



اثر اندرکنش خاک و سازه بر موده‌های بالاتر ارتعاشی

عماد قدرتی^۱، حسین جهانخواه^۲، محمدعلی قناد^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۲- دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

آدرس پست الکترونیکی مولف رابط e_ghodrati@alum.sharif.edu

خلاصه

در این تحقیق میزان تأثیر پذیری موده‌های بالاتر ارتعاشی از اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار گرفته است. برای مدل سازی سازه، از مدل برشی استفاده شده است. محیط نیمه بینهایت خاک با استفاده از فنرها و میراگرهای افقی و چرخشی با ضرایب ثابت به صورت یک مدل ساده ۲ بعدی در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از پارامترهای بدون بعد، معادلات تعادل دینامیکی سیستم خاک-سازه به دست آمده است. آنگاه با در نظر گرفتن محدوده وسیعی از پارامترهای مذکور و با استفاده از تحلیل مودال غیر کلاسیک مسأله حل گردید. نتایج حاصل بیانگر این واقعیت است که اندرکنش خاک و سازه تأثیر کمی بر پرورد موده‌های بالاتر دارد ولی این تأثیر بر میرایی این موده‌ها قابل توجه است.

کلمات کلیدی: تحلیل مودال غیر کلاسیک، موده‌های بالاتر ارتعاشی، اندرکنش خاک و سازه

۱. مقدمه

دهها سال است که تأثیر اندرکنش میان خاک و سازه شناخته شده است. در این راستا روشهای متعددی برای تخمین میزان این اثرگذاری مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان روش تحلیل مودال به دلیل درک فیزیکی بهتر از محبوبیت خاص برخوردار بوده است. به گونه‌ای که یکی از روش‌های پیشنهادی آیین نامه‌ها نیز بر این روش استوار است. اندرکنش خاک و سازه برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ میلادی فصل مستقلی از گزارش ATC3-06 که تحت عنوان "ضوابط پیشنهادی برای آیین نامه‌های طراحی ساختمانها در برابر زلزله" منتشر شد را به خود اختصاص داد [۱]. این گزارش بعدها پایه آیین نامه NEHRP94 قرار گرفت [۲] و در ویرایشهای بعدی این آیین نامه که کاملترین ضوابط در این زمینه محسوب می‌شوند نیز نقش محوری ایفا کرد. با وجود روشهای مناسبی که برای تحلیل مودال سیستمهای غیر کلاسیک وجود دارد [۳] تحقیقات محدودی در زمینه تحلیل سیستم خاک و سازه با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه مختلط^۱ انجام شده است [۴-۶]. تحقیقات انجام شده عمدتاً برای محاسبه میرایی موده‌های مختلف ارتعاشی مبتنی بر استفاده از روشهای انرژی است که اساس آن بر فرض برابری شکل موده‌های ارتعاشی میرا و غیر میرا استوار است [۷]. روش دیگر بر اساس برابر قرار دادن پاسخ دقیق سیستم با پاسخهای ناشی از تحلیل مودال در محدوده‌ای از فرکانسهای مورد نظر است که در نتیجه نیازمند داشتن پاسخهای دقیق قبل از انجام تحلیل مودال است [۸]. روش دیگری نیز بر اساس انجام تحلیل مودال در دامنه فرکانس انجام گرفته است که در این روش درجات آزادی خاک و سازه بر مبنای هم نوشته می‌شوند سپس با جایگذاری درجات آزادی خاک در معادلات تعادل مربوط به درجات آزادی سازه، درجات آزادی خاک حذف می‌شوند [۹]. در این حالت با انجام تحلیل مودال در حوزه فرکانس، پاسخ هر مود سازه‌ای که اثر درجات آزادی خاک نیز در آن دیده شده است، به دست می‌آید. برای تحلیل سیستم خاک و سازه با روش تحلیل مقادیر ویژه، روش ساده شده‌ای^۲ نیز ارائه شده است [۶] تا حجم محاسبات کاهش یابد. تحقیقاتی که با استفاده از این روش ساده شده انجام شده است بیشتر توجه خود را به تخمین پرورد و میرایی مود اول معطوف کرده‌اند. برای پیش بینی

¹ Complex eigenvalue analysis

² Simplified Method

پر بود و میرایی مودهای بالاتر نیز مطالعاتی انجام شده است [۱۰ و ۱۱] ولی برای یافتن نقاط ضعف و قوت این روش نیاز به مطالعات جامع تری می باشد که این موضوع یکی از اهداف اصلی در تحقیق حاضر می باشد.

۲. مدل خاک-سازه

برای مدل سازی خاک می توان اطراف سازه را از روش های تحلیل دقیق و با دقت بسیار زیادی مدل نمود و با از مدل های تقریبی برای معادل سازی استفاده کرد. بررسی ها نشان می دهد مدل های مخروطی^۱ از میان مدل های تقریبی در عین سادگی، نتایج خوب و قابل قبولی برای مدل کردن محیط محیط نیم بی نهایت خاک زیر شالوده می دهد و می توان از آنها به عنوان مدلی ساده و با دقت کافی برای کارهای مهندسی به منظور مدل سازی خاک استفاده کرد [۱۲]. در روش مخروطی محیط نیمه بی نهایت خاک با فنر و دمپره های معادل به نحوی جایگزین می شود که همان اثر خاک نیمه بی نهایت را داشته باشد. برای بررسی اثر خاک می توان از مدل های مخروطی متناسب با نوع درجه آزادی در نظر گرفته شده استفاده نمود. در این تحقیق ما درجات آزادی Sway و Rocking را که دارای اثر بیشتری در پاسخ سازه هستند مورد بررسی قرار می دهیم. برای هر درجه آزادی هم یک فنر و یک دمپره معرفی می گردد که مبین اثر خاک در آن درجه آزادی است. مقادیر سختی و ثابت میرایی این فنر و میراگرها در زیر آورده شده است:

$$K_s = \frac{\rho V_s^2 A_0}{Z_0} \quad (۱)$$

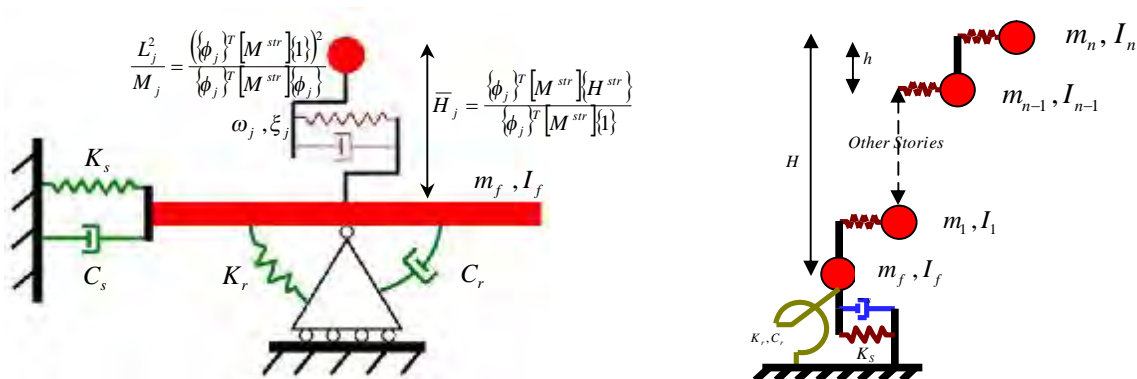
$$C_s = \rho V_s A_0 \quad (۲)$$

$$K_r = \frac{3\rho V^2 I_0}{Z_0} \quad (۳)$$

$$C_r = \rho V I_0 \quad (۴)$$

در این روابط K_s و C_s به ترتیب فنر و میراگر درجه آزادی Sway، K_r و C_r فنر و میراگر درجه آزادی Rocking، ρ چگالی خاک، V_s سرعت موج برشی، A_0 مساحت شالوده، I_0 ممان اینرسی دورانی پی و Z_0 ارتفاع فرضی برای مخروط ناقص در مدل مخروطی هستند. لازم به ذکر است در مدل های مخروطی علاوه بر روابط ارائه شده در بالا، ضرایبی نیز جهت نشان دادن وابستگی سختی و میرایی خاک به فرکانس تحریک وجود دارد که در این تحقیق از آنها صرف نظر شده است.

برای مدل کردن سازه از مدل سازه برشی استفاده شده است. جرم طبقات در این سیستم در همه طبقات یکسان و به صورت متمرکز می باشد. علاوه بر آن در هر طبقه ممان اینرسی دورانی جرمی نیز لحاظ شده است. البته برای سازه بر بستر صلب چون درجه آزادی دورانی نداریم، ممان اینرسی جرمی نقشی ایفا نمی کند ولی در حالت سازه بر بستر انعطاف پذیر درجه آزادی Rocking باعث فعال شدن این مقادیر می شود. شکل ۱ مدل سازه چند درجه آزادی برای سیستم خاک-سازه را نشان می دهد. برای بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه می توان از مدل ساده شده ارائه شده در مرجع [۶] نیز استفاده کرد که در مرجع مذکور مدل اخیر تنها برای برآورد پارامترهای دینامیکی مدل اول سیستم خاک-سازه مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲).



شکل ۲ - مدل ساده شده برای سیستم خاک-سازه

شکل ۱ - مدل چند درجه آزادی برای سیستم خاک-سازه

¹ Cone models



در روش ساده شده برای به دست آوردن پاسخ هر مود به جای تحلیل سیستم خاک-سازه با سازه n طبقه و $N = n + 2$ درجه آزادی، یک سیستم سه درجه آزادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این سیستم سه درجه آزادی شامل سازه یک درجه آزادی و درجات آزادی Sway و Rocking برای خاک است. در این مدل همانند روش چند درجه آزادی، درجات آزادی Sway و Rocking با استفاده از فنر و میراگرهای ارائه شده در روابط (۱) تا (۴) مدل می‌شوند. اما به جای سازه چند درجه آزادی، یک سازه تک درجه آزادی با مشخصات مود اول مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق رویکرد مذکور برای برآورد مشخصات مودهای بالاتر سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. به گونه‌ای که به جای قرار دادن مشخصات مود اول سازه برای درجه آزادی جایگزین سازه، مشخصات مود z ام سازه چند درجه آزادی قرار می‌گیرد. برای جرم این سازه تک درجه آزادی از جرم مؤثر مودی مود z ام سازه چند درجه آزادی استفاده می‌شود و ارتفاع آن برابر با ارتفاع مؤثر مود z ام قرار داده می‌شود. سختی این سازه به نحوی به دست می‌آید که پرورد ارتعاشی آن برابر با پرورد ارتعاشی مود z ام سازه اصلی شود. پس از انجام تحلیل مقادیر ویژه برای این سیستم، با استفاده از مود اول سیستم ساده شده سه درجه آزادی خاک - سازه که در آن مشخصات مود z ام سازه اصلی جایگزین سازه تکدرجه آزادی شده است، پرورد و میرایی تخمینی مود z ام سیستم خاک - سازه را به دست می‌آوریم. برای به دست آوردن پرورد و میرایی تخمینی مود Sway و Rocking از پرورد و میرایی مودهای Sway و Rocking حاصل از مدل ساده شده خاک - سازه‌ای که در آن مشخصات مود اول سازه جایگزین سازه تکدرجه شده، استفاده می‌کنیم.

۳. پارامترهای کلیدی سیستم خاک و سازه

با استفاده از مجموعه‌ای از پارامترهای بدون بعد که در کنار هم معرف سیستم‌های سازه و خاک می‌باشند، مشخصات خاک - سازه در این تحقیق حاصل شده است. تحقیقات نشان داده‌اند [۶] که پارامترهای اصلی مسئله عبارتند از شاخص سختی نسبی سازه به خاک (a_0)، نسبت ارتفاع مؤثر سازه به بعد شالوده ($\frac{\bar{H}_1}{r}$) و شاخص نسبت جرم سازه به خاک (\bar{m}).

$$a_0 = \frac{\omega_1^{fix} \times \bar{H}_1}{V_s} \quad (5)$$

$$\bar{m} = \frac{M^{tot}}{\rho r^2 H^{tot}} \quad (6)$$

در این روابط r شعاع شالوده دایره ای معادل، ω_1^{fix} فرکانس مود اول سازه در حالت پای ثابت، H^{tot} ارتفاع کل سازه، \bar{H}_1 ارتفاع مؤثر مود اول سازه و M^{tot} جرم کل سازه بدون در نظر گرفتن جرم شالوده است.

برای a_0 محدوده تغییرات صفر تا ۳ به ترتیب "برای حالت سازه بر بستر صلب" و "برای حالتی که اثر اندرکنش حداکثر است" در نظر گرفته شده که اکثر ساختمانهای متداول را در برمی‌گیرد [۶]. همچنین با بررسی ساختمانهای متداول متوجه خواهیم شد که تغییرات \bar{m} بسیار محدود است و می‌توان مقدار مشخصی را به آن اختصاص داد [۱۰]. در اینجا مقدار $\bar{m} = 0.5$ به این متغیر اختصاص داده شده است. بنابراین پارامترهای کنترل کننده مسئله تنها دو عامل اول خواهند بود.

علاوه بر پارامترهای معرفی شده پارامترهای بی بعد دیگری نیز وجود دارند که نتایج حاصل از تحلیل چندان نسبت به آنها حساس نیست و می‌توان مقادیر خاصی را به آنها اختصاص داد [۶]. این پارامترها عبارتند از ضریب پواسون در خاک (ν)، میرایی سازه ($\xi^{structure}$)، میرایی مصالح

خاک (ξ^{soil}) و نسبت جرم شالوده به جرم طبقات $\left(\frac{m_f}{m}\right)$.

$$\nu = 0.3, \quad \frac{m_f}{m} = 1, \quad \xi^{soil} = \xi^{structure} = 0$$

۴. محاسبه پارامترهای مودال در سیستمهای غیر کلاسیک

شرط کلاسیک بودن مودهای یک سیستم مطابق رابطه زیر می‌باشد [۱۳].



$$[C][M]^{-1}[K] = [K][M]^{-1}[C] \quad (7)$$

در این رابطه $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریسهای جرم، میرایی و سختی سیستم خاک - سازه هستند. در غیر این صورت شکل‌های مودی سیستم مختلط^۱ هستند و دیگر شرایط تعامد^۲ مودها مستقلاً نسبت به ماتریسهای جرم، میرایی و سختی برقرار نیست. در اینجا با استفاده از روش تحلیل مودال کلاسیک نمی‌توان معادله حرکت دینامیکی را به n معادله مستقل تقسیم کرد. به همین علت نیاز به روش جدیدی داریم که بتوان به کمک آن پارامترهای مودال سیستم را محاسبه کرد. در این مقاله برای تحلیل سیستمهای غیر کلاسیک از روشی که در مرجع [۳] ارائه شده، استفاده شده است. اگر پاسخ بخش همگن معادلات تعادل دینامیکی را به صورت زیر در نظر بگیریم.

$$\{u\} = \{\psi\}e^{rt} \quad (8)$$

در این رابطه r مقدار مشخصه و $\{\psi\}$ بردار مشخصه است. با استفاده از این رابطه معادله حرکت دینامیکی سیستم به صورت زیر در می‌آید:

$$(r^2[M] + r[C] + [K])\{\psi\} = \{0\} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، n معادله مرتبه دوم وجود دارد که با حل کردن آنها می‌توانیم پارامترهای مودال سیستم را به دست بیاوریم. برای اینکه بتوانیم معادله (۹) را به شکل مناسبتری ارائه کنیم پارامترهای زیر را تعریف می‌کنیم:

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [M] \\ [M] & [C] \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (10)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -[M] & [0] \\ [0] & [K] \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (11)$$

$$\{Z\} = \begin{Bmatrix} r\{\psi\} \\ \{\psi\} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\{z\} = \{Z\}e^{rt} \quad (13)$$

به این ترتیب معادله (۹) به شکل زیر در خواهد آمد:

$$(r[A] + [B])\{Z\} = \{0\} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، $2n$ معادله مرتبه اول وجود دارد که با حل کردن آن $2n$ مقدار ویژه^۳ و $2n$ بردار ویژه^۴ به دست می‌آید. به این ترتیب برای هر مود دو مقدار ویژه و دو بردار ویژه وجود دارد. در حالتی که مود مورد مطالعه under-damped باشد جفت‌های مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن مختلط هستند و با هم مزدوج^۵ می‌باشند. در حالتی که مود مورد مطالعه over-damped باشد جفت‌های مقدار ویژه آن اعداد حقیقی منفی هستند و بردارهای ویژه آن نیز اعداد حقیقی می‌باشند. در حالت under-damped برای به دست آوردن پرپود میرا و میرایی مود j ام داریم:

$$\omega_j^d = |\text{imag}(r_j)| \quad (15)$$

$$\xi_j = \frac{|\text{real}(r_j)|}{\|r_j\|} \quad (16)$$

در رابطه فوق r_j مقدار ویژه مود j ام است. در حالت over-damped برای به دست آوردن میرایی مود j ام داریم:

¹ Complex
² Orthogonality Conditions
³ Eigenvalue
⁴ Eigenvector
⁵ Conjugate



$$\xi_j = -\frac{r_m + r_n}{2\sqrt{(r_m r_n)}} \quad (17)$$

در رابطه فوق r_m و r_n یک جفت مقادیر مشخصه حقیقی منفی برای مود j ام با فرض $|r_n| > |r_m|$ هستند.

۵. نحوه انجام تحلیلیها

در این تحقیق برای مطالعه اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی ساختمانهای معمول، از ساختمانهای ۳ و ۷ طبقه استفاده شده است. در این سازه ها نسبت ارتفاع مؤثر به عرض در بازه ۱ تا ۵ (برای پوشش دادن شرایط سازه های لاغر و چاق) انتخاب شده است. توزیع سختی برای این سازه ها، توزیع سختی استاندارد [۱۵]۲۸۰۰ در نظر گرفته شده است. مدل خاک که با استفاده از فنر و میراگر با مقادیر ثابت، بر مبنای پارامترهای بی بعد ارائه شده است ما را قادر می سازد تا سیستمها را با شرایط متنوع خاک و سازه مدل کنیم. در اینجا مدل خاک-سازه به دو صورت چند درجه آزادی و ساده شده در نظر گرفته شده است تا علاوه بر تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر پارامترهای مودال سیستم خاک-سازه، دقت روش ساده شده را نیز ببینیم. لازم به ذکر است از آنجاییکه نتایج به صورت بی بعد ارائه شده اند مستقل از تغییرات پریود سازه می باشند. تحلیل مقادیر برای سازه های فوق برای a_0 از ۰/۱ تا ۳ با گام $\frac{\bar{H}_1}{r} = 1, 2, 5$ و ۰/۱ انجام شده است.

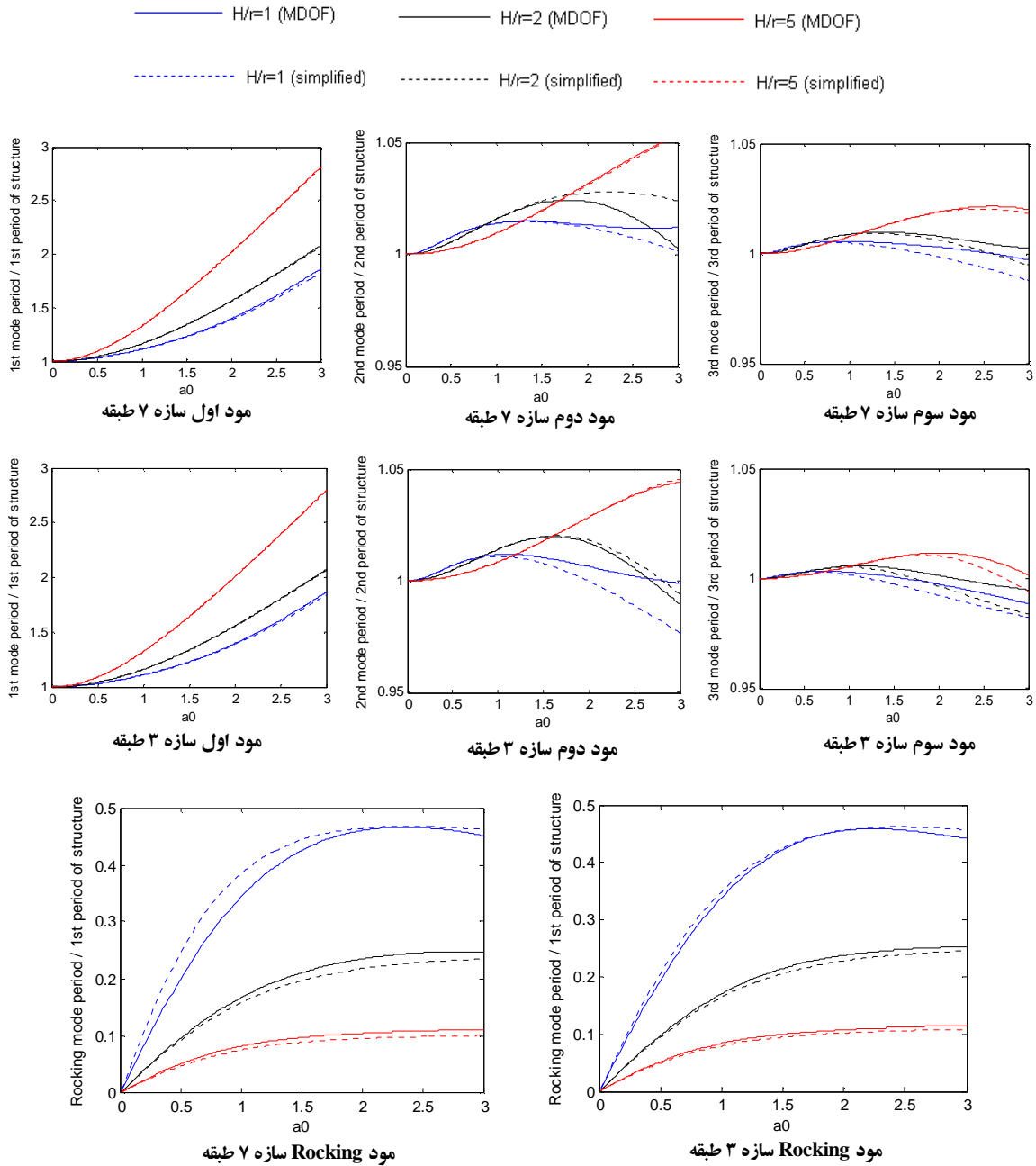
برای انجام تحلیلهای عددی سیستم خاک-سازه، با استفاده از برنامه نویسی در محیط نرم افزار MATLAB استفاده شده است. در برنامه تهیه شده، در هر بار اجرا می توان برای سازه ای با پریود مود اول مشخص و با توزیع جرم و سختی معین، برای یک $\frac{\bar{H}_1}{r}$ خاص، در بازه ای دلخواه از a_0 و با گامهایی دلخواه، سیستم خاک و سازه را تحلیل کرد. به این ترتیب می توان برای بازه وسیعی از a_0 ، تغییرات پریود و میرایی را مشخص نمود. در اینجا باید متذکر شد که چون برنامه در هر گام یک سیستم جدید را از ابتدا تحلیل می کند برای شناسایی مودها و تعقیب روند تغییرات پارامترهای مورد نظر با تغییر a_0 نیاز به یک معیار مناسب دارد. به عبارت دیگر برنامه تشخیص نمی دهد که مود j ام در هر گام تغییر یافته کدام مود در گام قبلی است. در اینجا نمی توان از مرتب کردن مودها بر مبنای پریود استفاده کرد چون پریود مودهای مختلف با افزایش سختی نسبی سازه به خاک (افزایش a_0)، تغییر می کنند و در گامهای مختلف ترتیب مودها بر اساس پریود متفاوت است. برای رفع این مشکل از رابطه زیر که در مرجع [۱۴] ارائه شده است استفاده می کنیم.

$$MAC_{ij} = \frac{(\{\psi_i^o\} \cdot \{\psi_j^n\})^2}{(\{\psi_i^o\}^T \{\psi_i^o\}) (\{\psi_j^n\}^T \{\psi_j^n\})} \quad (18)$$

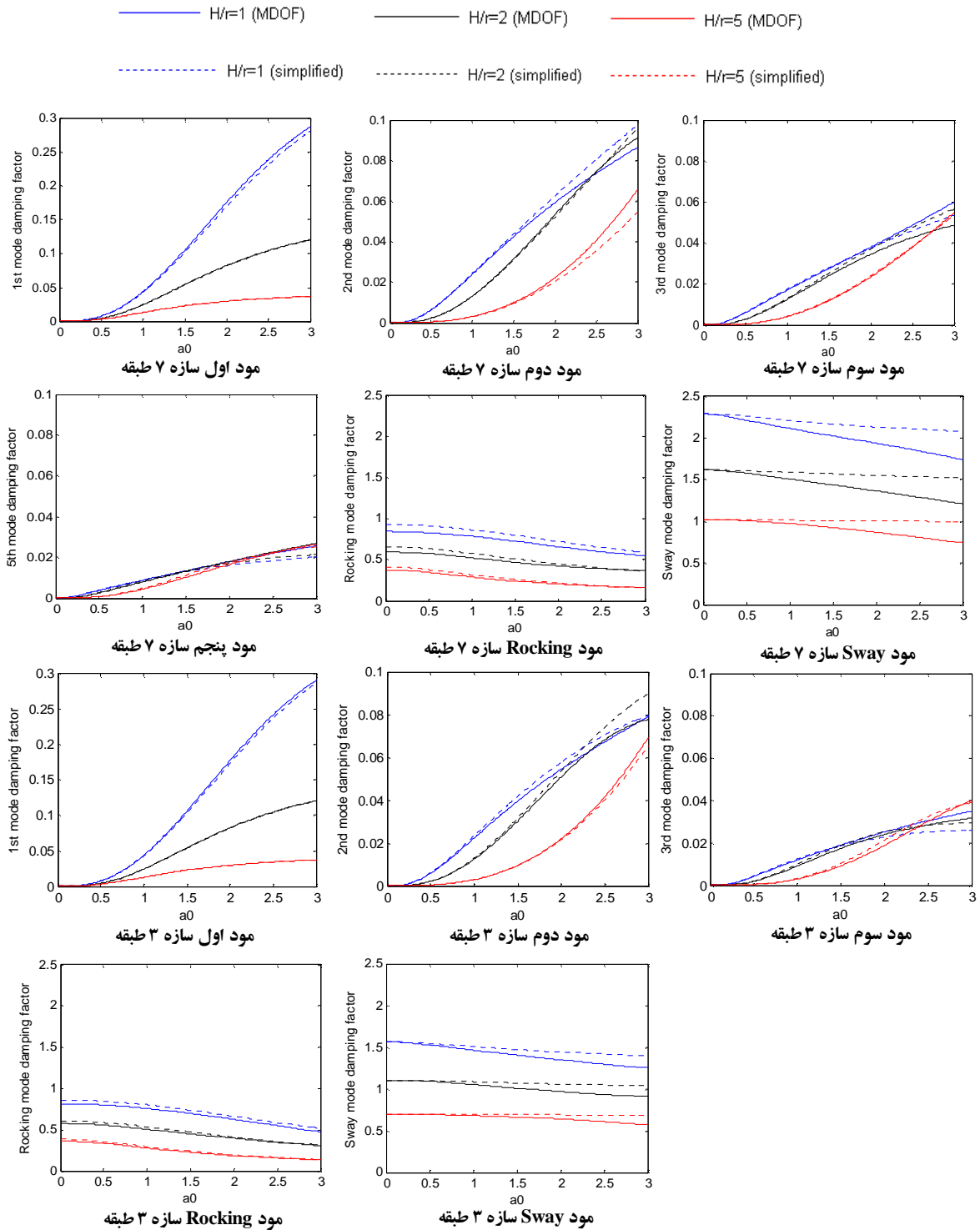
در این رابطه $\{\psi_i^o\}$ شکل مودی مود i ام در گام قبلی و $\{\psi_j^n\}$ شکل مودی مود j ام در گام جدید است. علامت بار بر روی شکل مودی نشان دهنده مزدوج شکل مودی مورد نظر است. علامت نقطه در این رابطه به معنای ضرب داخلی دو بردار است. این رابطه به نوعی کسینوس زاویه بین دو بردار $\{\psi_i^o\}$ و $\{\psi_j^n\}$ را در فضای مختلط N بعدی بیان می کند. بنابراین با محاسبه این مقدار برای $\{\psi_i^o\}$ و تمامی شکلهای مودی در گام جدید، مود جدیدی که نزدیکترین عدد به یک را برای رابطه (۱۸) به دست دهد، مود متناظر با مود i ام در گام قبل است. البته باید متذکر شد که گام a_0 باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود.

۶. تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر پریود میرا و میرایی مودهای ارتعاشی سیستم خاک-سازه

در شکل ۳ نمودارهای پریود و در شکل ۴ نمودارهای میرایی سیستم خاک-سازه آورده شده است. در نمودارهای شکل ۳، محور افقی a_0 و محور قائم پریود میرایی سیستم خاک-سازه است که با تقسیم بر پریود مود متناظر با آن در حالت پای ثابت بی بعد شده است. در نمودار مربوط به مود Rocking، پریود این مود با تقسیم بر پریود مود اول سازه در حالت پای ثابت بی بعد شده است. در این شکلهای نمودار مربوط به پریود مود Sway ترسیم نشده است زیرا این مود در اکثر موارد over-damped است و پریود برای آن بی معنی است. پریود به دست آمده از روش چند درجه آزادی با خط پیوسته و پریود به دست آمده از روش ساده شده با خط چین نمایش داده شده است. این نمودارها برای مودهای اول، دوم، سوم و Rocking رسم شده اند. نمودارهای پریود مودهای بالاتر برای سازه ۷ طبقه به علت تاثیر پذیری بسیار کم از اندرکنش آورده نشده اند.



شکل ۳ - نمودارهای پریود میرای بی بعد شده سیستم خاک و سازه با روش چند درجه آزادی و ساده شده



شکل ۴- نمودارهای میرایی مودهای سیستم خاک و سازه با روش چند درجه آزادی و ساده شده

همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود برای مودهای مختلف تعداد طبقات تاثیر چندانی بر روند نمودارها ندارد. در مود اول با افزایش a_0 پریود میرا همواره افزایش می‌یابد و مقدار آن برای سازه‌های لاغر بیشتر است. در مودهای بالاتر سازه‌ای با افزایش a_0 پریود عموماً ابتدا افزایش و سپس



کاهش می‌یابد و در سازه‌های چاقتر از پریرود حالت پای ثابت هم کمتر می‌شود که این به علت غیرکلاسیک بودن سیستم رخ می‌دهد. برای مودهای سازه‌ای بالاتر، پریرود با افزایش a_0 تغییر زیادی نمی‌کند و می‌توان پریرود حالت پای ثابت را با تقریب خوبی به جای پریرود سیستم خاک و سازه استفاده نمود. در مود Rocking با افزایش a_0 پریرود این مود افزایش می‌یابد و مقدار افزایش پریرود برای سازه‌های چاقتر بیشتر است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌کنیم که مدل ساده شده به خوبی پریرود مودهای مختلف را پیش بینی می‌کند.

همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود برای مودهای مختلف تعداد طبقات تاثیر چندانی بر روند نمودارها ندارد. البته در مود سوم مقداری تفاوت در میرایی سازه ۳ و ۷ طبقه دیده می‌شود ولی در این حالت مقدار میرایی کم است و اختلاف هم تقریباً ناچیز است. در مود اول با افزایش a_0 میرایی همواره افزایش می‌یابد و مقدار آن برای سازه‌های چاق بیشتر است. در تمامی مودهای سازه‌ای میرایی همواره افزایش می‌یابد. در مود Rocking و Sway با افزایش a_0 میرایی این مودها همواره کاهش می‌یابد و مقدار میرایی برای سازه‌های چاقتر بیشتر است، البته مود Sway در اکثر موارد over-damped است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌کنیم که مدل ساده شده به خوبی میرایی مودهای مختلف را پیش بینی می‌کند.

۷. نتیجه گیری

تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی پریرود و میرایی سازه با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه در طیف وسیعی از پارامترهای بدون بعد با دو مدل سازه چند درجه آزادی و مدل ساده شده انجام شد. با بررسی نتایج مشاهده شد که در مود اول با افزایش سختی سازه نسبت به خاک، پریرود و میرایی افزایش می‌یابد و سیستمهای چاقتر پریرود کمتر و میرایی بیشتر دارند. در مودهای بالاتر سازه‌ای تاثیر اندرکنش بر پریرود قابل صرف نظر کردن است ولی میرایی با سخت‌تر شدن سازه نسبت به خاک افزایش قابل توجهی می‌یابد. پریرود مود Rocking با سخت‌تر شدن سازه نسبت به خاک افزایش می‌یابد ولی میرایی آن کاهش می‌یابد. در این مود سیستمهای چاقتر پریرود و میرایی بیشتری دارند. مود Sway اکثراً over-damped است و میرایی آن با سخت‌تر شدن سازه نسبت به خاک کاهش می‌یابد. مدل ساده شده پریرود و میرایی سیستم را به خوبی پیش بینی می‌کند.

۸. مراجع

1. Applied Technology Council, Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings, (1978), ATC-3-06, California.
1. NEHRP, (1994), Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulation for New Buildings, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C..
3. Veletsos, A.V. and Ventura, C., (1986) "Modal analysis of non-classically damped linear systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, pp. 217-243.
4. Novak, M. and El Hifnawy, L., (1983), "Effect of soil-structure interaction on damping of structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11, pp. 595-621.
5. Fukuwa, N., Ghannad, M.A., (1996), "soil-structure interaction effect on the eigen property of structure", Prociding of 11WCEE, Acapulco, Paper No.949, (on CDs).
6. Ghannad, M.A., Fukuwa, N. and Nishizaka, R., (1998), "A study on the frequency and damping of soil-structure system using a simplified model", Journal of Structural Engineering, Architectural Inst. of Japan., Vol. 44B, pp 85-93.
7. Roesset, J.M., Withman, R.V. and Dobry, R., (1973), "Modal analysis of structures with foundation interaction", Journal of Structural Engineering Division, ASCE, Vol. 99, pp. 399-415.
8. Tsai, N.C., (1974), "Modal damping for soil-structure interaction", Journal of Mechanics Engineering Division, ASCE, Vol. 100, pp. 323-341.
9. Wu, W.H. and Smith, H.A., (1995), "Efficient modal analysis for structures with soil-structure interaction", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 24, pp. 283-299.
۱۰. قناد، م.ع.، (۱۳۸۰)، "تاثیر بر هم کنش خاک و سازه بر مودهای بالاتر ارتعاشی سیستم خاک-سازه"، مجموعه مقالات پژوهشی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، ص ص. ۱۷۵-۱۸۳
۱۱. قناد، م.ع.، (۱۳۸۰)، "اثر برهم کنش خاک و سازه بر طراحی ساختمانها در برابر زلزله"، زمین لرزه، شماره هشتم، ص ص. ۱۴-۱۹
12. Wolf, J.P., (1994), Foundation vibration analysis using simple physical models, Prentice-Hall, Englewood cliffs, New Jersey.
13. Caughy, T.H. and O'Kelly, M.E.J., (1965), "Classical normal modes in damped linear dynamic systems", Journal of Applied Mechanics, Vol. 32, pp. 583-588. (Cited from Ref. No. 3)
14. Ewins, D.J., (2000), Modal Testing: Theory, Practice and Application, Research Studies Press
۱۵. آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله - استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۸۴)، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن