



مطالعه اثر اندرکنش خاک- سازه به روش شالوده بدون جرم و مقایسه آن با روش معمول در ساختمان‌های بتنی واقع بر خاک‌های نرم با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی

علی معصومی^۱، حمیدرضا طباطبائی فر^۲

۱- استادیار گروه عمران، دانشگاه تربیت معلم تهران، تهران، خیابان دکتر مفتاح، شماره ۴۹، دانشگاه تربیت معلم،

دانشکده فنی و مهندسی، کدپستی ۱۵۶۱۴، تلفکس: ۸۸۸۳۰۸۹۱

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی، دانشگاه تربیت معلم تهران

massumi@tmu.ac.ir

خلاصه

در این پژوهش با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی، تأثیر اندرکنش خاک- سازه توسط روش شالوده بدون جرم و روش معمول مورد مطالعه و مقایسه قرار می‌گیرد. برای نیل به این هدف، چهار مدل سازه‌ای شامل ساختمان‌های بتن مسلح با قاب خمشی ۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه به عنوان نماینده ساختمان‌های متداول در منطقه‌ای با خطر نسبی لرزه خیزی بسیار زیاد و بر روی یک مدل خاک نرم مورد بررسی قرار گرفته است. قاب‌های خمشی بتن مسلح مورد نظر یک بار با در نظر گرفتن خاک به همراه سازه به روش مستقیم و به شیوه معمول و بار دیگر به روش شالوده بدون جرم مدل‌سازی شده و تحت تأثیر شتاب‌نگاشت‌های حاصل از دو زلزله مختلف، قرار داده شده‌اند. پس از تحلیل، نتایج دو حالت مدل‌سازی برای هر یک از زلزله‌ها با یکدیگر مقایسه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه این حالت‌ها نشان می‌دهد که در مدل‌های مورد مطالعه، عدم استفاده از روش شالوده بدون جرم در مدل‌سازی جهت برآورد نیروها و تغییر مکان‌های سازه، تا حداکثر ده درصد در خلاف جهت اطمینان است.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک- سازه، روش شالوده بدون جرم، تحلیل دینامیکی، قاب‌های خمشی بتن مسلح

مقدمه

طی ربع آخر قرن بیستم، اهمیت در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک- سازه در تحلیل دینامیکی طیف وسیعی از سازه‌های ساخته شده بر روی خاک‌های نرم مورد توجه قرار گرفته و تحلیل اندرکنش خاک- سازه به یک موضوع اساسی در مهندسی زلزله مبدل شده است. اندرکنش خاک- سازه، رفتار لرزه‌ای سازه‌ها را از جنبه‌های مختلف تحت تأثیر قرار می‌دهد که از آن جمله می‌توان به کاهش فرکانس طبیعی سیستم، افزایش میرایی، افزایش تغییر مکان‌های جانبی و کاهش برش پایه سازه اشاره کرد [8,10]. از این رو استفاده از روش‌های تحلیل مناسب و با دقت بالا، نقش مهمی در بررسی اثر اندرکنش خاک- سازه بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها خواهد داشت.

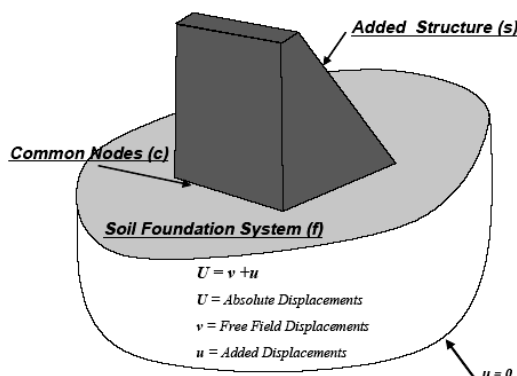
یکی از مناسب‌ترین روش‌های تحلیل دینامیکی سازه‌ها با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک- سازه، روش اجزای محدود یا روش مستقیم (Direct Method) است که در آن معادلات تعادل دینامیکی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک- سازه حل می‌شوند. برای حل این معادلات در نرم‌افزارهایی که دارای امکانات خاص برای لحاظ کردن اثر اندرکنش خاک- سازه هستند، لازم است مشخصات شالوده برای نرم افزار اجزای محدود مشخص شود تا شتاب زلزله به آن قسمت اعمال نگردد. از آنجا که بیشتر نرم افزارهای تحلیل سازه، بارهای لرزه‌ای را به طور خودکار به تمامی درجات آزادی جرمی در مدل رایانه‌ای اعمال کرده و قادر نیستند شالوده را استثنا کنند، بنابراین معادلات تعادل دینامیکی نیز در این حالت حل می‌شود. این عدم توانایی در استثنا کردن شالوده منجر به استفاده از روش شالوده بدون جرم (Mass Less Foundation) گردیده است. در این روش جرم شالوده صفر در نظر گرفته شده و با وجود صرف نظر از نیروهای اینرسی شالوده، بارهای لرزه‌ای به شکل واقعی‌تری به سازه اعمال می‌شوند [9]. هدف پژوهش حاضر بررسی این موضوع است که در محدوده سازه‌های مورد مطالعه، استفاده از روش شالوده بدون جرم تا چه حد بر پاسخ‌های حاصل از تحلیل اندرکنش دینامیکی خاک- سازه به روش اجزای محدود یا روش مستقیم، تأثیرگذار است.

^۱ استادیار گروه عمران، دانشگاه تربیت معلم تهران

^۲ کارشناس ارشد مهندسی خاک و پی

معادله تعادل دینامیکی در حالت سه بعدی برای سیستم خاک-سازه

معادله تعادل دینامیکی یا معادله حرکت برای مدل سه بعدی شامل خاک، شالوده و سازه مانند شکل ۱، به صورت زیر به دست می آید [9]:



شکل ۱- مدل سه بعدی خاک و سازه

در نوشتن معادله‌ها فرض می‌شود که نقاط مدل شکل ۱ به سه دسته تقسیم می‌شوند. در این تقسیم‌بندی نقاط فصل مشترک خاک و سازه با حرف "C"، نقاط روی سازه با حرف "S" و نقاط سیستم شالوده (خاک زیر شالوده) با حرف "F" مشخص می‌شوند. با استفاده از روش مستقیم سختی در تحلیل سازه، معادلات تعادل دینامیکی نیروهای سیستم بر اساس تغییر مکان مطلق به فرم ماتریسی زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_c \\ \ddot{U}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} & 0 \\ K_{cs} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_c \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه (۱) سختی و جرم در نقاط تلاقی خاک و سازه از مجموع مقادیر مربوط به سازه و شالوده و از رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

$$K_{cc} = K_{cc}^{(s)} + K_{cc}^{(f)} \quad \& \quad M_{cc} = M_{cc}^{(s)} + M_{cc}^{(f)} \quad (2)$$

به جهت پرهیز از حل مستقیم معادله‌های فوق، پاسخ دینامیکی سطح زمین بدون حضور سازه یا حرکت میدان آزاد زمین محاسبه می‌شود و سپس حل سه بعدی بر اساس حرکت میدان آزاد زمین صورت می‌پذیرد. تغییر مکان و شتاب کل را می‌توان به شکل زیر بر اساس تغییر مکان و شتاب میدان آزاد زمین نوشت:

$$\begin{bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_c \\ \ddot{U}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \\ \ddot{u}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ \ddot{v}_f \end{bmatrix} \quad \& \quad \begin{bmatrix} U_s \\ U_c \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_s \\ v_c \\ v_f \end{bmatrix} \quad (3)$$

در این صورت رابطه (۱) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_c \\ \ddot{U}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} & 0 \\ K_{cs} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_c \\ U_f \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ \ddot{v}_f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} & 0 \\ K_{cs} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_c \\ v_f \end{bmatrix} = R \quad (4)$$



بر اثر وجود سازه بر روی خاک و به علت صلبیت استاتیکی سازه در حرکت میدان آزاد می‌توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc}^{(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

همچنین حرکت دینامیکی میدان آزاد پی منجر به رابطه (۶) می‌شود:

$$\begin{bmatrix} M_{cc}^{(f)} & 0 \\ 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{v}_c \\ \ddot{v}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{cc}^{(f)} & K_{cf} \\ K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ v_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

بنابراین سمت راست رابطه (۴) به شکل رابطه (۷) در می‌آید:

$$R = \begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc}^{(s)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

همان گونه که مشاهده می‌شود رابطه (۷) شامل جرم شالوده نمی‌باشد، بنابراین معادله تعادل دینامیکی در حالت سه بعدی برای سیستم خاک-سازه با اضافه کردن میرایی به شکل رابطه (۸) در خواهد آمد:

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + K \cdot u = -m_x \cdot \ddot{v}_x(t) - m_y \cdot \ddot{v}_y(t) - m_z \cdot \ddot{v}_z(t) \quad (8)$$

که در این رابطه M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سیستم خاک-سازه هستند. مقادیر u نیز تغییر مکان‌های افزوده به سیستم هستند که مقدارشان بر روی سنگ بستر برابر صفر است. $\ddot{v}_x(t)$ ، $\ddot{v}_y(t)$ و $\ddot{v}_z(t)$ شتاب‌های میدان آزاد زمین در غیاب سازه و m_x ، m_y و m_z جرم سازه در راستای سه محور اصلی می‌باشد.

در حقیقت به علت ضعف اغلب نرم افزارهای تحلیل سازه در شناسایی پی و عدم امکان جلوگیری از اعمال شتاب زمین به آن، روش شالوده بدون جرم که با صفر قرار دادن جرم شالوده شرایط فوق را به معادله تعادل دینامیکی در حالت سه بعدی اعمال می‌کند به وجود آمده است.

نرم افزار مورد استفاده در مدل سازی خاک و سازه

تقسیم یک مدل به قسمت‌های کوچک‌تر و تجزیه و تحلیل آن، ایده تازه‌ای نیست. با جدا کردن اعضا و نوشتن معادلات تعادل و سازگاری می‌توان به سادگی نیروهای داخلی اعضا را محاسبه نمود. این نتیجه از آگاهی کاربر به قوانین حاکم بر هر عضو و همچنین بر هر اتصال حاصل می‌گردد. پس از ساخت رایانه‌هایی با سرعت بسیار بالا، توقع مهندسين از روش‌های تحلیل تغییر کرد. چرا که دیگر مشکل حجم و زمان محاسبات به شکل سابق مطرح نبود و چیزی که در درجه اول اهمیت قرار گرفته روشی بود که برای مسائل مختلف با حداقل تغییر قابل استفاده بوده و محاسبات آن تا حد امکان تکراری باشد. به این ترتیب روند تکراری بودن محاسبات از ویژگی‌های مثبت روش تحلیل محسوب گردید. امروزه با پیشرفت پر شتاب نرم افزارهای تحلیل سازه، بیش از پیش امکان مطابقت شرایط تحلیل با واقعیت (با به کارگیری روش‌هایی مانند روش مستقیم با استفاده از مرزهای اولیه) در مدل‌سازی خاک و سازه جهت تحلیل دینامیکی اندرکنش خاک-سازه برای پژوهشگران فراهم گردیده است.

در این مقاله جهت مدل‌سازی اجزای محدود خاک و سازه و بررسی پدیده اندرکنش دینامیکی آنها از نسخه ۱۰ نرم افزار SAP2000 استفاده شده که نرم افزاری بسیار توانمند در حل مسائل سازه‌ای است. نرم افزار فوق می‌تواند به راحتی محیط خاک را با استفاده از المان‌های حجمی SOLID جهت آنالیز اندرکنش خاک-سازه در حالت دو بعدی و سه بعدی مدل کند [9].

مشخصات مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه

در این پژوهش چهار مدل سازه‌ای ۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه به عنوان نماینده ساختمان‌های واقع در یک منطقه با خطر نسبی لرزه خیزی بسیار زیاد و با مشخصات مندرج در جدول ۱ انتخاب شده‌اند. در انتخاب عرض دهانه سازه سعی شده که این عرض تا حد امکان منطبق بر ضوابط معماری و واقعیت ساخت و سازه‌های ساختمان‌های متداول ساخته شده در شهرهای بزرگ باشد.



جدول ۱- مشخصات هندسی قاب‌های مورد مطالعه

علامت اختصاری مدل	تعداد طبقه	تعداد دهانه	ارتفاع هر طبقه (m)	عرض هر دهانه (m)	ارتفاع کل مدل (m)	عرض کل مدل (m)
S3	3	2	3	4	9	8
S5	5	2	3	4	15	8
S7	7	3	3	4	21	12
S10	10	3	3	4	30	12

قاب‌های فوق ابتدا با فرض قرار گیری ستون بر روی تکیه گاه صلب در نرم افزار SAP2000 مدل‌سازی شده اند. سپس مطابق الزامات مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۲] بارگذاری ثقلی شده و مطابق آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۸۴-۲۸۰۰) [۴] به روش تحلیل طیفی و با استفاده از طیف طرح استاندارد برای زمین نوع IV با نسبت شتاب مبنای $A=0.35$ برای پهنه با خطر نسبی بسیار زیاد بارگذاری لرزه‌ای و تحلیل شده اند. سرانجام مقاطع سازه‌ای براساس آیین نامه بتن ایران (آبا) [۶] طراحی شده‌اند. مقاطع طراحی شده با توجه به ضوابط بندهای ۲-۵-۳ و ۲-۵-۴ آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۸۴-۲۸۰۰) [۴] برای تغییر مکان جانبی نسبی طبقات کنترل شده و برای مدل‌سازی به همراه خاک، مقاطع بتن مسلح قاب‌ها مشخص شدند. در تحلیل و طراحی از بتن و آرماتور با مشخصات جدول ۲ استفاده شده است.

جدول ۲- مشخصات بتن و آرماتور مورد استفاده در طراحی قاب‌ها

مقاومت فشاری بتن $f_c (kg/cm^2)$	تنش تسلیم آرماتور $f_y (kg/cm^2)$	مدول الاستیسیته آرماتور (kg/cm^2)	مدول الاستیسیته بتن (kg/cm^2)	نسبت پواسون بتن ν
250	4200	210000	250000	0.2

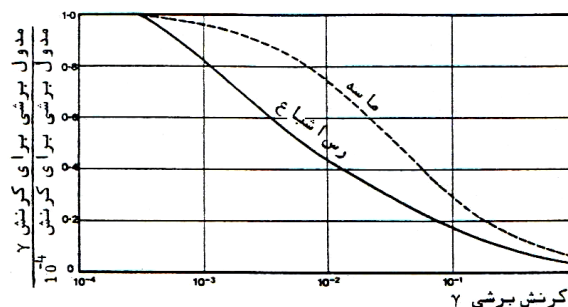
ویژگی‌های خاک مورد استفاده

در این تحقیق از یک مدل خاک به عنوان نماینده زمین نوع IV مطابق طبقه بندی آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۸۴-۲۸۰۰) [۴] استفاده شده است. از آنجا که در ساختمان‌های قابی متکی بر خاک‌های نرم که سرعت موج برشی در آنها کمتر از ۱۷۵ متر بر ثانیه است، تأثیر اندرکنش خاک و سازه قابل ملاحظه می‌باشد [۳]، پژوهش حاضر صرفاً در این محدوده متمرکز شده است. مشخصات خاک مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است. ویژگی‌های خاک مورد استفاده از مطالعات ژئوتکنیک که در محل یک پروژه واقعی انجام شده، استخراج گردیده است و از این رو بر پارامترهای فرضی، که امکان عدم تطابق آنها با واقعیت وجود دارد، برتری دارند [۸].

جدول ۳- مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های مورد استفاده در مطالعه

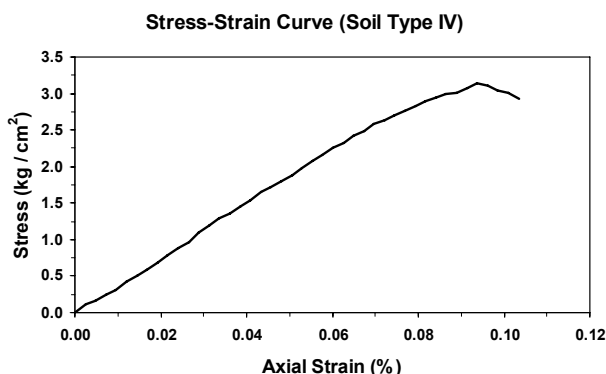
نوع خاک	سرعت موج برشی $V_s (m/s)$	مدول الاستیسیته $E (kg/cm^2)$	مدول برشی ماکزیمم $G_{max} (kg/cm^2)$	جرم حجمی $\rho (kg.s^2/m^4)$	نسبت پواسون ν	گروه خاک در طبقه بندی متحد	عدد SPT
IV	150	935	335	150	0.40	CL	$5 < N < 10$

سرعت موج برشی مذکور در جدول ۳ از آزمایش Down hole که یک آزمایش با کرنش کم می‌باشد به دست آمده است. این آزمایش کرنش برشی حدود 10^{-4} درصد تولید می‌نماید که مدول برشی به دست آمده از آن به G_{max} معروف است [۵]. نظر به این که بر اثر وقوع زلزله‌های بزرگ مقدار کرنش برشی حدود 10^{-1} درصد می‌باشد [۱]، مدول برشی مورد استفاده برای همه انواع خاک در مدل‌سازی برای کرنش 10^{-1} درصد از منحنی‌های شکل ۲ استخراج شده و در تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲- رابطه بین مدول برشی و کرنش برای خاک ماسه‌ای و رس اشباع [۱]

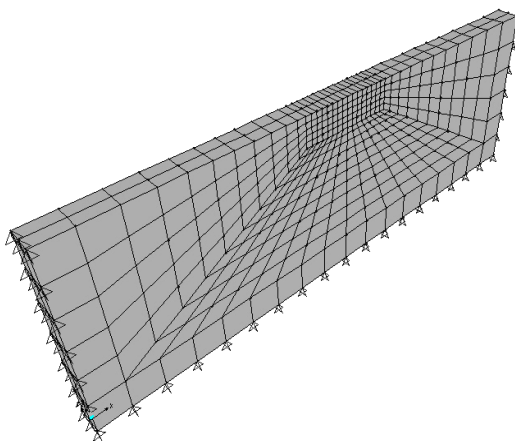
جهت اعمال رابطه تنش- کرنش خاک از نتایج آزمایش سه محوری بر روی نمونه دست نخورده خاک که از جمله آزمایش‌های با کرنش زیاد آزمایشگاهی [۵] محسوب می‌شود، مطابق منحنی‌های شکل ۳ در مدل رایانه‌ای استفاده شده است.



شکل ۳- منحنی تنش- کرنش خاک

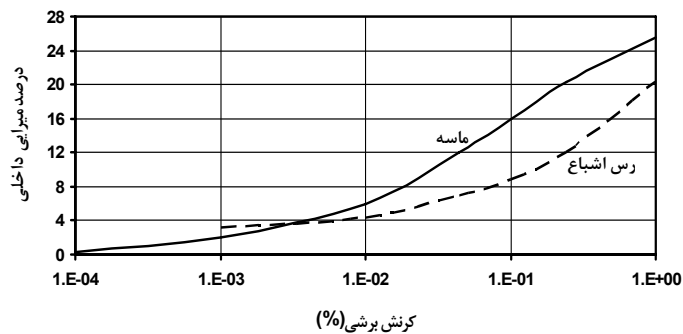
روش مدل‌سازی خاک و سازه جهت تحلیل اندرکنش خاک- سازه

مدل‌سازی خاک به روش اجزای محدود با استفاده از مرزهای اولیه یکی از واقعی‌ترین و مناسب‌ترین تکنیک‌های مدل‌سازی خاک در بررسی اندرکنش خاک- سازه می‌باشد، زیرا محیط خاک تا فواصل دور مدل می‌شود و در نتیجه نتایج تحلیل بیش از سایر حالات به واقعیت نزدیک است. یکی از اشکالات این روش بالا بودن حجم و زمان محاسبات ذکر شده که خوشبختانه این اشکال نیز با در دسترس بودن کامپیوترهایی با سرعت بسیار بالا و نرم افزارهای توانمندی مانند آنچه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته، قابل حل است. در نتیجه در این پژوهش به جهت تطابق هر چه بیشتر شرایط مدل‌ها با طبیعت مسئله اندرکنش خاک- سازه از مدل‌سازی خاک به روش مستقیم به همراه مرزهای اولیه بهره گرفته شده است [۳]. اجزای سازه‌ای بتن مسلح به صورت المان‌های خمشی خطی (FRAME) و خاک به صورت المان‌های چهار گرهی سه بعدی (SOLID) در نرم افزار SAP2000 مدل‌سازی شده اند. عرض المان‌های خاک ۴ متر در نظر گرفته شده که برابر فاصله قاب‌ها در پلان نسبت به یکدیگر است. مرزهای مدل اجزای محدود خاک از نوع مرزهای اولیه فرض شده است. این مرزها انرژی را جذب نمی‌کنند و برای تقلیل تأثیر امواج انعکاسی باید فاصله تا مرز را افزایش داد، به همین علت طبق توصیه گش و ویلسون [7] فاصله افقی مرزهای خاک تا محور عمودی سازه ۴۵ متر از هر طرف (طول ناحیه مدل شده خاک ۹۰ متر) مدل شده است. فاصله قائم این مرزها در مدل از روی بستر سنگی تا زیر پی می‌باشد. عمق بستر سنگی برای کلیه خاک‌های مورد بررسی ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. همچنین در محل گره‌های مرزی خاک شرایط تغییر مکان صفر برقرار شده است (شکل ۴).



شکل ۴- مدل اجزای محدود خاک با شرایط مرزی تغییر مکان صفر

با مدل‌سازی به روش فوق و در نظر گرفتن مرزهای اولیه برای مدل خاک، به علت مدل شدن خاک تا فواصل دور از مرکز سازه، اثر میرایی هندسی در تحلیل دینامیکی لحاظ خواهد شد. لیکن میرایی داخلی خاک که طبق مطالعات ادریس و سید در سال ۱۹۷۰ تابعی از دامنه کرنش و نوع خاک است [۱] از منحنی مربوط به خاک رس در شکل ۵ استخراج شده و به مدل اجزای محدود خاک اعمال شده است.



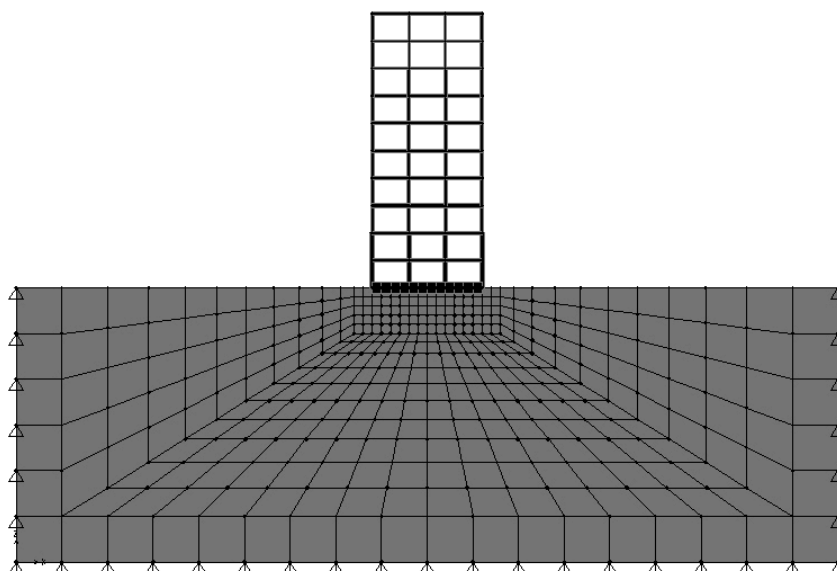
شکل ۵- رابطه میرایی داخلی و کرنش برشی برای ماسه و رس اشباع [۱]

تحلیل دینامیکی مدل‌ها

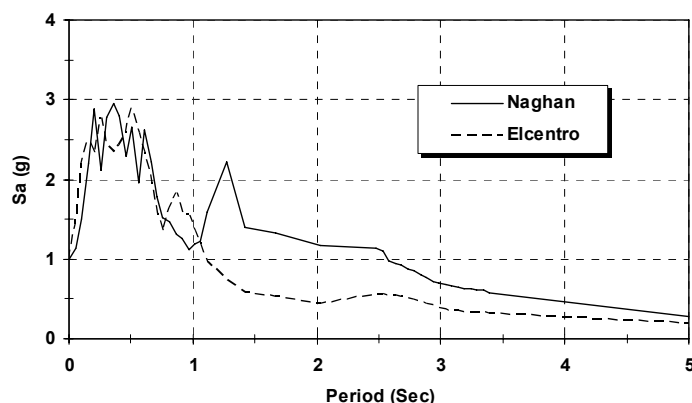
از آنجا که هدف این پژوهش مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی سازه‌ها با در نظر گرفتن پدیده اندرکنش خاک-سازه به روش مستقیم با روش شالوده بدون جرم است، لذا چهار مدل سازه‌ای انتخاب شده به همراه مدل اجزای محدود خاک، یک بار به روش مستقیم و بار دیگر با فرض جرم صفر برای خاک یا روش شالوده بدون جرم (شکل ۶) مدل‌سازی شده است. مدل‌ها تحت تأثیر شتابنگاشت زلزله‌های مندرج در جدول ۴ (که طیف پاسخ شتاب آنها برای نسبت میرایی ۵٪ و مقیاس شده به ۱ برای زمان تناوب صفر، در شکل ۷ نشان داده شده است) به روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، مورد تحلیل قرار گرفتند.

جدول ۴- مشخصات شتابنگاشت‌های زلزله‌های اعمالی بر مدل‌های مورد مطالعه

ردیف	ایستگاه	بزرگای محلی (ریشتر)	مدت زمان وقوع (ثانیه)	سال وقوع	مشخصات مرکز زلزله
۱	ناغان - ایران	6.1	20.96	1977	31.94N 50.74E
۲	السنترو - آمریکا	6.3	31.18	1940	32.82N 115.68E



شکل ۶- مدل‌سازی قاب به همراه خاک در روش مستقیم و روش شالوده بدون جرم



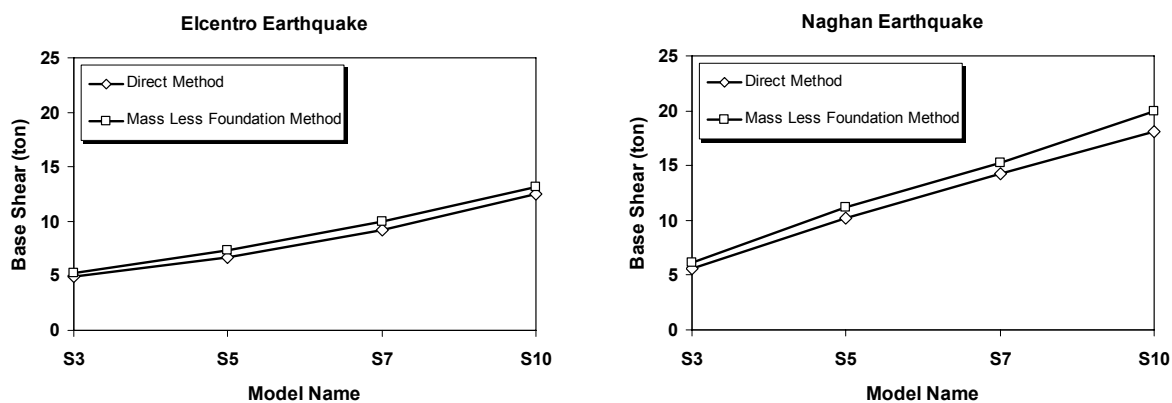
شکل ۷- طیف پاسخ شتاب زلزله‌های اعمالی به مدل‌ها با نسبت میرایی ۵٪ (مقیاس شده به ۱ برای زمان تناوب صفر)

نتایج حاصل از تحلیل

پس از تحلیل دینامیکی مدل‌ها به دو روش فوق و مقایسه نتایج، مشخص شد که برش پایه حاصل از تحلیل مدل‌ها به روش مستقیم بین ۵ تا ۱۰ درصد کمتر از برش پایه حاصل از تحلیل مدل‌ها به روش شالوده بدون جرم است. این نتایج در شکل‌های (۸- الف و ب) مشخص شده‌اند.

همچنین با مقایسه تغییر مکان حداکثر به دست آمده از تحلیل دینامیکی مدل‌ها به دو روش مذکور، مشخص شد که تغییر مکان حداکثر سازه حاصل از تحلیل مدل‌ها به روش مستقیم نیز حداکثر بین ۵ تا ۱۰ درصد از مقادیر مشابه حاصل از تحلیل مدل‌ها به روش شالوده بدون جرم، کمتر هستند. این نتایج نیز در شکل‌های (۹- الف و ب) مشخص شده‌اند.

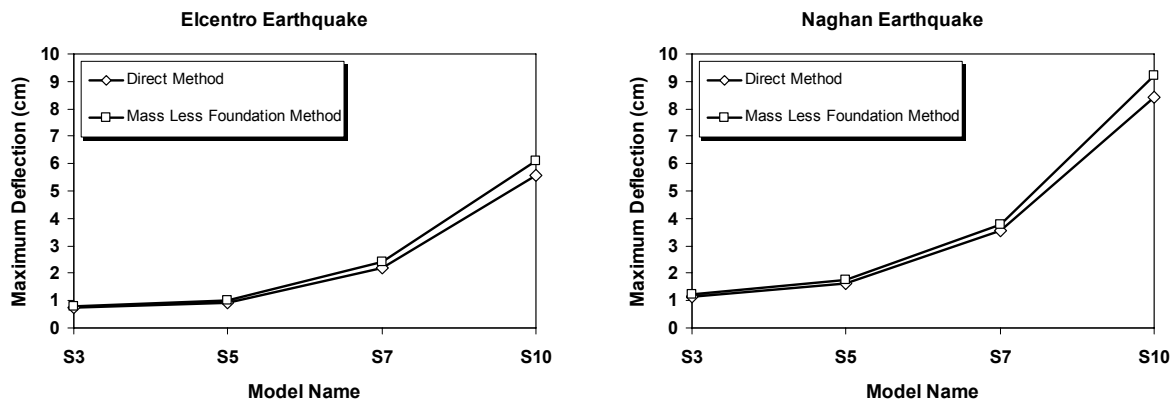
با توجه به موارد فوق می‌توان به این نتیجه رسید که در محدوده سازه‌های قابی بتن مسلح مورد مطالعه (تا حداکثر ۱۰ طبقه) که متکی بر خاک نرم می‌باشند، در صورتی که با استفاده از روش مستقیم در نرم افزارهای اجزای محدود، شتاب میدان آزاد زمین علاوه بر جرم سازه، به جرم شالوده نیز وارد شود، خطای ایجاد شده در حل معادله تعادل دینامیکی اندرکنش خاک- سازه (رابطه ۸) بین ۵ تا ۱۰ درصد، در خلاف جهت اطمینان، خواهد بود. به نظر می‌رسد در محدوده سازه‌های مورد مطالعه با افزودن ۱۰٪ به پاسخ سازه‌ها در تحلیل مستقیم، می‌توان به نتایجی مانند نتایج حاصل از حل دقیق معادله‌های تعادل دینامیکی با متمایز نمودن جرم شالوده یا صفر در نظر گرفتن آن، دست یافت.



(ب) تحلیل با شتاب نگاشت زلزله السنترو

(الف) تحلیل با شتاب نگاشت زلزله ناغان

شکل ۸- مقایسه برش پایه حاصل از تحلیل مدل‌ها به روش مستقیم و روش شالوده بدون جرم



(ب) تحلیل با شتاب نگاشت زلزله السنترو

(الف) تحلیل با شتاب نگاشت زلزله ناغان

شکل ۹- مقایسه تغییر مکان حداکثر سازه حاصل از تحلیل مدل‌ها به روش مستقیم و روش شالوده بدون جرم

نتیجه‌گیری

از بررسی نتایج تحلیل‌ها و مقایسه آنها در محدوده سازه‌های قابی بتن مسلح مورد مطالعه متکی بر خاک‌های نرم که سرعت موج برشی در آنها کمتر از ۱۷۵ متر بر ثانیه است، چنین بر می‌آید که:

- برش پایه و تغییر مکان حداکثر سازه که از تحلیل مدل‌ها به روش مستقیم (Direct Method) به دست می‌آیند، بین ۵ تا ۱۰ درصد کمتر از مقادیر مشابه حاصل از تحلیل مدل‌ها به روش شالوده بدون جرم (Mass Less Foundation Method) هستند.
- به نظر می‌رسد در محدوده سازه‌های مورد مطالعه با افزایش ۱۰ درصدی پاسخ سازه‌ها در تحلیل مستقیم، می‌توان به نتایجی مانند نتایج حاصل از حل دقیق معادله‌های تعادل دینامیکی با متمایز نمودن جرم شالوده یا صفر در نظر گرفتن آن، دست یافت.

مراجع

۱. برگی، خسرو؛ اصول مهندسی زلزله، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم، ۱۳۸۴.
۲. دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مقررات ملی ساختمان مبحث ششم (بارهای وارد بر ساختمان)، وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت نظام مهندسی و اجرای ساختمان، ۱۳۸۰.
۳. طباطبایی‌فر، حمید رضا؛ بررسی تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح شکل پذیر با سیستم قاب خمشی؛ پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی، تهران: دانشگاه تربیت معلم تهران، ۱۳۸۶.
۴. کمیته دائمی بازنگری آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۸۴-۲۸۰۰، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
۵. میرحسینی، مجدالدین و بابک عارف پور؛ مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای، تهران پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۸.
۶. معاونت امور فنی، دفتر فنی و تدوین معیارها، آیین نامه بتن ایران (آبا)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۷۹.

7. Ghosh, S. and Wilson, E. L. (1969) *Analysis of Axi-symmetric Structures Under Arbitrary Loading*, EERC Report No. 69-10, University of California. Berkeley, U.S.A.
8. Massumi, A. and Tabatabaiefar, H. R. (2007) Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Behavior of Ductile Reinforced Concrete Moment Resisting Frames, *Proceedings of World Housing Congress on Affordable Quality Housing (WHC2007): Challenges and Issues in the Provision of Shelter for All*, Housing Research Center, Faculty of Engineering, Universiti Putra Malaysia (UPM), Terengganu, Malaysia, (2007).
9. Computer & Structure Inc. (2007) *Soil-Structure Interaction*. http://www.csiberkeley.com/support_technical_papers.html.
10. Wakabayashi, M. (1985) *Design of Earthquake-Resistant Buildings*, Mc Graw-Hill (TX).