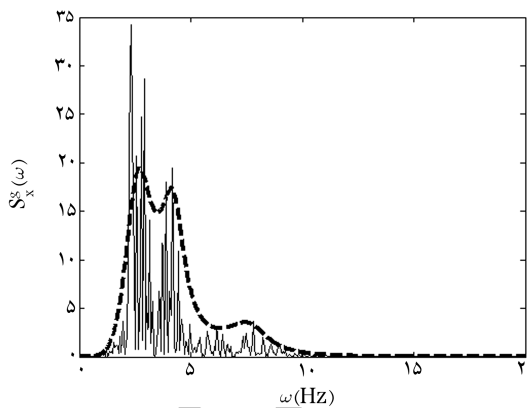
$$S_{\theta_z}^g(\omega) = \frac{\omega^2}{4V_A^2} (S_x^g(\omega) + S_y^g(\omega)) \quad (9)$$

همچنین برای محاسبه‌ی چگالی طیفی سازگار شده‌ی شتاب مؤلفه‌های انتقالی زلزله از رابطه‌ی ۱۰ که از ضرب چگالی طیفی کانائی - تاجیمی اصلاح شده،<sup>[۱۱]</sup> در فیلتر  $\exp\left[-\frac{(\omega/\omega_N)^2}{2(1+\xi_N)^2}\right]$  (عبارت سوم) به دست آمده است، استفاده می‌شود.

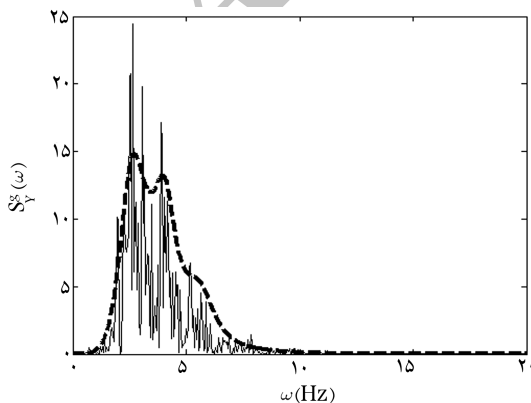
$$S_{\theta_x}^g(\omega) = \frac{(\omega/\omega_g)^2}{\left[1 - (\omega/\omega_g)^2\right]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} \times \sum_{f=1}^N \frac{1 + 4\xi_f^2(\omega/\omega_f)^2 S_f}{\left[1 - (\omega/\omega_f)^2\right]^2 + 4\xi_f^2(\omega/\omega_f)^2} \times \exp\left[-\frac{(\omega/\omega_N)^2}{2(1+\xi_N)^2}\right] \quad (10)$$

ثابت‌های تابع چگالی طیفی کانائی - تاجیمی اصلاح شده در فرم قراردادی خود نشان داده شده‌اند. عبارت سوم رابطه‌ی ۱۰، برای اصلاح بخش انتهایی (ناحیه‌ی بسامدهای بالای چگالی طیفی) تابع چگالی طیفی کانائی - تاجیمی اضافه شده است که در آن  $\omega_N$  و  $\xi_N$  بسامد و میرایی متناسب با بزرگ‌ترین بسامد غالب ساختگاه ( $f = N$ ) متناظر با تابع چگالی طیفی کانائی - تاجیمی هستند.

برای بررسی دقت و عملکرد رابطه‌ی ۹، از نگاشت‌های واقعی لرزه‌ی رخ داده در سال ۲۰۰۷ و ثبت شده در ایستگاه HACC از شبکه‌ی شتاب‌نگاری HGS، استفاده شده است. شکل‌های ۱ الی ۳ چگالی طیفی شتاب واقعی و سازگار شده



شکل ۱. چگالی طیفی شتاب مؤلفه‌ی افقی زلزله در راستای محور x.



شکل ۲. چگالی طیفی شتاب مؤلفه‌ی افقی زلزله در راستای محور y.

با امواج برشی در مؤلفه‌ی شتاب دورانی چندان قابل توجه نیست،<sup>[۱۸-۱۶]</sup> و از طرفی سرعت فاز متناظر با امواج برشی زلزله نیز کوچک تر از امواج فشاری است، می‌توان به طور محافظه‌کارانه سرعت فاز امواج فشاری زلزله را برابر با سرعت فاز امواج برشی زلزله فرض کرد. به این ترتیب رابطه‌ی ۵ به صورت رابطه‌ی ۶ ساده خواهد شد:

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_x &= -i\omega \frac{\ddot{u}_z}{V_y^S(\omega)} \\ \ddot{\theta}_y &= i\omega \frac{\ddot{u}_z}{V_x^S(\omega)} \\ \ddot{\theta}_z &= i\frac{\omega}{V} \left( \frac{\ddot{u}_x}{V_y^S(\omega)} - \frac{\ddot{u}_y}{V_x^S(\omega)} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

برای ساده‌سازی رابطه‌ی ۶ دو روش پیشنهاد شده است که در هر دو روش منبع لرزه‌ی به صورت نقطه‌ی غیرمتحرک فرض شده است (شرایط دور از گسل). در روش اول فرض شده است که امواج لرزه‌ی در یک جهت مشخص مثلاً در راستای محور x منتشر شوند،<sup>[۱۲]</sup> که با این فرض رابطه‌ی ۶ به صورت رابطه‌ی ۷ ساده خواهد شد:

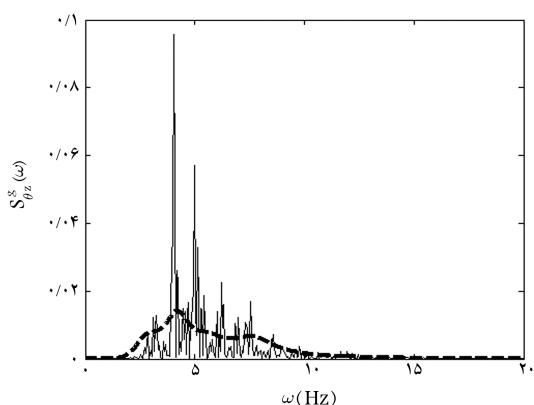
$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_x &= 0 \\ \ddot{\theta}_y &= i\omega \frac{\ddot{u}_z}{V_x^S(\omega)} \\ \ddot{\theta}_z &= -i\omega \frac{\ddot{u}_y}{2V_x^S(\omega)} \end{aligned} \quad (7)$$

بازرترین نقص رابطه‌ی ۷، صفر شدن مؤلفه‌ی شتاب  $\ddot{\theta}_x$  است. در واقع، به دلیل اینکه شتاب در نواحی نزدیک گسل ثبت می‌شود و در این نواحی امواج در تمام جهات منتشر می‌شوند، مؤلفه‌ی شتاب  $\ddot{\theta}_x$  صفر نبوده و به این ترتیب نمی‌توان از رابطه‌ی ۷ برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های شتاب دورانی زلزله استفاده کرد. برای حل این مشکل، محققان فرض کردند در شرایط نزدیک گسل سرعت‌های فاز  $V_x^S(\omega)$ ،  $V_y^S(\omega)$  برابر هم هستند، همچنین برای ساده‌سازی بیشتر رابطه‌ی ۶ فرض کردند که به ازای کلیه‌ی بسامدها، سرعت‌های فاز برابر با یک مقدار ثابت  $V_A$  (یک سرعت فاز معادل) باشند و به این ترتیب رابطه‌ی ساده‌ی (رابطه‌ی ۸) برای محاسبه‌ی شتاب مؤلفه‌های دورانی زلزله به دست آوردند:<sup>[۱۳]</sup>

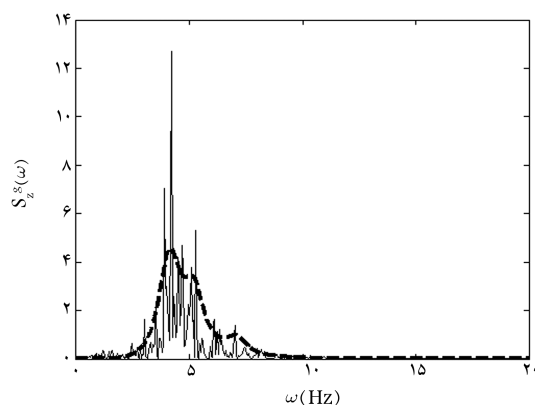
$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_x &= \frac{\ddot{u}_z}{V_A} \\ \ddot{\theta}_y &= -\frac{\ddot{u}_z}{V_A} \\ \ddot{\theta}_z &= \frac{\ddot{u}_y - \ddot{u}_x}{2V_A} \end{aligned} \quad (8)$$

اگرچه رابطه‌ی ۸ فرم ظاهری ساده‌تری نسبت به رابطه‌ی ۷ داشت، با این حال یک ایراد عمده در آن مستتر بود که آن فرض استقلال سرعت فاز از بسامد است، و بازترین تأثیر آن بر رابطه‌ی ۸، مساوی شدن اندازه‌ی مؤلفه‌های  $\ddot{\theta}_x$  و  $\ddot{\theta}_y$  است. به این ترتیب اگرچه به نظر نمی‌رسد که با رابطه‌ی ۸ نیز بتوان با دقت قابل قبولی مؤلفه‌های دورانی زلزله را به صورت تاریخچه‌ی زمانی محاسبه کرد، با وجود این محاسبه‌ی چگالی طیفی این مؤلفه‌ها با استفاده از این رابطه با توجه به مفهوم میانگین‌گیری و رویکرد بسامدی تابع چگالی طیفی می‌تواند روشی قابل قبول باشد. برای بررسی این فرضیه ابتدا چگالی طیفی متناظر با رابطه‌ی ۸، با این فرض که محورهای x، y و z محورهای اصلی تحریک باشند، مطابق رابطه‌ی ۹ محاسبه شده است:

$$S_{\theta_x}^g(\omega) = \omega^2 \frac{S_z^g(\omega)}{V_A^2}$$



شکل ۶. چگالی طیفی شتاب مؤلفه‌ی پیچشی زلزله.



شکل ۳. چگالی طیفی شتاب مؤلفه‌ی قائم زلزله.

تعیین چگالی طیفی مصنوعی شتاب مؤلفه‌های دورانی زلزله است. همچنین با مقایسه‌ی شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که فرض آشتیانی-سینگ مبنی بر ثابت فرض کردن سرعت فاز، نسبت به فرض انتشار یک جهته‌ی امواج لرزه‌یی که باعث صفر شدن مؤلفه‌ی  $\theta_z$  می‌شود، فرض قابل قبول‌تری در شرایط نزدیک گسل است. از این رو می‌توان از رابطه‌ی ۹ با دقت قابل قبولی برای بارگذاری دورانی سازه‌ها استفاده کرد.

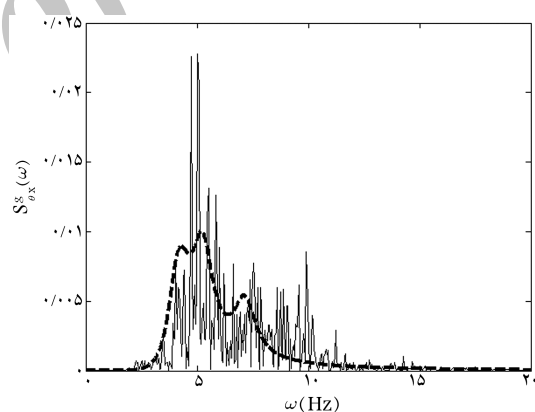
(با استفاده از رابطه‌ی ۱۰) مؤلفه‌های انتقالی زلزله را نشان می‌دهند. پس از محاسبه‌ی چگالی طیفی‌های مؤلفه‌های انتقالی سازگار شده، به منظور بررسی صحت رابطه‌ی ۹، چگالی طیفی مصنوعی شتاب مؤلفه‌های دورانی زلزله به ازای  $V_A$  برابر با  $0.6 \text{ Km/s}$  با استفاده از این رابطه محاسبه شده و مقایسه‌یی بین چگالی طیفی واقعی و مصنوعی مؤلفه‌های دورانی زلزله انجام گرفته است. شکل‌های ۴ الی ۶ چگالی طیفی شتاب واقعی و مصنوعی مؤلفه‌های دورانی زلزله را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با انتخاب فقط یک سرعت ظاهری ثابت، سازگاری قابل قبولی بین چگالی طیفی‌های واقعی و مصنوعی شتاب مؤلفه‌های دورانی وجود دارد که بیانگر کارآمدی رابطه‌ی ۹ در

### تعیین الگوی تاریخچه‌ی زمانی جابجایی نقاط مختلف

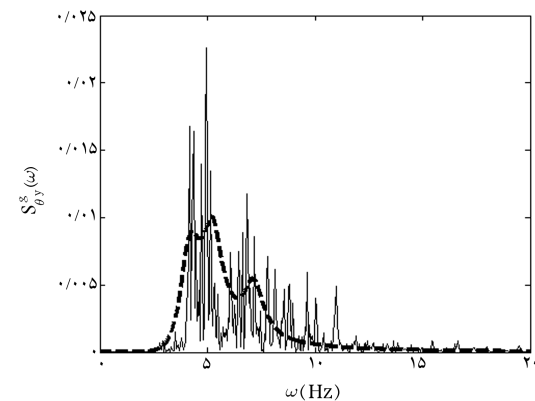
#### روی سطح زمین

تغییرات مکانی حرکت زمین در میدان آزاد ناشی از تحریک نقاط مختلف سطح زمین توسط امواج لرزه‌یی با دامنه و اختلاف فازهای متفاوت است. از این رو در صورتی که بتوان الگویی برای تعیین تغییرات مکانی نقاط مختلف سطح زمین به دست آورد، می‌توان از آن برای تحریک سازه‌های چند تکیه‌گاهی استفاده کرد. برای تعیین این الگو می‌توان با مرجع فرض کردن حرکت‌های متناظر با یک نقطه از سطح زمین، حرکت نقاط دیگر را نسبت به این نقطه مرجع تخمین زد و به این ترتیب روشی برای تعیین حرکت پایه‌های مختلف یک سازه چند تکیه‌گاهی به دست آورد.

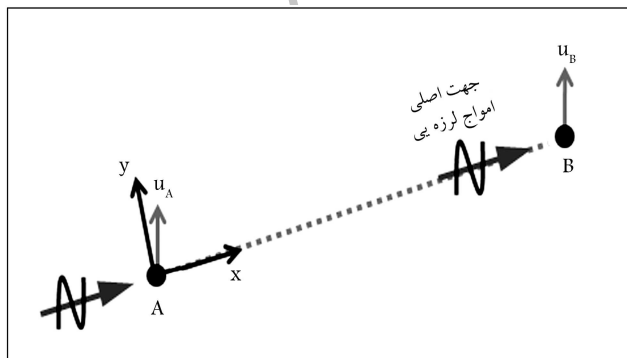
برای این منظور در صورتی که  $u_A$  مؤلفه‌ی حرکتی نقطه‌ی  $A$  (نقطه‌ی مرجع) و  $u_B$  مؤلفه‌ی حرکتی نقطه‌ی  $B$ ، هم‌راستا با نقطه‌ی  $A$  و به فاصله‌ی  $x$  از آن مطابق شکل ۷ باشد، اختلاف تغییر مکان بین دو نقطه‌ی  $A$  و  $B$  ناشی از انتشار امواج



شکل ۴. چگالی طیفی شتاب مؤلفه‌ی گهواره‌یی زلزله در راستای محور  $x$ .



شکل ۵. چگالی طیفی شتاب مؤلفه‌ی گهواره‌یی زلزله در راستای محور  $y$ .



شکل ۷. مدل در نظر گرفته شده برای تغییرات مکانی حرکت زمین.

لرزه‌ی بی در راستای محور  $x$  برابر خواهد شد با:

$$\Delta u(x, \omega) = u_B(x, \omega) - u_A(\omega) = |u_B(x, \omega)| \cdot \exp[i\omega(t - x/V_A)] - |u_A(\omega)| \cdot \exp[i\omega t] \quad (11)$$

در صورتی که  $T_{BA}(x, \omega)$  برابر با نسبت  $|U_B(x, \omega)|$  به  $|u_A(\omega)|$  تعریف شود، نرم رابطه‌ی ۱۱ به صورت رابطه‌ی ۱۲ خواهد شد:

$$\frac{|\Delta u(x, \omega)|}{|u_A(\omega)|} = \sqrt{1 - 2T_{BA}(x, \omega) \cos(\omega x/V_A) + T_{BA}^2(x, \omega)} \quad (12)$$

که بیانگر نسبت اختلاف تغییرمکان دو نقطه‌ی  $A$  و  $B$  به تغییرمکان نقطه‌ی  $A$  است. رابطه‌ی ۱۲ هنگامی که فرض شود بین دو نقطه‌ی  $A$  و  $B$  هیچ‌گونه تأخیر زمانی وجود ندارد و با فرض اینکه  $0 \leq T_{BA}(x, \omega) \leq 1$  باشد، به رابطه‌ی ۱۳ تبدیل خواهد شد:

$$\frac{|\Delta u(x, \omega)|}{|u_A(\omega)|} = 1 - T_{BA}(x, \omega) \quad (13)$$

از طرفی در صورتی که تابع همگرایی متناظر با چگالی طیفی مؤلفه‌های حرکتی  $u_A$  و  $u_B$   $\gamma_{AB}(x, \omega)$ ، به صورت رابطه‌ی ۱۴ تعریف شود:

$$\gamma_{AB}(x, \omega) = \frac{S_{AB}(x, \omega)}{S_{AA}(\omega) S_{BB}(x, \omega)} = |\gamma_{AB}(x, \omega)| \cdot \exp\left(-\frac{i\omega x}{V_A}\right) \quad (14)$$

که در آن  $S_{AB}(x, \omega)$  چگالی طیفی متقاطع مؤلفه‌های حرکتی  $u_B$  و  $u_A$ ، و همچنین  $S_{AA}(\omega)$  و  $S_{BB}(x, \omega)$  به ترتیب چگالی طیفی مؤلفه‌های حرکتی  $u_A$  و  $u_B$  هستند. با توجه به اینکه برای فواصل کوتاه  $x$ ، چگالی طیفی مؤلفه‌های  $u_B$  و  $u_A$  را می‌توان تقریباً یکسان در نظر گرفت، با این فرض که  $S_{AA}(\omega) = S_{BB}(x, \omega) = S^g(\omega)$ ، چگالی طیفی متناظر با رابطه‌ی ۱۱ به صورت رابطه‌ی ۱۵ خواهد شد:

$$S_{\Delta}(\omega) = 2S^g(\omega) [1 - |\gamma_{AB}(x, \omega)|] \quad (15)$$

از این رو با توجه به  $\sqrt{\frac{S_{\Delta}(x, \omega)}{S^g(\omega)}} = \frac{|\Delta u(x, \omega)|}{|u_A(\omega)|}$ ، با جایگذاری رابطه‌ی ۱۵ در رابطه‌ی ۱۳،  $T_{BA}(x, \omega)$  مطابق رابطه‌ی ۱۶ خواهد شد:

$$T_{BA}(x, \omega) = 1 - \sqrt{2 - 2|\gamma_{AB}(x, \omega)|} \quad (16)$$

به این ترتیب با انتخاب یک تابع همگرایی مناسب می‌توان  $T_{BA}(x, \omega)$  را به دست آورد و تغییرات مکانی نقطه‌ی  $B$  روی سطح زمین را نسبت به نقطه‌ی  $A$  (نقطه‌ی مرجع)، از رابطه‌ی ۱۷ به دست آورد:

$$u_B(x, \omega) = T_{BA}(x, \omega) \cdot |u_A(\omega)| \cdot \exp[i\omega(t - x/V_A)] \quad (17)$$

با محاسبه‌ی مؤلفه‌ی حرکتی  $u_B$  و با توجه به رابطه‌ی ۸، می‌توان مؤلفه‌های حرکتی دورانی متناظر با این مؤلفه را نیز محاسبه کرد و به این ترتیب با مشخص بودن مؤلفه‌های حرکتی یک نقطه از سطح زمین (نقطه‌ی مرجع)، می‌توان مؤلفه‌های حرکتی نقاط دیگر سطح زمین را محاسبه و از آن‌ها برای تحریک کلی سازه‌های با چند تکیه‌گاه مانند پل‌ها استفاده کرد.

## تعیین مؤلفه‌های ورودی پی‌ها با در نظر گرفتن آثار

### برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه

هدف این قسمت ارائه‌ی روشی برای تعیین مؤلفه‌های ورودی پی‌های مسطح صلب، با در نظر گرفتن آثار برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه است. برای این منظور فرض کنید مؤلفه‌های حرکت انتقالی متناظر با نقطه‌ی  $R$  (نقطه‌ی مرجع در میدان آزاد برابر با  $\{U^R(t)\} = \{u_x^g(t), u_y^g(t), u_z^g(t)\}$  باشند (شکل ۸). اکنون در صورتی که راستای انتشار امواج لرزه‌ی بی در جهت محور  $x$  باشد و تغییرات مکانی حرکت زمین در راستای محور  $y$  ناچیز فرض شوند، مؤلفه‌ی حرکت انتقالی ورودی پی گسترده‌ی صلب  $F$ ، در مرکز هندسی پی و راستای محور  $x$ ، برابر خواهد شد با:

$$u_x^F(t) = \frac{1}{b} \int_0^b u_x^g(x, t) dx \quad (18)$$

در صورتی که مؤلفه‌ی حرکت انتقالی میدان آزاد متناظر با نقطه‌ی  $R$  در راستای محور  $x$  به صورت رابطه‌ی ۱۹ باشد:

$$u_x^g(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} U_x^g(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (19)$$

آنگاه با توجه به رابطه‌ی ۱۷، فرم دیگر رابطه‌ی ۱۸ به صورت رابطه‌ی ۲۰ خواهد شد:

$$u_x^F(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_x^F(\omega) U_x^g(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (20)$$

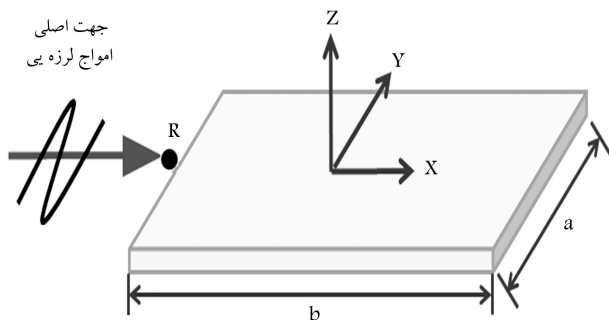
که در آن ضریب  $\tau_x^F(\omega)$  برابر با  $\int_0^b T_{BA}(x, \omega) \exp(-i\omega x/V_A) dx$   $(1/b)$  است. با استفاده از رابطه‌ی ۲۰ می‌توان مؤلفه‌ی انتقالی ورودی پی در راستای محور  $x$  را محاسبه کرد. به طور مشابه می‌توان مؤلفه‌های انتقالی متناظر با مرکز هندسی پی و در راستای دو محور دیگر را به دست آورد. برای تعیین مؤلفه‌ی گهواره‌ی پی ورودی حول محور  $y$  نیز می‌توان از رابطه‌ی ۲۱ استفاده کرد:

$$\theta_y^F(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \tau_{\theta_y}^F(\omega) U_z^g(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (21)$$

که در آن ضریب  $\tau_{\theta_y}^F(\omega)$  برابر است با:

$$\tau_{\theta_y}^F(\omega) = \int_0^b [(b/2) - x] \cdot T_{BA}(x, \omega) \exp(-i\omega x/V_A) dx$$

به طور مشابه مؤلفه‌ی پیچشی ورودی پی،  $\theta_z^F$ ، از رابطه‌ی ۲۱ قابل محاسبه است، با این تفاوت که در رابطه‌ی ۲۱ ضریب  $\tau_{\theta_y}^F(\omega)$  و مؤلفه‌ی  $U_z^g(\omega)$  با ضریب



شکل ۸. مدل در نظر گرفته شده برای پی گسترده‌ی مسطح صلب.

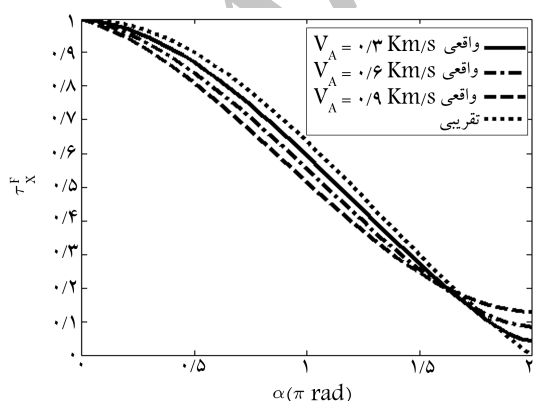
حرکت قوی زمین وجود دارد. با در نظر گرفتن این فرم تقریبی، ضرایب  $\tau_{\theta y}^F(\omega)$  و  $\tau_x^F(\omega)$  برابر با رابطه‌ی ۲۳ خواهند شد:

$$\tau_x^F(\omega) = \left\{ \frac{\sin(\alpha)}{\alpha} - \frac{\sqrt{2}\lambda_x \omega b}{V_S} \left[ \frac{\cos(\alpha) - 1}{\alpha^2} + \frac{\sin(\alpha)}{\alpha} \right] \right\} + i \left\{ \frac{\cos(\alpha) - 1}{\alpha} + \frac{\sqrt{2}\lambda_x \omega b}{V_S} \left[ \frac{\sin(\alpha)}{\alpha^2} - \frac{\cos(\alpha)}{\alpha} \right] \right\}$$

$$\tau_{\theta y}^F(\omega) = \frac{12}{b} \left\{ \left[ \frac{1 - \cos(\alpha)}{\alpha^2} - \frac{\sin(\alpha)}{\alpha} \right] + \frac{\sqrt{2}\lambda_x \omega b}{V_S} \times \left[ \frac{1 + \cos(\alpha)}{\alpha^2} + \sin(\alpha) \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right) \right] \right\} - \frac{12i}{b} \left\{ \left[ \frac{1 + \cos(\alpha)}{\alpha^2} - \frac{\sin(\alpha)}{\alpha} \right] + \frac{\sqrt{2}\lambda_x \omega b}{V_S} \times \left[ \frac{1 - \cos(\alpha)}{\alpha^2} + \cos(\alpha) \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right) - \frac{1}{\alpha} \right] \right\} \quad (23)$$

که در آن  $\alpha = \omega b / V_A$  است. رابطه‌ی ۲۳ بیان‌گر تفاوت اختلاف فاز و دامنه‌ی مؤلفه‌های حرکتی ورودی پی به میدان آزاد است. حالات خاص تغییرات دامنه‌ی مؤلفه‌های حرکتی ورودی پی متناظر با رابطه‌ی ۲۳، در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول منظور از  $\alpha \rightarrow 0$  و  $\lambda_x \rightarrow 0$ ، به ترتیب انتشار قائم امواج لرزه‌پی و ناچیز بودن آثار ناهمسانی حرکت زمین متناظر با ساختگاه فرضی است. تغییرات دامنه‌ی حرکت‌های ورودی پی متناظر با مؤلفه‌های  $\theta_y^F$  و  $u_x^F$  با استفاده از رابطه‌ی ۲۳ (به صورت دقیق) و با استفاده از جدول ۱ به ازای شرایط  $\lambda_x \rightarrow 0$  (به صورت تقریبی)، در مقابل پارامتر  $\alpha$  و به ازای مقادیر مختلف  $V_A$  و  $\lambda_x / V_S = 0.0001$ ، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ترسیم شده است.

مقایسه‌ی تابع تبدیل تقریبی با توابع تبدیل واقعی نشان می‌دهد که حتی به ازای سرعت‌های ظاهری کوچک نیز نمی‌توان از آثار کم ناهمسانی حرکت‌های زمین صرف نظر کرد. همچنین با افزایش بسامد تحریک و سرعت ظاهری امواج لرزه‌پی، به تدریج تأثیر ناهمسانی حرکت‌های زمین بر مقادیر توابع تبدیل حرکت‌های ورودی پی افزایش می‌یابد. این تأثیر در بسامدهای بالا بر ضریب  $\tau_{\theta y}^F(\omega)$  بیشتر از ضریب  $\tau_x^F(\omega)$  است. با توجه به این نتایج، به نظر نمی‌رسد که حتی به ازای مقادیر کوچک  $\lambda_x$ ، بتوان از توابع تبدیلی که در محاسبه‌ی آن‌ها فقط تأثیر تأخیرات زمانی امواج نسبت به یکدیگر در نظر گرفته شده است، برای تخمین قابل قبول مؤلفه‌های حرکتی ورودی، مخصوصاً مؤلفه‌های دورانی زلزله (ناشی از وابستگی بیشتر این مؤلفه‌ها به بسامدهای بالای تحریک)، پی‌های گسترده استفاده کرد. نکته‌ی دیگری که ذکر آن



شکل ۱۱. بررسی تغییرات  $\tau_{\theta y}^F(\omega)$  دقیق و تقریبی در مقابل پارامتر  $\alpha$ ، به ازاء مقادیر مختلف  $V_A$  و  $\lambda_x / V_S = 0.0001$ .

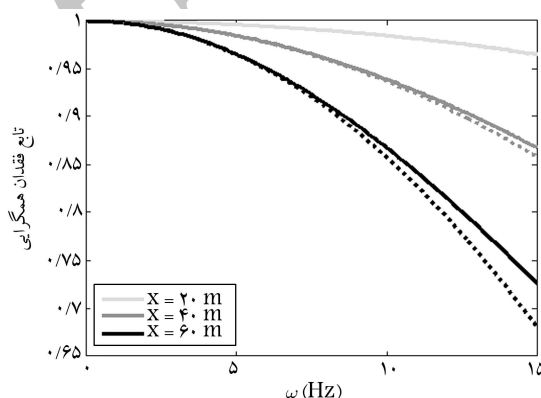
$\tau_{\theta z}^F(\omega) = \frac{1}{1 + (\alpha/b)^2} \tau_{\theta y}^F(\omega)$  و مؤلفه‌ی  $U_y^g(\omega)$  جایگزین می‌شوند. با وجود این، به دلیل اینکه توابع فقدان همگرایی،  $|\gamma_{AB}(x, \omega)|$ ، معمولاً فرم ظاهری ساده‌یی ندارند، در نتیجه معمولاً تعیین ضرایب  $\tau_{\theta y}^F(\omega)$  و یا  $\tau_x^F(\omega)$  پیچیده شده و گاهی فقط حل انتگرال‌ها به صورت عددی ممکن خواهد بود.

در ادامه‌ی این مطالعه برای برسی میزان اهمیت عامل بی‌بعد  $\lambda_x$  بر توابع تبدیل، روشی تقریبی برای تعیین این ضرایب برای حالتی که مقدار  $\lambda_x$  کوچک باشد، ارائه می‌شود. برای این منظور از تابع فقدان همگرایی رابطه‌ی ۲۲ (که یکی از رایج‌ترین فرم‌های توابع فقدان همگرایی مورد استفاده در مطالعات است)، استفاده می‌شود: [۲۱]

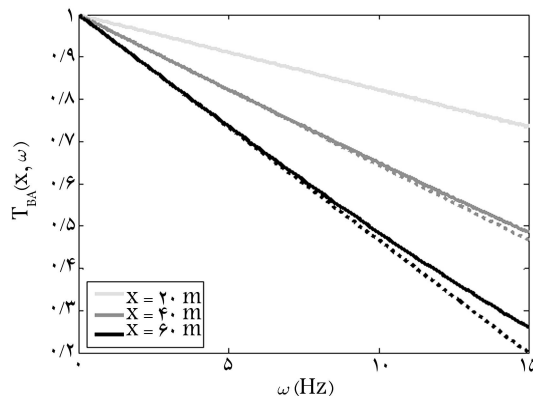
$$|\gamma_{AB}(x, \omega)| = \exp \left[ - \left( \frac{\lambda_x x \omega}{V_S} \right)^2 \right] \quad (22)$$

با توجه به اینکه این تابع فقدان همگرایی را، در شرایط ناهمسانی ناچیز حرکت‌های زمین (مقادیر کوچک  $\lambda_x$ ) و بسامدهای غالب حرکت شدید زمین، می‌توان به طور تقریبی برابر با  $1 - (\lambda_x x \omega / V_S)^2$  در نظر گرفت. به این ترتیب تابع  $T_{BA}(x, \omega)$  به  $1 - \sqrt{2} (\lambda_x x \omega / V_S)$  ساده خواهد شد. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نشان دهنده تغییرات  $|\gamma_{AB}(x, \omega)|$  و  $T_{BA}(x, \omega)$  دقیق و تقریبی در مقابل بسامد به ازای مقادیر مختلف  $\lambda_x / V_S = 0.0001$  و  $x = 20, 40, 60$  m هستند.

چنانکه در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، سازگاری قابل قبولی بین مقادیر  $|\gamma_{AB}(x, \omega)|$  و  $T_{BA}(x, \omega)$  دقیق و تقریبی در محدوده‌ی بسامدهای غالب



شکل ۹. بررسی تغییرات تابع فقدان همگرایی دقیق (خط) و تقریبی (خط چین)، در مقابل بسامد به ازاء مقادیر مختلف  $x = 20, 40, 60$  m و  $\lambda_x / V_S = 0.0001$ .



شکل ۱۰. بررسی تغییرات  $T_{BA}(\omega)$  دقیق (خط) و تقریبی (خط چین)، در مقابل بسامد به ازاء مقادیر مختلف  $x = 20, 40, 60$  m و  $\lambda_x / V_S = 0.0001$ .

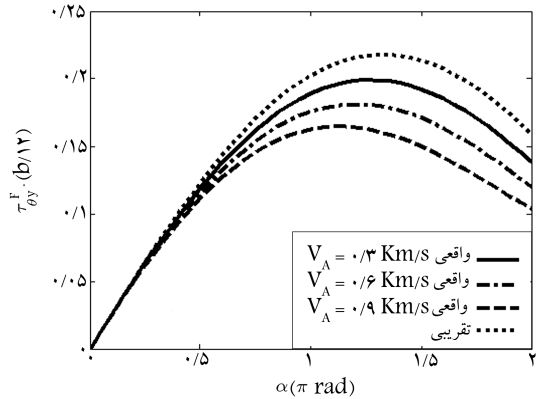
جدول ۱. بررسی حالات خاص تغییرات دامنه‌ی مؤلفه‌های حرکتی ورودی پی‌ها.

شرایط حدی در نظر گرفته شده	$ \tau_x^F(\omega) $	$\tau_{\theta y}^F(\omega)$
$\alpha \rightarrow 0$	$1 - \sqrt{2}\lambda_x \omega b / 2V_S$	$\sqrt{2}\lambda_x \omega / V_S$
$\lambda_x \rightarrow 0$	$ \sin(\alpha/2)  / (\alpha/2)$	$(12/b\alpha) \cdot [ \sin(\alpha/2)  / (\alpha/2)] - \cos(\alpha/2)$
$a, b, \lambda_x \rightarrow 0$	۱	$\omega / V_A$

به صورت معکوس می‌تواند برای سازه‌های مرتفع و سخت، منجر به افزایش سطح نیروهای لرزه‌ی وارد بر سازه‌ی ناشی از بارگذاری مؤلفه‌های گهواره‌ی زلزله شود.

### نتیجه‌گیری

هدف تحقیق حاضر ارائه‌ی رویکردی کاربردی برای تحریک سازه‌های چند تکیه‌گاهی و سازه‌های با پی گسترده با در نظر گرفتن آثار مؤلفه‌های دورانی زلزله بود. از این رو در ابتدا روش‌های محاسبه‌ی مؤلفه‌های دورانی زلزله در میدان آزاد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند، سپس رابطه‌ی به منظور اصلاح چگالی طیفی کانائی-تاجیمی اصلاح شده، ارائه شد و از آن جهت تعیین چگالی طیفی مصنوعی شتاب مؤلفه‌های دورانی زلزله از طریق چگالی طیفی مؤلفه‌های انتقالی متناظر استفاده شد. از مزایای روش ارائه شده، تطابق قابل قبول آن با چگالی طیفی نداشت‌های واقعی است. در ادامه نیز روشی برای تعیین الگوی بارگذاری تاریخچه‌ی زمانی پایه‌های سازه‌های چند تکیه‌گاهی همچون پل‌ها، ارائه شد. همچنین با در نظر گرفتن آثار برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه روابطی به منظور تعیین مؤلفه‌های انتقالی و دورانی ورودی پی‌های گسترده از طریق مؤلفه‌های حرکتی میدان آزاد ارائه شد. نتایج مطالعه‌ی حاضر نشان می‌دهند که به‌طور کلی لحاظ نکردن آثار برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه برای تحریک لرزه‌ی سازه‌های گسترده، می‌تواند منجر به بارگذاری غیربهبوده و ناپیم این سازه‌ها شود. همچنین از آثار فقدان همگرانی (هم‌بستگی) امواج لرزه‌ی در تعیین مؤلفه‌های ورودی پی‌های گسترده‌ی صلب تحت هیچ شرایطی نمی‌توان صرف نظر کرد. این آثار در صورت بزرگ بودن سرعت‌های ظاهری، نقش تعیین‌کننده‌ی در آثار برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه دارد و تحریک ورودی سازه‌های گسترده در سطح، کاملاً به آن‌ها وابسته است.



شکل ۱۲. بررسی تغییرات  $\tau_{\theta y}^F(\omega) \cdot (b/12)$  دقیق و تقریبی در مقابل پارامتر  $\alpha$ ، به ازاء مقادیر مختلف  $V_A$  و  $\lambda_x / V_S = 0.0001$ .

حائز اهمیت است تقابل بین ضرایب  $\tau_x^F(\omega)$  و  $\tau_{\theta y}^F(\omega)$  است. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش  $\alpha = \omega b / V_A$  تا زاویه  $2\pi$ ، که تعداد کثیری از سازه‌ها را شامل می‌شود، دامنه‌ی مؤلفه‌ی انتقالی ورودی پی کاهش و در نتیجه نیروهای طراحی سازه کاهش می‌یابند.

از طرفی با توجه به شکل ۱۲، در همین محدوده با افزایش  $\alpha$ ، بزرگای مؤلفه‌ی گهواره‌ی ورودی پی افزایش می‌یابد، این وضعیت رفتاری معکوس  $\tau_x^F(\omega)$  و  $\tau_{\theta y}^F(\omega)$  بیان‌گر این واقعیت است که همان‌طور که در نظر گرفتن آثار برهم‌کنش سینماتیک خاک و سازه می‌تواند در بارگذاری سازه‌های کوتاه و سختی ( $T < 0.5s$ ) که در جهت غالب انتشار امواج لرزه‌ی دارای بعد پی قابل توجهی ( $b > 40m$ ) هستند، باعث کاهش سطح نیروهای لرزه‌ی وارد بر سازه‌ی ناشی از مؤلفه‌ی افقی زلزله شود؛

### پانویس

1. Northridge
2. Kobe

### منابع (References)

1. Newmark, N.M. "Torsion in symmetrical building", *Proc. 4th World Conf. Earthquake Eng. Santiago, Chile* 2, A. 3, pp. 19-32 (1969).
2. Trifunac, M.D. "A note on rotational components of earthquake motions on ground surface for incident body

waves", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **1**, pp. 11-19 (1982).

3. Ghafory-Ashtiany, M. and Singh, M.P. "Structural response for six correlated earthquake components", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, pp. 103-119 (1986).

4. Trifunac, M.D. "The role of strong motion rotations in the response of structures near earthquake faults", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**, pp. 382-393 (2009).

5. Shakib, H. and Tohidi, R.Z. "Evaluation of accidental eccentricity in buildings due to rotational component of earthquake", *Journal of Earthquake Engineering*, **6**, pp. 431-445 (2002).

6. De La Llera, J.C. and Chopra, A.K. "Accidental torsion in buildings due to base rotational excitation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**, pp. 1003-1021 (1994).
7. Kalkan, E. and Grazer, V. "Coupled tilt and translational ground motion response spectra", *Journal of Earthquake Engineering*, **133**, pp. 609-619 (2007).
8. Zembaty, Z. and Boffi, G. "Effect of rotational seismic ground motion on dynamic response of slender towers", *European Earthquake Engineering*, **1**, pp. 3-11 (1994).
9. Rutenberg, A. and Heidebrecht, A.C. "Response spectra for torsion, rocking and rigid foundations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **13**, pp. 543-557 (1985).
10. Berrah, M. and Kausel, E. "Modified response spectrum model for the design of structures subjected to spatially varying seismic excitations", School of Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts 02139, Research Report R90-2 (1990).
11. Der Kiureghian, A. and Neuenhofer, A. "Response spectrum method for multi-support seismic excitations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **21**, pp. 715-740 (1992).
12. Heredia-zavoni, E. and Vanmarcke, E.H. "Seismic random vibration analysis of multisupport structural systems", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **120**, pp. 1107-1128 (1994).
13. Veletsos, A.S.; Prasad, A.M. and Wu, W.H. "Transfer functions for rigid rectangular foundations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**, pp. 5-17 (1997).
14. 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).
15. 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).
16. Castellani, A. and Boffi, G. "On the rotational components of seismic motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**, pp. 785-797 (1989).
17. Niazi, M. "Inferred displacements, velocities and rotations of a long rigid foundation located at El Centro differential array site during the 1979 Imperial Valley, California, earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, pp. 531-542 (1986).
18. Oliveira, C.S. and Bolt, B.A. "Rotational components of surface strong ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**, pp. 517-526 (1989).
19. Ruiz, R. and Penzien, J. "Probabilistic study of the behaviour of structures during earthquakes", Report EERC-69-03, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, CA (1969).
20. Der, Z.A.; Shumay, R.H. and Lees, A.C. "Frequency domain coherent processing of regional seismic signals at small arrays", *Bulletin Seismic Society of America*, **70**, pp. 326-388 (1988).

Archive



# EVALUATION OF THE EFFECTS OF KINEMATIC SOIL STRUCTURE INTERACTION ON SEISMIC LOADING OF STRUCTURES PART I: SEISMIC LOADING PATTERNS OF STRUCTURES

M. Ghafory-Ashtiany\*

mohsen.ashtiany@gmail.com

M. R. Falamarz-Sheikhabadi

m.falamarz@gmail.com

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology Tehran

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 28, Issue 2, Page 27-34, Original Article

© Sharif University of Technology

## Abstract

One of the main challenges in structural analysis is the reliable definition of structural loading; especially the loading pattern due to earthquake input acceleration at the base of the structure. During the past four decades, in spite of the fact that six components—three translational and three rotational—are needed to describe strong ground motion (SGM) and excitation due to rotational motion, which are mainly associated with failures of some tall and long structures in the course of past earthquakes, like Kobe and Northridge, structural analysis procedures are still based on the principles of classical earthquake engineering, and the effects rota-

tional components on the seismic loading of structures are ignored. One reason for such assumption is the complexity of the derivation of simple seismic loading patterns for structures subject to rotational loading.

This study addresses research on the effects of earthquake rotational components on the seismic loading patterns of engineering structures, due to spatial variations of earthquake ground motion (SVEGM). To achieve this objective, at first, a new method is derived to obtain the power spectral density function of the rotational ground motion in free-fields in terms of translational components, by modifying the Kanai-Tajimi SDF. Next, a new procedure is presented using a coherency function to obtain the SVEGM pattern in the time domain. The presented technique is applicable for the earthquake loading of multiple support structures, such as bridges, pipelines, and buildings, supported on spread foundations, etc. Moreover, a simple relation is derived in order to estimate the input rotational and translational motions of rigid mat foundations, by considering the effects of kinematic soil structure interaction. The numerical results show that ignoring the effects of kinematic soil structure interaction in the seismic excitation of extended structures may lead to the unsafe loading of these structures.

**Key Words:** earthquake rotational components, phase velocity, principal axes, phase delay, coherency, multiple support excitations.

---

\* corresponding author

Received 23 November 2010; received in revised form 25 August 2010; accepted 1 March 2011