

بررسی اثرات رفتار غیرخطی خاک بر پاسخ دینامیکی سازه های بلند

بهرروز گتمیری

دانشیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

حمیدرضا تاج الدینی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۱/۶/۱۵، تاریخ تصویب ۸۲/۴/۱۴)

چکیده

مدارک مستند فراوانی بر اساس مطالعات دفتری و مشاهدات میدانی وجود دارد که نشان می دهد محیط خاکی زیرین سازه ها و پدیده اندرکنش خاک و سازه، در هنگام وقوع زلزله، نیروهای لرزه ای وارد به سازه را افزایش داده بطوری که این افزایش، در موارد زیادی به خرابی و فروریزش سازه ها منجر شده است. در این مقاله سعی شده است اثرات رفتار غیرخطی خاک بر پاسخ دینامیکی سازه های بلند، با در نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، توضیح داده شود. ضرورت انجام اینکار بدلیل تأثیراتی است که در برآورد نیروهای طراحی لرزه ای وارد به سازه ها و در نتیجه تعیین اندازه های مقاطع سازه ای دارد. به این منظور مدل های گوناگون سیستم های اندرکنش خاک و سازه با پارامترهای هندسی و رفتاری و همچنین محیط های لرزه ای متفاوت در نظر گرفته شده و تحلیل اندرکنش دینامیکی آنها بروش تفکیک زیرسازه ها انجام گرفته است. با استفاده از نتایج تحلیلها، روند تغییرات شتاب پاسخ طیفی سازه نسبت به پارامترهای حاکم بر مسأله از قبیل، سختی نسبی سازه به خاک و سطح شتاب ورودی برآورد شده و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از روشهای متداول تحلیل دینامیکی سازه ها مقایسه گردیده است. نتایج حاصل از مطالعات فوق به صورت کمی نشان می دهد که رفتار غیرخطی خاک زیرین سازه ها، به ویژه برای ساختمانهای بلند قرار گرفته بر خاک نرم، می تواند پاسخ دینامیکی سازه ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد طوری که در برخی موارد این افزایش به حدی زیاد است که برای برآورد نیروهای طراحی لرزه ای وارد به سازه، نیاز به انجام تحلیل های اندرکنش دینامیکی خاک و سازه بوده و اکتفا به نتایج حاصل از تحلیل های متداول دینامیکی سازه ها منجر به طرح نایمن سازه می گردد.

واژه های کلیدی: غیرخطی، اندرکنش دینامیکی، تفکیک زیر سازه ها، پاسخ طیفی، سطح شتاب، سختی نسبی

مقدمه

در تحلیل های متداول دینامیکی یک سازه، روش معمول به این صورت است که حرکت میدان آزاد زمین در محل ساختگاه تعیین شود و سپس حرکت به دست آمده به پای سازه، زمانی که به صورت صلب در نظر گرفته شده باشد، اعمال شود [۱]. این مورد در حالتی صحیح است که ساختمان بر سنگ بنا شده باشد. در حالت قرار گرفتن سازه بر خاک نرم، وضعیت کاملاً متفاوت است. در این حالت، در هنگام وقوع زلزله، رفتار غیر خطی خاک زیرین و وقوع پدیده اندرکنش خاک و سازه، در پاسخ سازه ای به صورتی نتیجه می دهد که می تواند کاملاً متفاوت از پاسخ یک سازه با پای صلب قرار گرفته تحت اثر حرکت میدان آزاد زمین باشد.

مطالعات انجام شده بوسیله محققین مختلف [۱،۲] و مدارک مستندی بر اساس مشاهدات انجام شده

در ساختگاههای مختلف، نشان می دهند رفتار غیرخطی خاک ساختگاه و پدیده اندرکنش خاک و سازه می تواند علیرغم افزایش میرایی، به افزایش پاسخ سازه ای بیانجامد و باعث افزایش نیروهای لرزه ای وارد به سازه شود. بر اساس نتایج مطالعات فوق الذکر لازم است اثرات رفتار غیرخطی خاک بر پاسخ سازه ای به صورت کمی برآورد گردد.

روشهای متعددی برای حل مسأله اندرکنش دینامیکی خاک و سازه وجود دارد که از جمله آنها می توان به روشهای حل ساده مهندسی، روش مستقیم، روش مختلط و روش زیرسازه اشاره کرد. [۳،۴،۵،۶،۷]. متداولترین روش حل مسأله اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، روش زیرسازه است. در این روش، مسأله خطی اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، به یکسری زیرمسأله ساده ترتفکیک می شود و هر زیرمسأله با مناسبترین روش

$$\{\hat{Q}\} = \{Q\} \exp(i\omega t) \quad (2)$$

$$\{\hat{u}\} = \{u\} \exp(i\omega t) \quad (3)$$

وقتی که $\{Q\}$ و بردارهای مختلط نیرو و جابجایی در فرکانس ω هستند. نتیجتاً، برای هر فرکانس، معادله های حرکت فرم زیر را خواهند داشت.

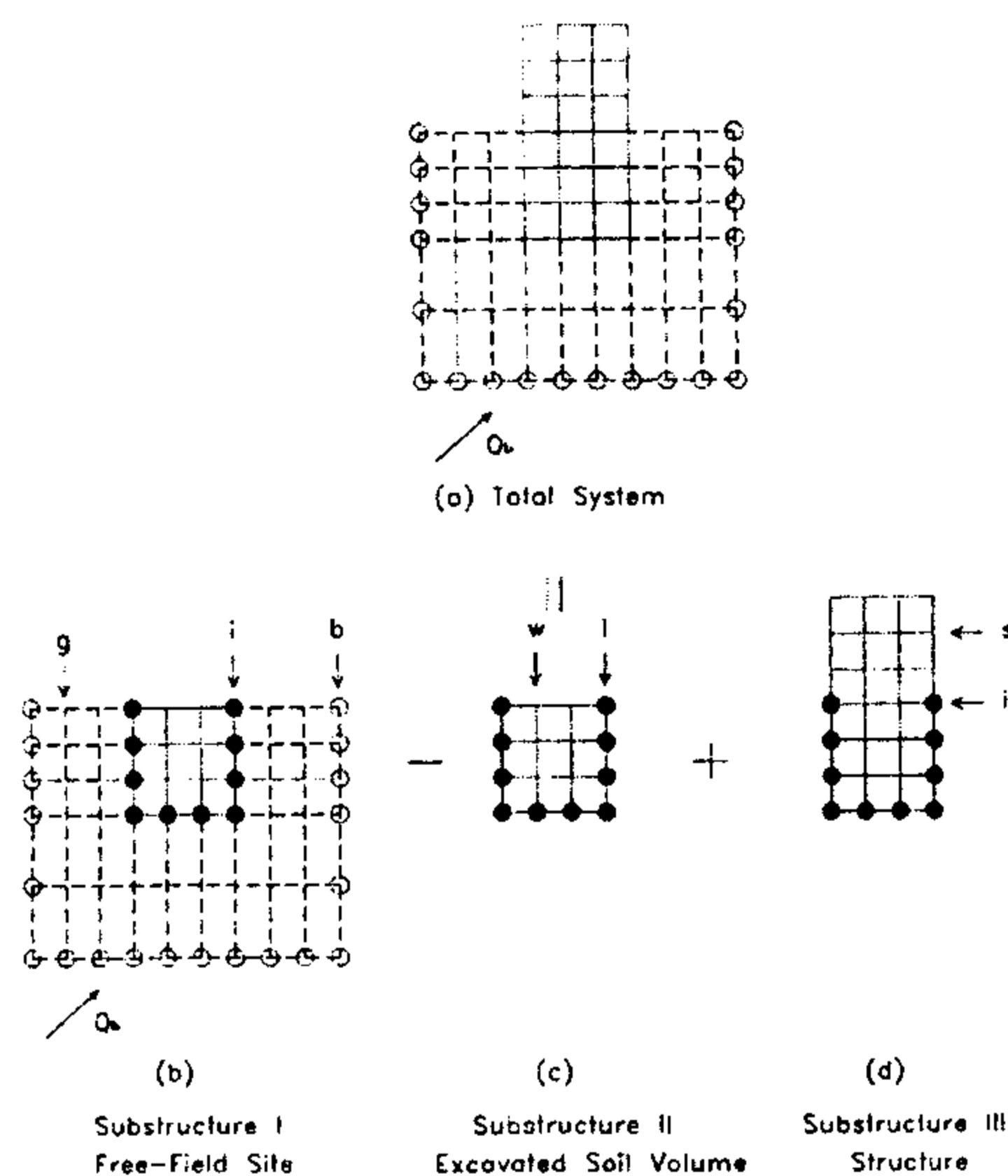
$$[C]\{\hat{u}\} = \{\hat{Q}\} \quad (4)$$

$$[C] = [K] - \omega^2 [M] \quad (5)$$

معادله حرکت برای سیستم اندرکنش خاک-سازه، بصورت زیر تفکیک می شود:

$$\begin{bmatrix} C_{ii}^{III} - C_{ii}^{II} + X_{ii} & -C_{iw}^{II} & C_{is}^{III} \\ -C_{wi}^{II} & -C_{ww}^{II} & 0 \\ C_{si}^{III} & 0 & C_{ss}^{III} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_w \\ u_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ii} u_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

وقتی که اندیسهای I، II و III مربوط به سه زیرسازه و اندیسهای I، W و S، به ترتیب، مربوط به درجات آزادی متناظر با گره های موجود در مرز خاک و سازه، حجم خاک برداشته شده و قسمت رویی سازه می باشند (شکل ۱).



شکل ۱: جداسازی زیرسازه ها به منظور ساده کردن محاسبات [۴].

در سمت چپ معادله، ماتریس سختی مختلط دینامیکی، وابسته به فرکانس، به سادگی نشان میدهد که بر اساس تقسیم بندی فوق، ماتریس سختی حجم خاک

تحلیل می شود و سپس نتایج حاصله، با استفاده از اصل جمع آثار قوا، با هم ترکیب می شوند.

با توجه به اینکه روش زیرسازه، یک روش خطی تحلیل اندرکنش است برای در نظر گرفتن اثرات رفتار غیرخطی خاک، می توان از روش خطی معادل استفاده کرد. [۸] در این تحقیق، سیستم خاک و سازه در نظر گرفته شده شامل سازه بلند فولادی با دو نوع سیستم متداول مقاوم جانبی، بادبندی و قاب خمشی، است که بر روی یک سیستم خاک لایه ای، قرار گرفته بر بستر سنگی، واقع شده است. تحلیل اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، برای ترکیبهای مختلف سازه، ساختگاه و محیطهای لرزه ای متفاوت با استفاده از روش زیرسازه انجام شده است و با استفاده از نتایج بدست آمده از تحلیلها، روند تغییرات بزرگنمایی پاسخ سازه ای نسبت به پارامترهای حاکم بر مسأله از قبیل سختی نسبی سازه و خاک و همچنین سطح شتاب ورودی، برآورد گردید. بر اساس مطالعات انجام شده نتایج قابل توجهی بدست آمده است.

معادلات حرکت

متداولترین روش حل مسأله اندرکنش خاک و سازه، تحلیل بر اساس روش زیرسازه است. در این روش، مسأله خطی اندرکنش خاک-سازه به یک سری زیرمسأله ساده تر تفکیک می شود و سپس نتایج با استفاده از اصل جمع آثار قوا با هم ترکیب می شوند.

در روش جداسازی و تفکیک زیرسازه ها [۶] کل سیستم خاک-سازه، نشان داده شده در شکل شماره (۱)، به سه زیرسازه تفکیک می شود. زیرسازه I شامل میدان آزاد ساختگاه است؛ زیرسازه II شامل حجم خاک برداشته شده و زیرسازه III شامل سازه رویی و پی آن است.

در روش تفکیک زیرسازه ها، فرض بر این است که اندرکنش خاک و سازه فقط در مرز مشترک زیرسازه ها، سطح تماس پی با خاک، رخ می دهد. معادله حرکت زیر سازه های نشان داده شده در شکل شماره (۱)، می تواند به فرم ماتریسی زیر نوشته شود:

$$[M]\{\hat{u}\} + [K]\{\hat{u}\} = \{\hat{Q}\} \quad (1)$$

برای تحریک اعمالی هارمونیک، با فرکانس ω ، بردار بار و جابجایی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$[A_i] = \frac{h_i}{6} \begin{bmatrix} 2(\lambda_i + 2G_i) & 0 & (\lambda_i + 2G_i) & 0 \\ 0 & 2G_i & 0 & G_i \\ (\lambda_i + 2G_i) & 0 & 2(\lambda_i + 2G_i) & 0 \\ 0 & G_i & 0 & 2G_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[B_i] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -(\lambda_i - G_i) & 0 & (\lambda_i + G_i) \\ (\lambda_i - G_i) & 0 & (\lambda_i + G_i) & 0 \\ 0 & -(\lambda_i + G_i) & 0 & (\lambda_i - G_i) \\ -(\lambda_i + G_i) & 0 & -(\lambda_i - G_i) & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[G_i] = \frac{1}{h_i} \begin{bmatrix} G_i & 0 & -G_i & 0 \\ 0 & (\lambda_i + 2G_i) & 0 & -(\lambda_i + 2G_i) \\ -G_i & 0 & G_i & 0 \\ 0 & -(\lambda_i + 2G_i) & 0 & (\lambda_i + 2G_i) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[M_i]^{(1)} = \frac{\rho_i h_i}{6} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad [M_i]^{(2)} = \frac{\rho_i h_i}{6} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

ماتریسهای $[M_i]^{(1)}$ و $[M_i]^{(2)}$ ، ماتریسهای جرم پیوسته^۳ و جرم متمرکز^۴ می باشند. با استفاده از تکنیکهای عددی، پیشنهاد شده بوسیله واس، معادله مقدار ویژه شماره (۷) می تواند حل شود. از حل معادله؛ $2n$ مود رایلی و $2n$ عدد موج بدست می آید که از آنها در محاسبه شرایط مرزهای جاذب انرژی^۵، در حالت وجود حرکات تغییر شکلی امواج در صفحه مدل سیستم، استفاده خواهد شد. بر اساس مدل خاک لایه ای، مسأله مقدار ویژه برای حرکت موج لاو می تواند به فرم زیر نوشته شود:

$$([A]K^2 + [G] - \omega^2[M])\{V\} = 0 \quad (12)$$

در این شکل موج؛ در مرز هر لایه فقط یک درجه آزادی وجود دارد. ماتریسهای $[A]$ ، $[B]$ ، $[G]$ و $[M]$ از ماتریسهای زیر حاصل می شوند:

$$[A_i] = h_i G_i \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[G_i] = \frac{G_i}{h_i} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[M_i]^{(1)} = \frac{\rho_i h_i}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[M_i]^{(2)} = \frac{\rho_i h_i}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

برداشته شده از سختی دینامیکی سازه و میدان آزاد تفریق شده است. ماتریس وابسته به فرکانس $[X_{ff}]$ ، ماتریس امپدانس نامیده می شود که از مدل زیر سازه I بدست می آید. بردار $\{u_i\}$ یا $\{u_r\}$ از حرکت میدان آزاد ساختگاه، در نقاط اندر کنشی نشان داده شده در زیر سازه I، بدست می آیند. در محاسبات تحلیل امپدانس و محاسبه بردار بار خارجی، اندرکنش در درجات آزادی i در نظر گرفته می شود.

الف- حل مسأله پاسخ ساختگاه

برای حل مسأله پاسخ ساختگاه، لازم است که مسأله مقدار ویژه برای مدل ساخته و حل شود. در محاسبات مربوط به امواج حجمی از زیر ماتریسهای محاسبه شده از مشخصات هر لایه، برای تشکیل دادن معادلات مقدار ویژه استفاده می شود.

واس [۹]، بر اساس مدل ساختگاه با لایه های افقی، و فرض تغییرات خطی تغییرشکل داخل هر لایه؛ مسأله مقدار ویژه برای سیستم را، در حوزه فرکانس نوشته است. مسأله مقدار ویژه می تواند به دو مسأله مقدار ویژه جبری مجزا، یکی برای حرکت موج رایلی^۱ و دیگری برای حرکت موج لاو^۲، تقسیم شود.

با استفاده از مدل خاک تفکیک شده، معادله مقدار ویژه برای حرکت موج رایلی؛ میتواند به فرم ماتریسی زیر نوشته شود:

$$([A]K^2 + [B]K + [G] - \omega^2[M])\{V\} = 0 \quad (7)$$

در این مدل، در هر مرز بین دو لایه، دو درجه آزادی وجود دارد، در نتیجه هر سیستم n لایه؛ $2n$ درجه آزادی خواهد داشت.

در معادله قبل، ω فرکانس زاویه ای ارتعاش مدل، و K مقدار ویژه است و $\{V\}$ بردار ویژه $2n$ مؤلفه ای متناظر است. ابعاد ماتریسهای $[A]$ ، $[B]$ ، $[G]$ و $[M]$ ؛ $2n \times 2n$ است و این ماتریسها از جمع کردن ماتریسهای مربوط زیر لایه ها بدست می آیند. اگر عمق لایه z ام از بالا h_j ، جرم حجمی آن ρ_j ، مدول برشی آن G_j و ثابت لامه آن λ_j باشد، این زیر ماتریسها به صورت زیر هستند:

ماتریسهای $[A]$ ، $[G]$ و $[M]$ از جمع زیر ماتریسهای، تعریف شده در روابط (۸)، (۱۰) و (۱۱) بدست می آیند. ماتریس $[B]$ از جمع زیر ماتریسهای $[\bar{B}_j]$ ، تعریف شده به صورت زیر، بدست می آید:

$$[\bar{B}_j] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & (3G_j - M_j) & 0 & -(G_j - M_j) \\ (3G_j - M_j) & 0 & (G_j - M_j) & 0 \\ 0 & (G_j - M_j) & 0 & (3G_j - M_j) \\ -(G_j - M_j) & 0 & (3G_j - M_j) & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

وقتی که M_j و G_j مدولهای مقید کننده و برشی لایه لازم می باشند؛ بردار $\{P_b\}$ یک بردار دو مؤلفه ای است که بردار بار در پایین لایه (بستر سنگی) را تعریف می کند. از حل معادله (۲۰) بردار تغییر مکان $\{u\}$ بدست می آید.

حرکت میدان آزاد، در هر فاصله x ، می تواند با استفاده از معادله زیر بدست آورده شود:

$$\{u(x)\} = \delta \cdot \{u\} \cdot \exp(-ikx) \quad (22)$$

δ ضریب مشارکت مودی است که با اعمال حرکت کنترل در نقطه کنترل محاسبه می شود. نیم فضای نیم بینهایت را، در صورت وجود، می توان به وسیله دو روش عمق متغیر و مرز لزوج در پایه مدلسازی کرد.

روشهای زیر سازه، فقط برای آنالیزهای خطی معتبر هستند. اما به خوبی شناخته شده است که خاکها، در پاسخ به بارگذاری دینامیکی، رفتار غیر خطی وابسته به کرنش از خود نشان میدهند. رفتار غیر خطی خاک را می توان با استفاده از روش معادل خطی، پیشنهاد شده بوسیله سید و ادیس [۸] و دیگران در نظر گرفت. در این روش؛ مشخصات غیر خطی خاک بوسیله مشخصات خطی معادل، شامل مدول برشی و ضریب میرایی، تخمین زده می شود.

ب - حل مسأله امیدانس

در روش تفکیک زیرسازه ها، معادلات حرکت سیستم SSI، شامل ماتریس امیدانس $[X_{ff}]$ ، به صورت نشان داده شده در معادله (۶) است. در این روش ماتریس امیدانس فقط برای گره های مرزی محاسبه می شود. (گره های ۱ در شکل (۱)). در هر فرکانس آنالیز ماتریس

از حل معادله (۱۲)، n مود موج لاو بدست می آید که در محاسبه شرایط امواج گذرا، برای حرکات ارتعاشی خارج از صفحه سیستم، استفاده می شوند.

مرزهای جاذب انرژی در امتداد افقی با استفاده از یک حل تحلیلی دقیق و در امتداد قائم بوسیله یک تابع جابجایی سازگار، بروش اجزاء محدود، فرموله می شوند. این مرزها به طور دقیق انرژی را در امتداد افق عبور می دهند.

برای مسائل دوبعدی، W با استفاده از رابطه تنش و کرنش در هر لایه و مقادیرها و بردارهای ویژه، بدست آمده برای حرکات امواج ریلی، رابطه نیرو و تغییر مکان را برای یک سیستم لایه ای، در حوزه فرکانس، به صورت زیر نوشته است:

$$\{P\} = [R]\{u\} \quad (17)$$

وقتی که $\{u\}$ بردار تغییر مکان $2n$ مؤلفه ای، $\{P\}$ نیروهای مربوطه و $[R]$ سختی دینامیکی سیستم لایه ای، در جهت افق نیم بینهایت است، که می تواند از رابطه زیر حاصل شود:

$$[R] = i[A]V[K]V^{-1} + [D] \quad (18)$$

در معادله فوق بعد تمام ماتریسها، $2n \times 2n$ است. ماتریس $[A]$ در رابطه (۸) تعریف شده است؛ ماتریس $[V]$ شامل تمام $2n$ شکل مودی، ماتریس $[K]$ یک ماتریس قطری، شامل مقادیر ویژه حرکت موج ریلی، و ماتریس $[D]$ از جمع مشخصات زیرلایه ها بدست می آید. ماتریس مربوط به لایه لازم به صورت زیر است:

$$[D_j] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \lambda_j & 0 & -\lambda_j \\ G_j & 0 & -G_j & 0 \\ 0 & \lambda_j & 0 & -\lambda_j \\ G_j & 0 & -G_j & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

ماتریس $[R]$ در محاسبه ماتریس نرمی دینامیکی، برای حل مسأله امیدانس، مورد استفاده قرار می گیرد. چن [۱۰] با استفاده از سیستم خاکی n لایه، معادله حرکت برای امواج مایل SV را نوشت. معادله حرکت سیستم خاکی، قرار گرفته تحت اثر امواج SV، می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$([A]K^2 + [\bar{B}]K + [G] - \omega^2[M])\{u\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_b \end{Bmatrix} \quad (20)$$

شده، استفاده شده در ماتریس ضرایب معادله حرکت (معادلات ۲-۶) شامل مؤلفه های C_{ss} ، C_{si} و C_{ii} محاسبه می شود. سازه، و خاک برداشته شده، بوسیله مدل‌های استاندارد اجزاء محدود مدل می شود، سپس مشخصات دینامیکی آنها محاسبه می شود.

د - حل معادله حرکت

در حالت تحریک پایدار دینامیکی سیستم خاک-سازه، معادله (۶) در فرکانسهای هارمونی مجزای انتخاب شده، شکل داده و حل می شود. در حالت تحریک هارمونیک نتایج (u_r, u_s) ، توابع تبدیل مختلط هارمونیک شتاب هستند که نشان دهنده پاسخ کل سیستم به حرکت ورودی هارمونیک در نقطه کنترل می باشند. حرکت‌های گذرا مثل زلزله، با استفاده از تکنیک تبدیل فوریه مجزا تحلیل می شوند. با استفاده از این تکنیکها، حرکت ورودی پایه مشخص شده در N نقطه مجزا، بصورت یکنواخت روی پریود T توزیع می شوند.

نتیجه نهایی بعد از جمع کردن به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{Bmatrix} u_s(t) \\ u_r(t) \end{Bmatrix} = \text{Re} \sum_{j=0}^N \begin{Bmatrix} u_{sj} \\ u_{rj} \end{Bmatrix} \exp(i\omega_j t) \quad (27)$$

مقادیر مجزای $\{u(t)\}$ در فاصله های زمانی Δt می تواند بوسیله تبدیل معکوس فوریه روی $\{u_r\}$ ، حل برای یک ورودی هارمونیک منفرد، محاسبه شود. برای حل کامل، سیستم معادلات خطی باید تشکیل و برای تمام فرکانسهای FFT حل شود که مستلزم حجم و زمان کار کامپیوتری بالایی می باشد. برای به حداقل رساندن هزینه، می توان از یک فرکانس حد بالا^۷ و همچنین از یک روش درونیایی کارا استفاده کرد به نحوی که دامنه های پاسخ مختلط u_s و u_r در یکسری فرکانس مهم انتخاب شده محاسبه می شوند و مقادیر پاسخ در دیگر فرکانسهای FFT می تواند بوسیله درونیایی مشخص شوند [۱۱].

مدلسازی سیستم اندرکنش خاک-سازه

الف- مدل ساختگاه

برای تحلیل‌های اندرکنش دینامیکی خاک و سازه از نرم افزار [۴] SASSI2000 استفاده شده است. در این

امپدانس بوسیله معکوس کردن ماتریس نرمی دینامیکی، محاسبه می شود. در مسائل سه بعدی، مسأله برآورد ماتریس نرمی دینامیکی به مسأله پیدا کردن پاسخ سیستم لایه ای افقی به بارگذاری در مرز لایه ها کاهش می یابد.

بعد از محاسبه المانهای ماتریسهای جرم و سختی، معادله حرکت به صورت زیر در می آید:

$$\begin{bmatrix} C_{cc} & C_{cp} \\ C_{pc} & C_{pp}+R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_c \\ u_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

وقتی که C ماتریس سختی دینامیکی $(C=K-\omega^2 M)$ و R ماتریس امپدانس مرزهای جاذب انرژی است. اندیسهای c و p مربوط به درجات آزادی روی خط مرکزی و محیط مدل و u_c و u_p ، اندازه جابجائیهای متناظر می باشند. جابجائی گره های بیرونی مدل $(r > r_0)$ از رابطه زیر بدست می آید:

$$\{u(r)\}_m = [w(r)]_m \{\Delta\}_m \quad (24)$$

اندیس m مربوط به درجه هارمونیک فوریه است و بردار زیر برابر ضرایب مشارکت مودی، وابسته به $3n$ مود تغییرشکلی سیستم خاکی n لایه، می باشد:

$$\{\Delta\}_m^T = \langle \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{3n} \rangle \quad (25)$$

و ماتریس $[w(r)]_m$ یک ماتریس $3n \times 3n$ است که تابع فاصله شعاعی از محور مدل، مقدار ویژه، بردار ویژه و توابع هانکل^۸ نوع دوم درجه m می باشد [۴]. با داشتن بردار مشارکت مودی، معادله (۲۴) برای محاسبه جابجایی، در هر نقطه به فاصله شعاعی r از محور مدل، به کار می رود. ماتریس نرمی دینامیکی در هر فرکانس تحلیل، یک ماتریس $3i \times 3i$ برای یک سیستم با i گره اندرکنشی در محیط میدان آزاد خاک است.

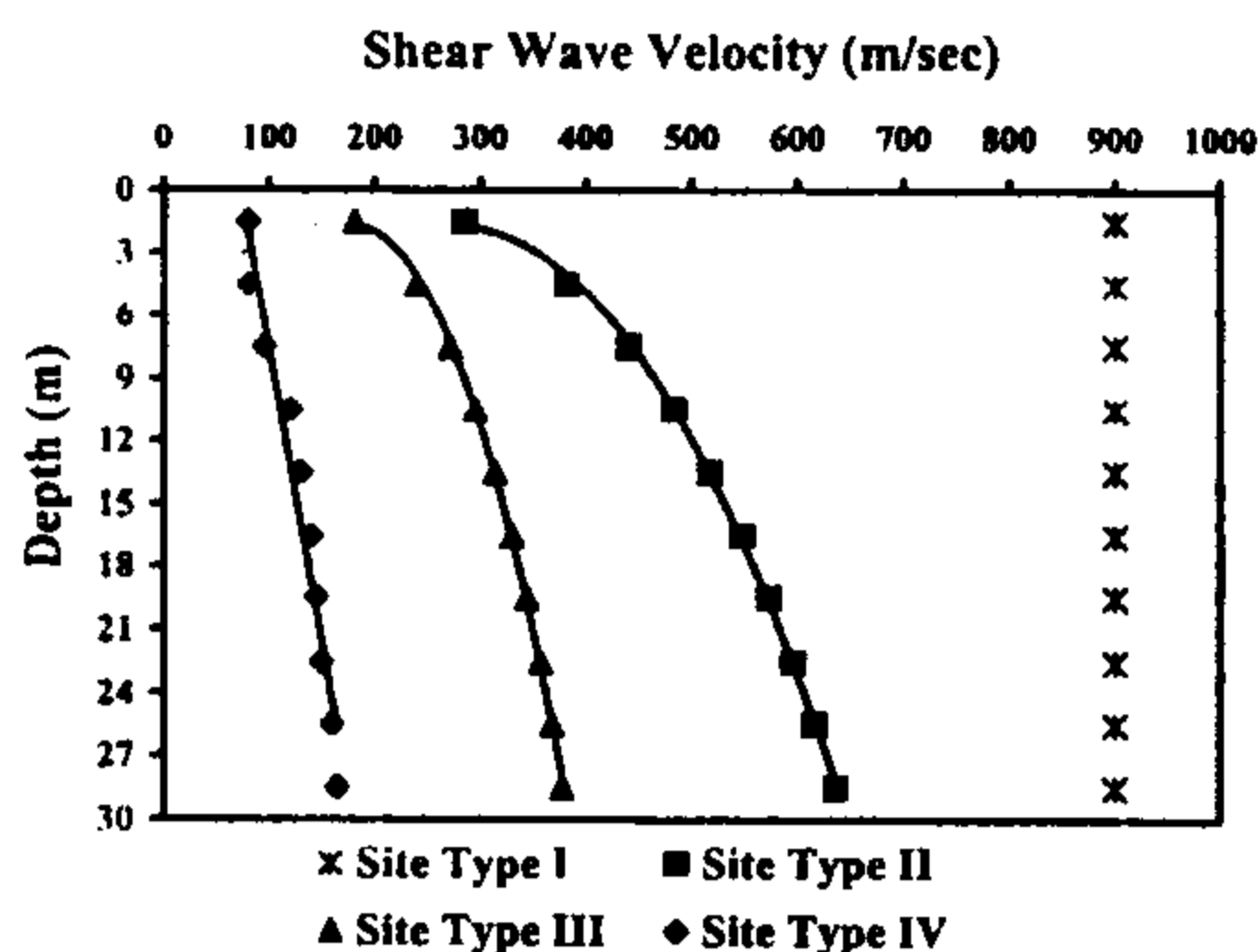
در روش مستقیم محاسبه امپدانس، لازم است که ماتریس نرمی $[F_{ff}]$ برای تمام گره های اندرکنشی محاسبه شود. سپس ماتریس امپدانس $[X_{ff}]$ از معکوس کردن ماتریس نرمی دینامیکی محاسبه می شود:

$$[X_{ff}] = [F_{ff}]^{-1} \quad (26)$$

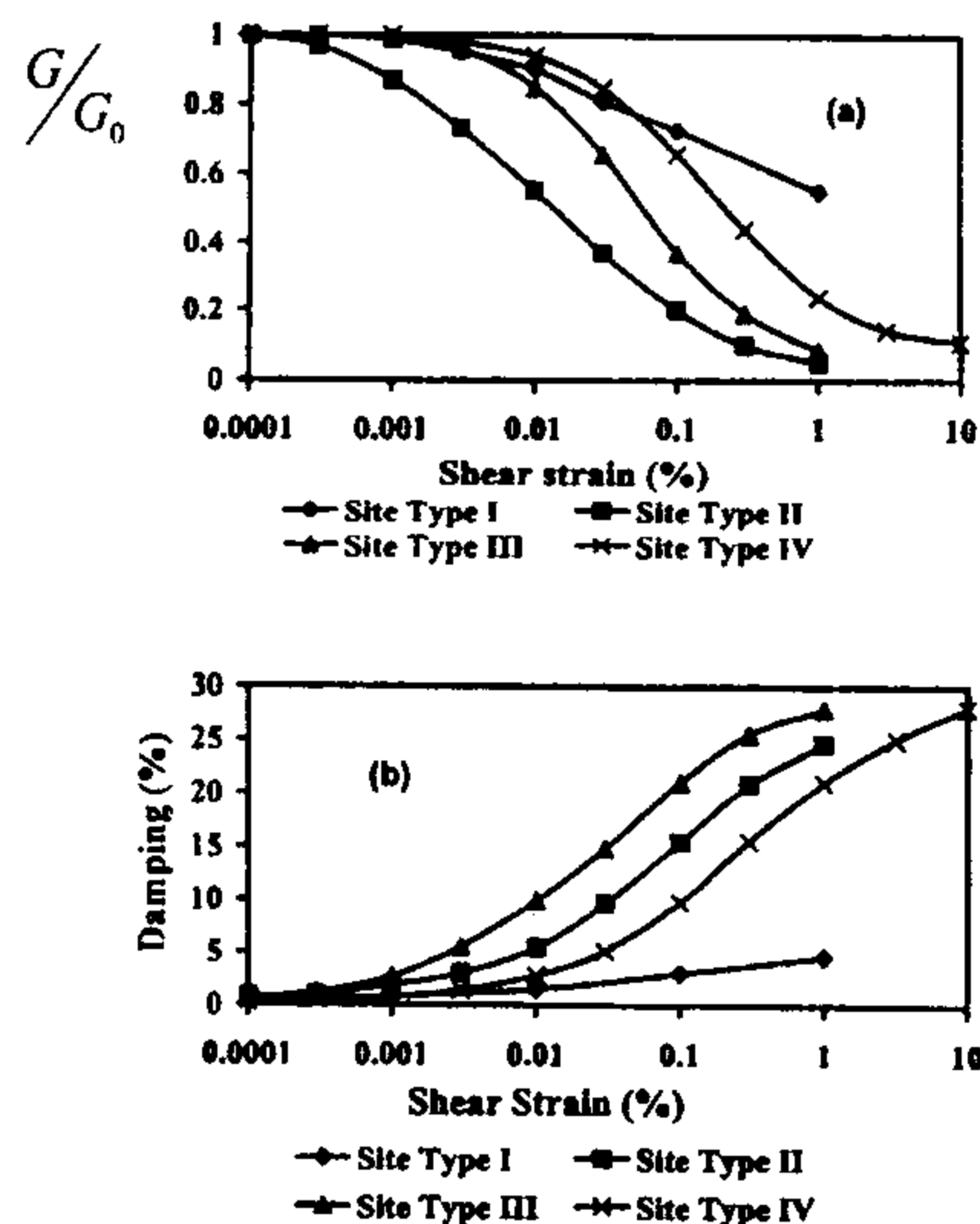
ج - تحلیل سازه ای

در این قسمت مشخصات سازه ای و خاک برداشته

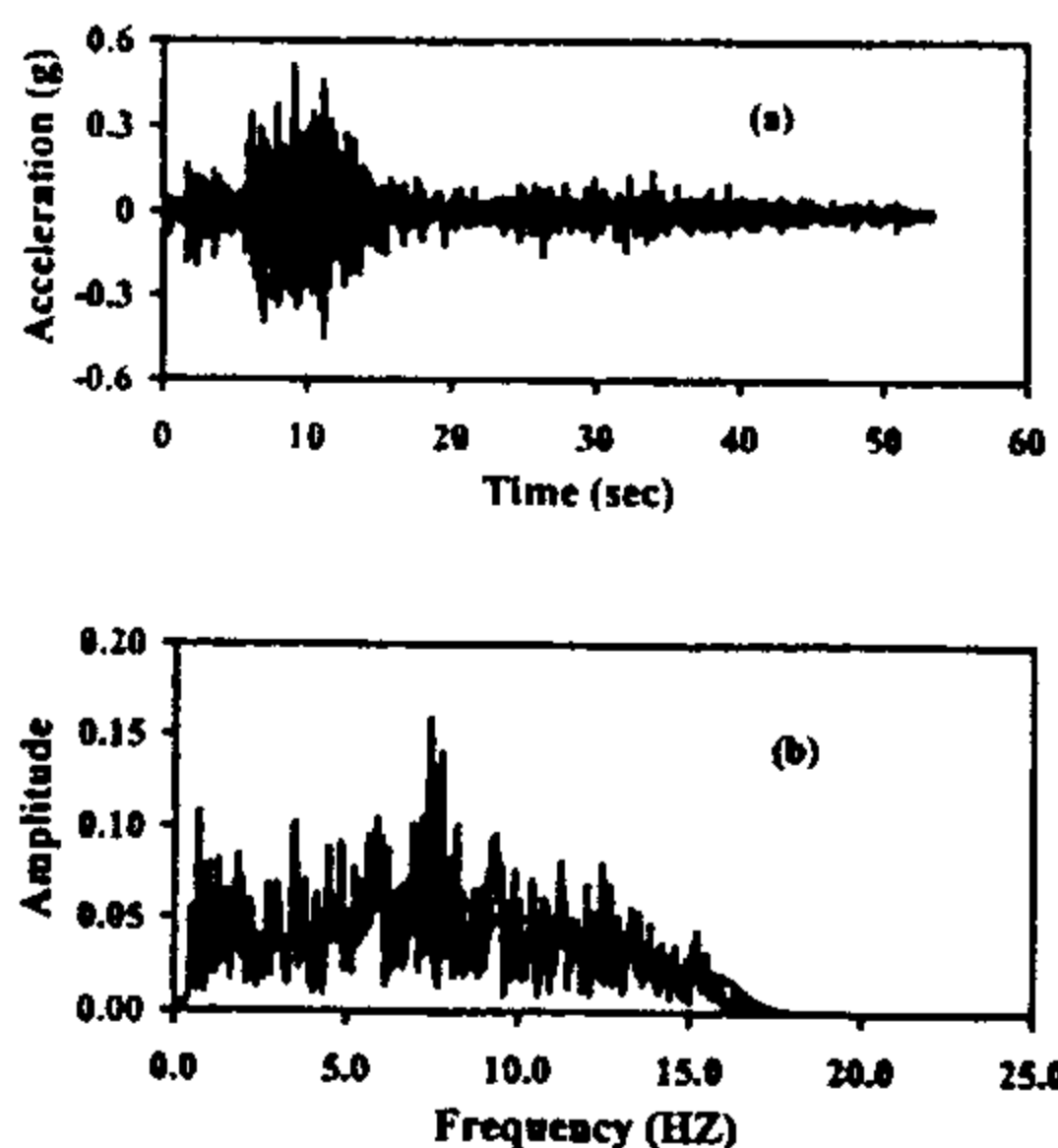
کرنش آنها محاسبه شده است. این مشخصات در شکل‌های (۵) الی (۷) آورده شده است.



شکل ۲: نمودار تغییرات سرعت موج برشی بر حسب عمق برای ساختگاه‌های مختلف.



شکل ۳: نمودارهای تغییرات (a) مدول برشی اولیه و (b) نسبت میرایی بر حسب کرنش برشی، برای ساختگاه‌های مختلف [۱۳، ۱۴، ۱۵].



شکل ۴: نمودارهای تاریخچه زمانی و طیف دامنه فوریه منحنی شتاب-زمان آب-بر.

تحلیلها از روش تفکیک زیرسازه‌ها استفاده شده است. برای در نظر گرفتن رفتار غیر خطی خاک، ابتدا در هر سطح شتاب ورودی، مشخصات دینامیکی سازگار با کرنش برشی خاک، محاسبه شده سپس در تحلیل‌های اندرکرنش از مشخصات دینامیکی سازگار با کرنش برشی مؤثر استفاده شده است.

در این مطالعه، مدل ساختگاه از نظر هندسی شامل یک محیط خاکی ۱۰ لایه، قرار گرفته روی بستر سنگی، و از نظر رفتاری چهار نوع ساختگاه، مطابق تقسیم بندی استاندارد ۲۸۰۰ ایران، در نظر گرفته شده است. نمودارهای تغییرات سرعت موج برشی نسبت به عمق و تغییرات مشخصات دینامیکی نسبت به کرنش برشی برای ساختگاه‌های مختلف در شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده است. همچنین مشخصات مکانیکی ساختگاهها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی ساختگاهها.

| نوع ساختگاه | وزن حجمی | ضریب پواسون [۱۲] | توضیحات |
|-------------|----------|------------------|--|
| I | ۲۵۰۰ | ۰/۲۵ | معادل یک ساختگاه سنگی |
| II | ۲۰۰۰ | ۰/۳ | معادل یک نوع خاک سنی (سنگ خرد شده) با سرعت موج برشی بالا |
| III | ۱۹۵۰ | ۰/۳۳ | معادل یک نوع خاک ماسه ای با سرعت موج برشی متوسط |
| IV | ۱۹۰۰ | ۰/۴۵ | معادل یک نوع خاک رسی نسبتاً نرم |

برای تحریک ارتعاشی وارده در تراز بستر سنگی، از نمودار شتاب-زمان زلزله سال ۱۳۶۹ رودبار منجیل ایران، ثبت شده در ایستگاه آب-بر، استفاده شده است. بعلت قرار داشتن این ایستگاه بر طبقات سنگ گونه و گچی کنگلومرانی، سنجشهای آن مستقل از اثر آبرفت می باشند. تاریخچه زمانی و طیف دامنه فوریه نمودار شتاب-زمان آب-بر در شکل (۴) نشان داده شده است.

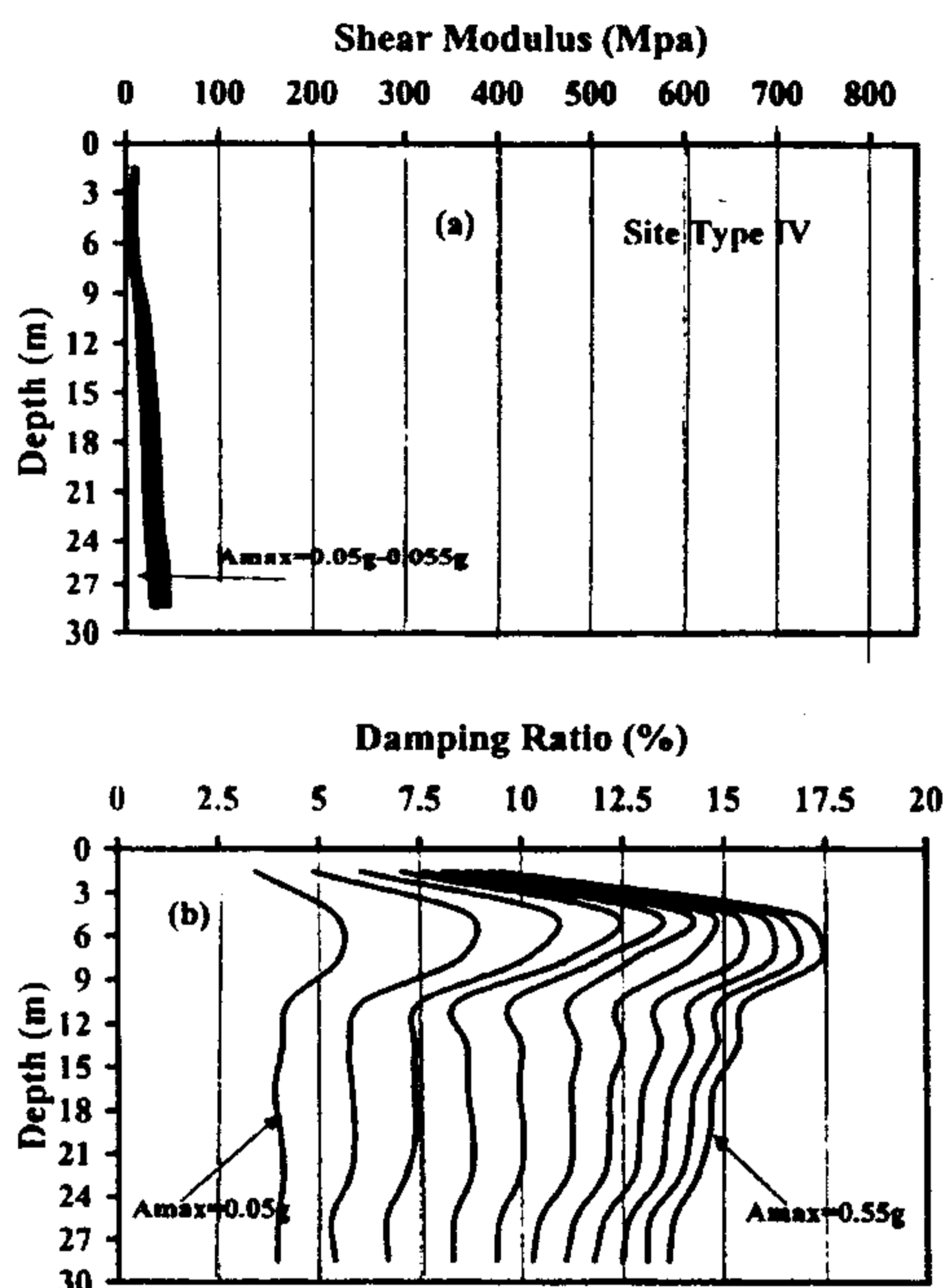
با استفاده از نرم افزار تحلیل یک بعدی پاسخ ساختگاه SHAKE [۱۶]، مدل‌های ساختگاهها در سطوح شتاب ورودی ۰/۰۵ تا ۰/۵۵ شتاب ثقل، تحت اثر نمودار شتاب-زمان آب-بر قرار گرفته و مشخصات دینامیکی سازگار با

در نظر گرفته شده است. عرض بارگیر هرتیر برابر شش متر و بارمرده و زنده طبقات، به ترتیب، برابر ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. مقاطع سازه ای، در جدولهای شماره (۲) و (۳) آورده شده اند و ابعاد پی برای هر دو نوع سازه برابر ۲×۶×۲۱، بر حسب متر، بدست آمده است. فرکانس انتهائی تحلیل، برای هر دونوع سیستم سازه ای، برابر با پنج هرتز در نظر گرفته شده است.

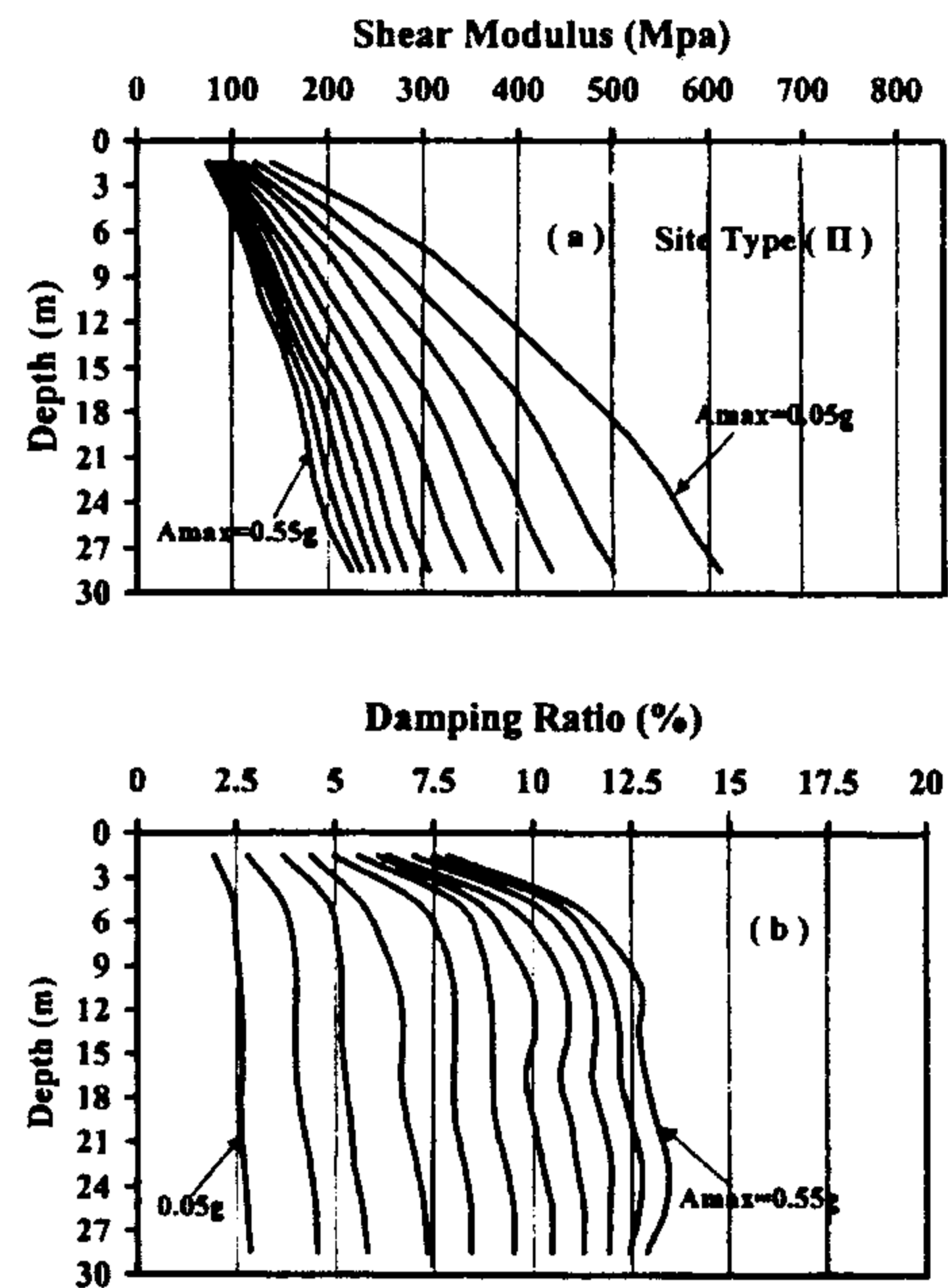
جدول ۲: مقاطع المانهای سازه قاب خمشی.

| شماره تراز طبقات | ستونها از نوع قوطی شکل | تیرها | |
|------------------|------------------------|------------|-----------|
| | | ابعاد بال | ابعاد جان |
| ۱-۴ | ۳۶×۳۶×۳/۲ | ۲ PL۲۵×۱/۸ | PL۶۰×۱/۰ |
| ۵-۸ | ۳۶×۳۶×۲/۴ | ۲ PL۲۵×۱/۸ | PL۶۰×۱/۰ |
| ۹-۱۲ | ۳۶×۳۶×۲/۰ | ۲ PL۲۵×۱/۶ | PL۶۰×۱/۰ |
| ۱۳-۱۶ | ۳۶×۳۶×۱/۶ | ۲ PL۲۵×۱/۴ | PL۶۰×۱/۰ |
| ۱۷-۲۰ | ۳۶×۳۶×۱/۰ | ۲ PL۲۰×۲/۰ | PL۴۰×۱/۰ |

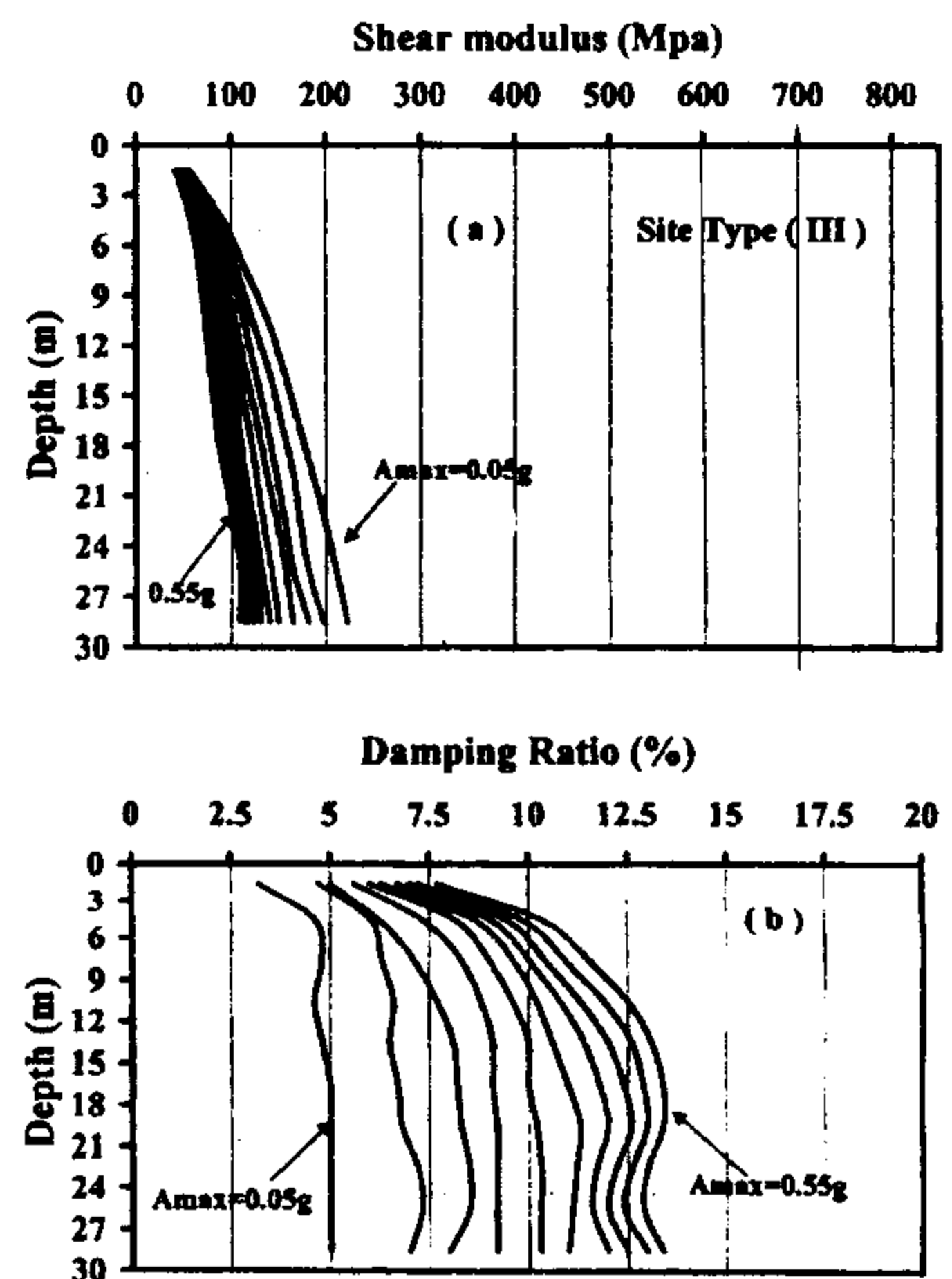
مدلهای سیستم خاک و سازه برای دو نوع سازه در شکل شماره (۸) آورده شده است.



شکل ۷: نمودارهای تغییرات مشخصات دینامیکی شامل (a) مدول برشی و (b) نسبت میرائی برای ساختگاه نوع IV بر حسب عمق در سطوح شتاب وارده مختلف.



شکل ۵: نمودارهای تغییرات مشخصات دینامیکی شامل (a) مدول برشی و (b) نسبت میرائی برای ساختگاه نوع II بر حسب عمق در سطوح شتاب وارده مختلف.



شکل ۶: نمودارهای تغییرات مشخصات دینامیکی شامل (a) مدول برشی و (b) نسبت میرائی برای ساختگاه نوع III بر حسب عمق در سطوح شتاب وارده مختلف.

ب- مدل سازه و پی

مدل سازه ای استفاده شده در تحلیلها، شامل یک قاب دوبعدی ۲۰ طبقه با پی سطحی است که سیستم مقاوم جانبی آن به دو صورت متداول، قاب خمشی و بادبندی

تحلیل‌های اندرکنش دینامیکی خاک و سازه و نتایج حاصله

تحلیل‌های اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، با لحاظ کردن اثرات رفتار غیرخطی خاک، بوسیله نرم افزار [۴] SASSI2000 برای ترکیب‌های متفاوت سازه، ساختگاه و محیط‌های لرزه ای انجام شده است.

روش‌های متعددی بوسیله محققین برای مشاهده مستقیم اثرات رفتار غیر خطی خاک روی منحنی شتاب-زمان پیشنهاد شده است. [۱۷]

اثرات رفتار غیرخطی خاک بر پاسخ دینامیکی سازه ها می تواند به صورت نسبت پاسخ طیفی آبرفت به سنگ بستر گزارش شود. [۵، ۱۷]

این پارامترها می توانند برای تخمین پارامترهای روش‌های بر مبنای استفاده از طیف پاسخ، برای برآورد نیروی برشی پایه دینامیکی، مورد استفاده قرار گیرند [۵].

به این منظور، نتایج حاصل از تحلیل اندرکنش خاک و سازه، با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی خاک، با نتایج حاصل از تحلیل متداول دینامیکی سازه ها، به وسیله دو سیستم زیر برآورد و مقایسه شده است.

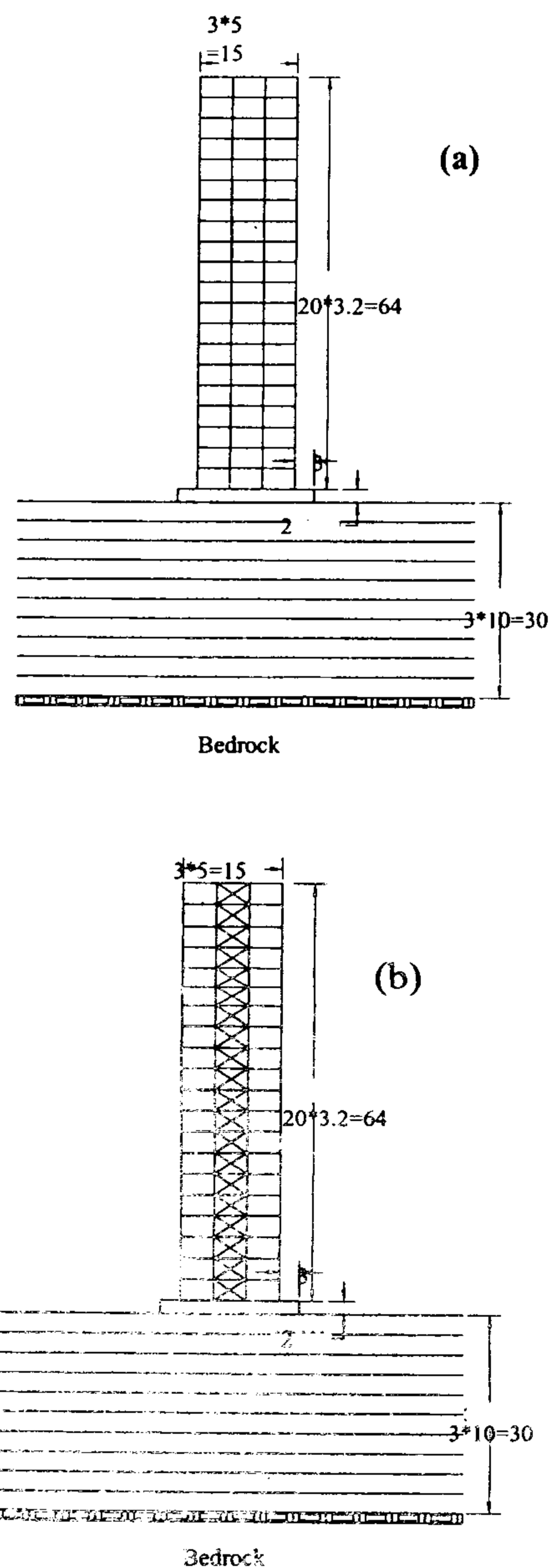
سیستم اول شامل سازه قرار بر بستر سنگی است که تحت اثر حرکت وارده در سنگ بستر قرار گرفته باشد و سیستم دوم شامل سازه قرار گرفته بر خاک لایه ای است که حرکت ورودی به سیستم در تراز سنگ بستر اعمال شده باشد.

برای دو سیستم فوق پاسخ طیفی بالای سازه محاسبه شده و نتایج حاصله به صورت زیر با هم مقایسه شده است که نسبت نتایج پاسخ طیفی حاصل از سیستم‌های اول و دوم را برآورد می کند

$$A_{SSI} = \frac{SPECACC_2}{SPECACC_1} \quad (28)$$

مقادیر حاصله بزرگنمایی پاسخ سازه ای (A_{SSI}) را نشان می دهند.

الف - اگر منحنی نسبی خاک و سازه بر پاسخ سازه ای روند تغییرات بزرگنمایی پاسخ سازه ای می تواند نسبت به منحنی نسبی سازه به خاک، که بوسیله پارامتر $(\frac{p}{\sigma'_{v0}} = \frac{p}{\sigma'_{v0} \cdot T})$ کنشی سازی شده است، سنجیده شود

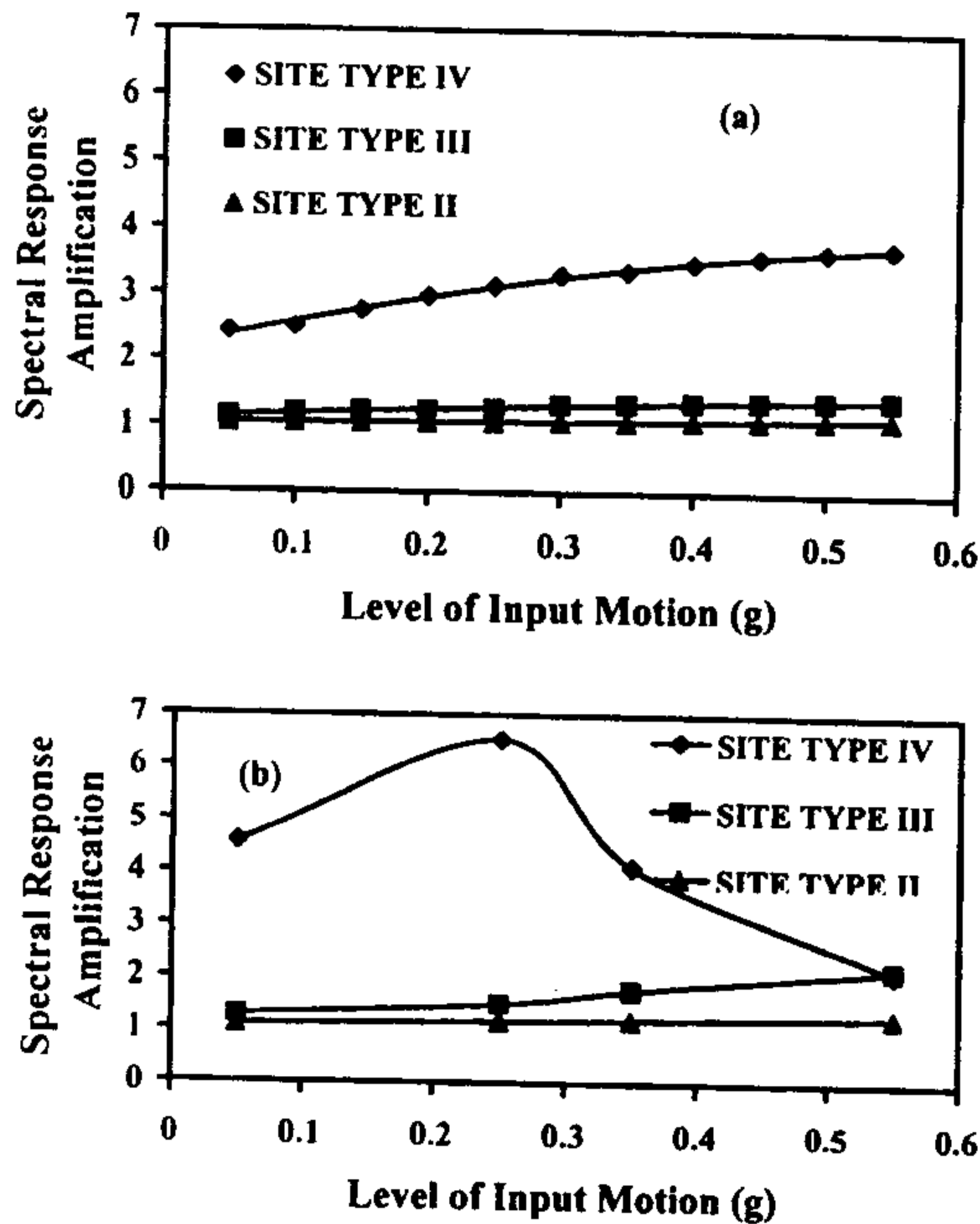


شکل ۸: مدل خاک و سازه برای دو نوع سازه (a) نوع قاب خمشی و (b) نوع بادبندی (ابعاد بر حسب متر).

جدول ۳: مقاطع المانهای سازه قاب بادبندی.

| شماره تراز طبقات | ستونها از نوع قوطی شکل | تیرها از نوع آ شکل | | تدابیر |
|------------------|------------------------|--------------------|-----------|--------|
| | | ابعاد بال | ابعاد جان | |
| ۱-۴ | ۲۰×۳۰×۲/۶ | PL۱۸×۲/۶ | PL۱۸×۱/۸ | YUNP۲۲ |
| ۵-۸ | ۲۰×۳۰×۱/۸ | PL۱۸×۲/۶ | PL۱۸×۱/۸ | YUNP۲۲ |
| ۹-۱۲ | ۲۰×۳۰×۱/۴ | PL۱۸×۲/۶ | PL۱۸×۱/۸ | YUNP۲۰ |
| ۱۳-۱۶ | ۲۰×۳۰×۱/۰ | PL۱۶×۲/۲ | PL۱۰×۱/۶ | YUNP۱۸ |
| ۱۷-۲۰ | ۲۰×۳۰×۱/۸ | PL۱۸×۲/۲ | PL۱۰×۱/۶ | YUNP۱۸ |

کاهش می یابد. کاهش سختی ساختگاه و همچنین تغییر محتوای فرکانسی حرکت ورودی، پاسخ سازه ای را به طور کلی تحت تأثیر قرار می دهد.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات بزرگنمایی پاسخ طیفی سازه ای در برابر سطح شتاب ورودی برای سازه نوع (a) قاب خمشی و بادبندی (b).

برای ترکیبهای مختلف ساختگاه، سازه و محیط لرزه ای منحنیهای تغییرات بزرگنمایی پاسخ طیفی سازه (A_{sw}) نسبت به سطح شتاب ورودی در شکل شماره (۱۰) آورده شده است.

همانطور که ملاحظه می شود برای سازه نوع قاب خمشی، در حالت قرار گرفتن آن بر ساختگاه نوع IV افزایش پاسخ سازه ای به مراتب از دو نوع ساختگاه II و III قابل توجهتر است به طوری که مقدار این افزایش در سطح شتابهای معادل ۰/۰۵ و ۰/۵۵ شتاب ثقل، به ترتیب، برابر ۲/۴۳ و ۳/۷۳ خواهد بود در حالی که برای دیگر ساختگاهها قابل توجه نیست.

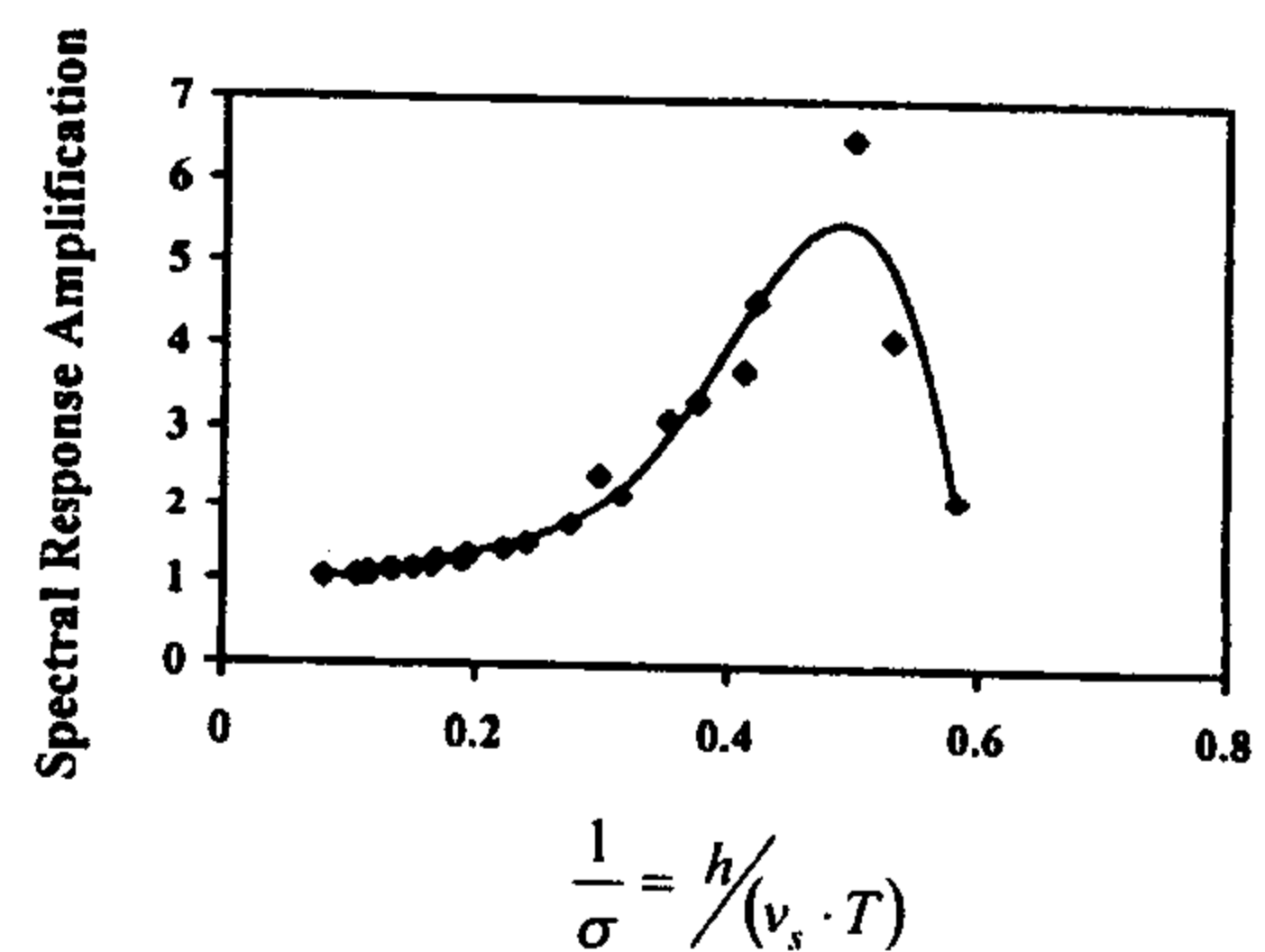
برای سازه نوع بادبندی، در حالت قرار گرفتن آن بر ساختگاه های نوع II و III، روند تغییرات بزرگنمایی مشابه سازه نوع قاب خمشی است و بدلیل نزدیکتر شدن پیوند ساختگاه و سازه مقادیر بزرگنمایی بیشتر شده اند. ولی برای ساختگاه نوع IV وضعیت متفاوت می باشد

[۵، ۱۲]، وقتی که h ، v_s و T بصورت زیر تعریف شده باشند:

h : معادل فاصله پای سازه تا مرکز ثقل جرمی سازه است، v_s : سرعت موج برشی، وابسته به کرنش، لایه خاکی است که باید به روش مناسب تعیین شود و T : پیوند اصلی سازه با پای صلب است.

در شکل (۹) نمودار تغییرات بزرگنمایی پاسخ طیفی سازه ای نسبت به پارامتر $(1/\sigma)$ ، برای سازه ها، ساختگاهها و سطوح شتاب ورودی مختلف، رسم شده است. روند تغییرات نتایج بدست آمده، به خوبی اثرات حاکم پارامتر $(1/\sigma)$ بر پاسخ سازه ای را نشان می دهد.

بیشترین بزرگنمایی پاسخ سازه ای برابر با ۶/۵ در $(1/\sigma)$ برابر ۰/۵ اتفاق می افتد که مربوط به حالت قرار گرفتن سازه نوع بادبندی روی ساختگاه نوع IV در سطح شتاب وارده حدود ۰/۲۵ شتاب ثقل است و کمترین بزرگنمایی پاسخ سازه ای برابر با ۱/۰۵ در $(1/\sigma)$ حدود ۱/۱ اتفاق می افتد که مربوط به حالت قرار گرفتن سازه نوع قاب خمشی بر ساختگاه نوع II، در سطح شتاب وارده حدود ۰/۰۵ شتاب ثقل است. مقادیر بالای بزرگنمایی طیفی مربوط به سازه نوع بادبندی و ساختگاه نوع IV است.



شکل ۹: نمودار تغییرات بزرگنمایی پاسخ طیفی سازه ای در برابر نسبت سختی سازه به سختی خاک $(1/\sigma)$.

ب- اثر شدت ارتعاش زلزله بر پاسخ سازه ای
بعلت وجود اثرات میرایی و رفتار غیر خطی، وابسته به کرنش برشی خاک زیرین سازه ها، سطح شتاب ورودی می تواند اثر قابل توجهی بر پاسخ سازه ای داشته باشد. با افزایش سطح شتاب ورودی، سختی ساختگاه

سیستم خاک لایه ای، قرار گرفته بر بستر سنگی، وارد شد و سپس پاسخ آن، در تراز میدان آزاد زمین محاسبه شد؛ سپس حرکت بدست آمده به پای صلب سازه، اعمال شد و پاسخ هر دو سیستم در بالای سازه محاسبه شد. نسبت نتایج پاسخ طیفی حاصل از سیستمهای فوق به صورت زیر محاسبه شده است:

$$A_{FF} = \frac{SPECACC_2}{SPECACC_1} \quad (29)$$

مقادیر حاصله بزرگنمایی پاسخ سازه ای (A_{FF}) را نشان می دهند. در این حالت اثرات اندر کنش خاک و سازه بر پاسخ سازه ای در نظر گرفته نمی شود. نتایج حاصله با نتایج (A_{SSI}) بدست آمده از تحلیلهای بخشهای قبل، که در آنها اثرات اندر کنش خاک و سازه نیز در نظر گرفته شده، مقایسه شده است. در شکل (۱۲) منحنی تغییرات بزرگنمایی پاسخ سازه ای برای دو سیستم آورده شده است.

همانطور که ملاحظه می شود در صورت لحاظ کردن اثرات اندر کنش خاک و سازه، در تمامی حالات بزرگنمایی پاسخ سازه ای خواهیم داشت.

برای سازه نوع قاب خمشی، همانطور که ملاحظه می شود در حالت قرار گرفتن بر ساختگاه نوع II و III نتایج حاصل از (A_{SSI}) مقادیر بزرگنمایی بیشتر از (A_{FF}) پیش بینی می کند و هر چه سطح شتاب بالاتر می رود این اختلاف کمتر میشود. در حالت قرار گرفتن سازه نوع قاب خمشی بر ساختگاه نوع IV در سطح شتاب پائین اختلاف مقادیر زیاد است و هر چه سطح شتاب بیشتری شود این اختلاف کمتر می شود به طوری که در سطح شتاب برابر ۰/۳۵ مقادیر برابر می شوند و برای شتابهای بیشتر، مقادیر (A_{FF}) بیشتر از (A_{SSI}) می شوند. وجود این روند می تواند به این دلیل باشد که در اثر افزایش سطح شتاب ورودی، اثرات میرایی قابل توجه تر می شود و این افزایش مشخصه های امپدانس پی را اصلاح می کند در نتیجه سرعت افزایش پاسخ سازه ای نسبت به سطح شتاب ورودی را کاهش می دهد ولی برای سیستم (A_{FF}) با توجه به اینکه پای سازه صلب فرض شده است اثرات میرایی روی تغییر مشخصات امپدانس پی در نظر گرفته نمی شود در نتیجه در سطوح شتاب بالا بزرگنمایی بیشتری را پیش بینی می کند.

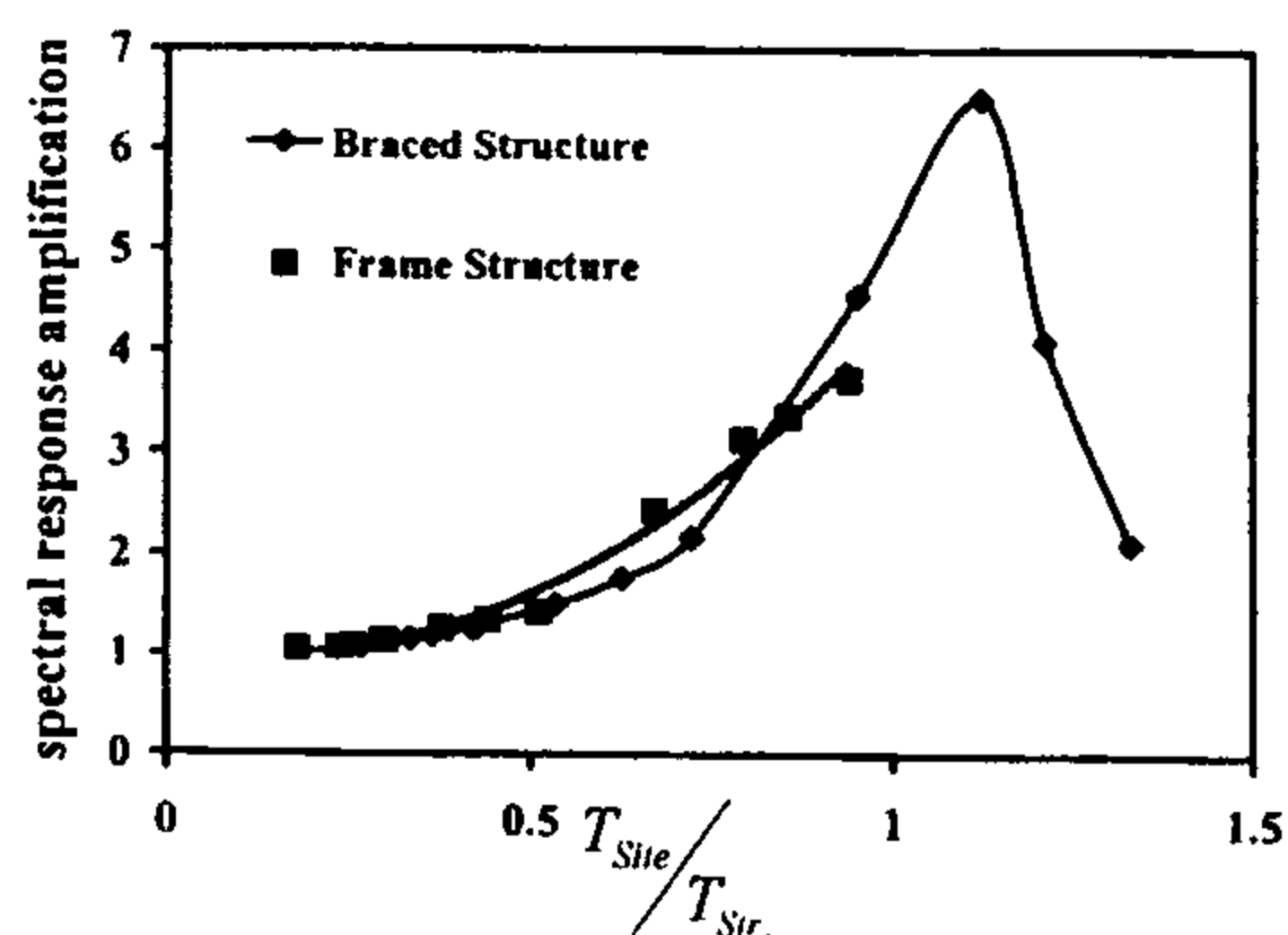
بطوری که بعلت نزدیک شدن پریود اصلی سازه و ساختگاه، مقدار بزرگنمایی در سطح شتاب معادل ۰/۰۵ شتاب ثقل مقدار قابل توجه ۴/۶ را دارد و روند صعودی دارد تا اینکه در سطح شتاب ۰/۲۵ شتاب ثقل، بعلت وقوع پدیده تشدید، به حداکثر مقدار خود، برابر ۶/۵۲ می رسد و پس از آن، رو به کاهش می گذارد تا در سطح شتاب ۰/۵۵ شتاب ثقل به مقدار ۲/۱۲ می رسد.

ج- اثر پریود نسبی ساختگاه بر پاسخ سازه ای

در شکل (۱۱) نمودار تغییرات بزرگنمایی پاسخ طیفی سازه (A_{SSI}) در برابر پریود نسبی ساختگاه به سازه، برای ترکیبهای مختلف ساختگاه، سازه و محیط لرزه ای آورده شده است.

برای سازه نوع قاب خمشی با افزایش پریود نسبی، مقدار پاسخ سازه ای افزایش می یابد و روند افزایش صعودی است ولی پدیده تشدید رخ نمی دهد.

برای سازه نوع بادبندی، با افزایش پریود نسبی، پاسخ سازه ای افزایش می یابد تا اینکه در پریود نسبی معادل حدود ۱/۱، بعلت وقوع پدیده تشدید، مقدار افزایش به حداکثر خود، برابر حدود ۶/۵ می رسد و بعد از آن رو به کاهش می گذارد.



شکل ۱۱: نمودار تغییرات بزرگنمایی پاسخ طیفی سازه ای در برابر پریود نسبی ساختگاه.

د- اثر نادیده گرفتن اثرات اندر کنش خاک و سازه بر پاسخ سازه ای

برای برآورد اثر وجود آبرفت بر رفتار سازه، دو سیستم به صورت زیر در نظر گرفته شده است: در سیستم اول حرکت ورودی به پای صلب سازه اعمال شد و در سیستم دوم، ابتدا حرکت ورودی به پای یک

بررسی نتایج بدست آمده از تحلیلهای انجام شده نشان

می دهد:

- پاسخ دینامیکی سازه نه تنها به سختی سازه، بلکه به مشخصات دینامیکی ساختگاه (شامل سختی و میرائی)، سطح شتاب وارده و محتوای فرکانسی آن نیز وابسته است که بسته به نوع سیستم خاک_سازه و محل قرار گرفتن آن، می تواند انجام یک تحلیل سه بعدی اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی خاک لازم داشته باشد.

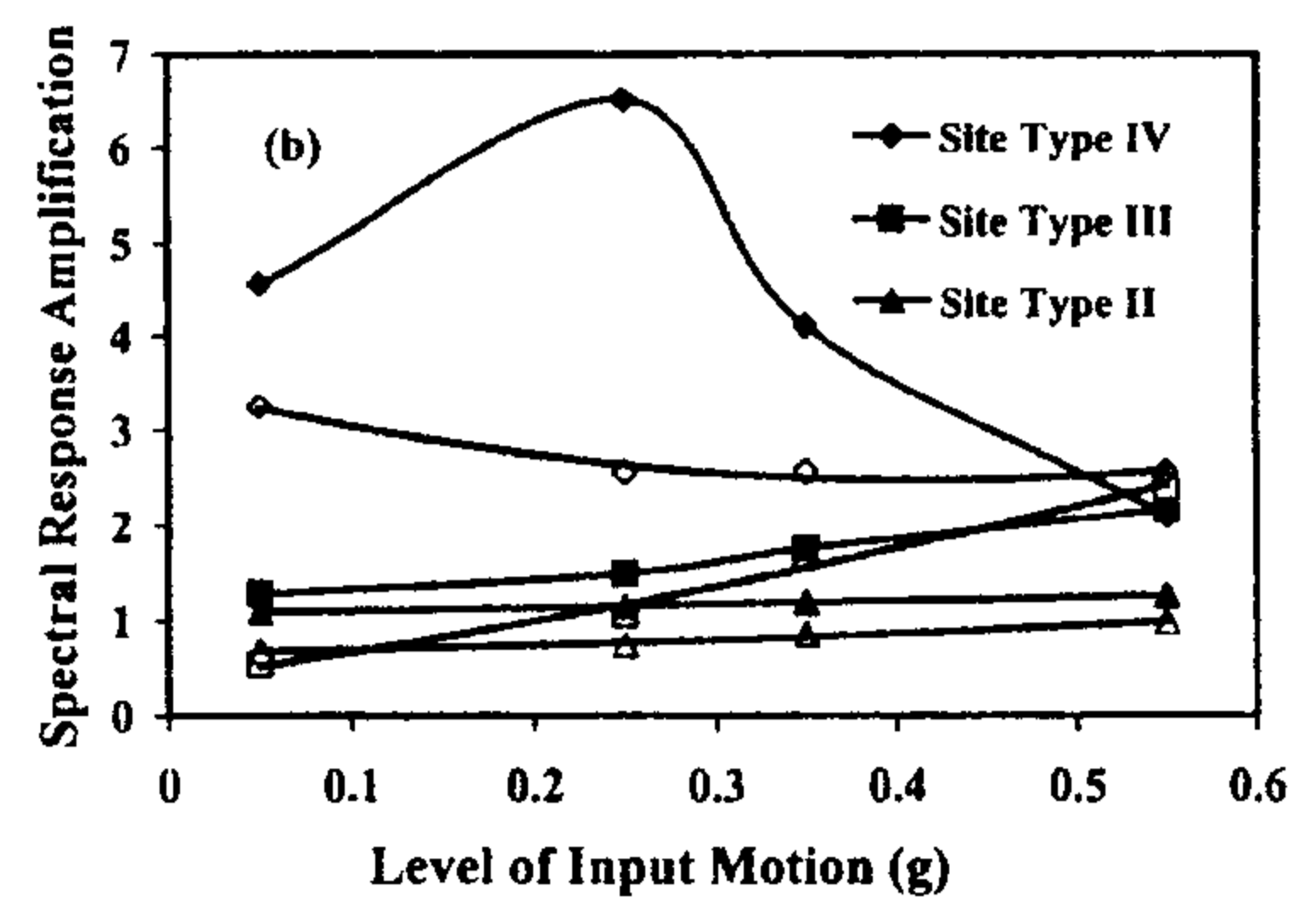
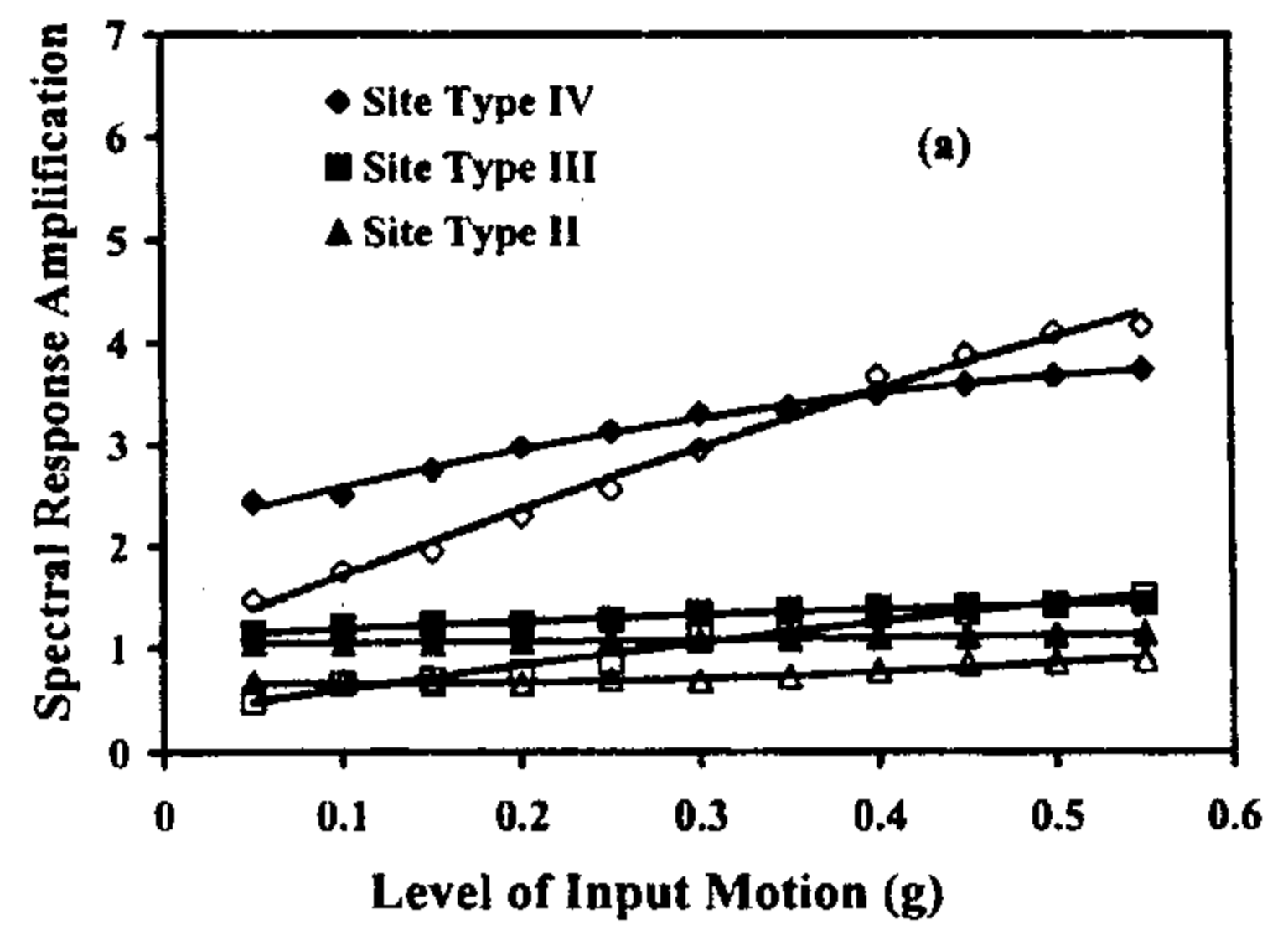
- در صورت قرار گرفتن سازه ها بر ساختگاه نوع II، افزایش پاسخ سازه ای قابل توجه نخواهد بود به طوری که حداکثر بزرگنمایی، در سطح شتاب معادل ۰/۵۵ شتاب ثقل، برای سازه های نوع بادبندی و قاب خمشی، به ترتیب، برابر حدود ۱/۲۷ و ۱/۱۴ بدست آمده است.

- در حالت وجود ساختگاه نوع III، برای سازه بادبندی افزایش بیشتر پاسخ سازه ای نسبت به قاب خمشی بدست آمده است و بسته به اهمیت پروژه میتوان اثرات اندرکنش خاک و سازه را در نظر گرفت.

- در حالت وجود ساختگاه نوع IV در زیر سازه ها، اثرات رفتار غیر خطی خاک و اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش قابل توجه پاسخ سازه ای می شود، به طوری که برای سازه بادبندی حداکثر برابر با ۶/۵۲، در سطح شتاب ۰/۲۵ شتاب ثقل، و برای سازه نوع قاب خمشی حداکثر برابر با ۳/۷۳، در سطح شتاب ۰/۵۵ شتاب ثقل، خواهد بود. همانطور که ملاحظه می شود، بعلت وقوع پدیده تشدید، افزایش پاسخ سازه ای برای سازه نوع بادبندی بیشتر از سازه نوع قاب خمشی است.

- مقدار افزایش پاسخ سازه ای، برای سیستمهای خاک_سازه با $0.1 < \frac{1}{\sigma}$ افزایش پاسخ سازه ای قابل توجه نیست و در مسائل عملی می توان از آن صرفنظر کرد در حالی که برای $0.4 < \frac{1}{\sigma} < 0.5$ مقدار افزایش پاسخ سازه ای (معادل حدود ۴ تا ۶/۵) قابل توجه خواهد بود و انجام تحلیل اندرکنش دینامیکی خاک و سازه لازم است.

با توجه به نتایج بدست آمده، توصیه می شود که این نوع سازه های (بلند و سنگین) بر خاک نرم (ساختگاه نوع IV) بنا نشوند و در صورت اجتناب ناپذیر بودن اینکار، اولاً اثرات اندرکنش دینامیکی خاک و سازه، با



شکل ۱۲: مقایسه نتایج حاصل از (A_{SS1}) (نقاط توپر) و (A_{FF}) (نقاط توخالی) برای سازه (a) قاب خمشی و (b) بادبندی.

سازه نوع بادبندی در حالت قرار گرفتن بر ساختگاههای نوع II و III رفتاری مشابه سازه نوع قاب خمشی دارد فقط، بعلت نزدیکتر شدن پیوندهای سازه و ساختگاه، مقادیر بزرگنمایی بیشتری پیش بینی می کنند؛ ولی در حالت قرار گرفتن بر ساختگاه نوع IV روند کاملاً متفاوتی نسبت به سازه نوع قاب خمشی دارد. برای سیستم (A_{SS1}) همانطور که ملاحظه می شود بعلت اینکه در سطوح شتاب پائین پدیده تشدید رخ می دهد تغییرات (A_{SS1}) ابتدا صعودی است تا به حداکثر مقدار خود برابر حدود ۶/۵ در سطح شتاب ۰/۲۵ شتاب ثقل می رسد و بعد از آن رو به کاهش می گذارد تا در سطح شتاب ۰/۵۵ شتاب ثقل به مقدار ۲/۱۲ می رسد.

جمع بندی و نتیجه گیری

بر اساس تحقیقات انجام شده مدارک مستند فراوانی وجود دارد که نشان می دهد نوع خاک ساختگاه و اندرکنش خاک و سازه، در هنگام وقوع زلزله، می تواند نیروی وارد به سازه را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

مهندس ریاضی به خاطر کمک در اجرای برنامه مورد استفاده تشکر می شود. همچنین برای اجرای برنامه از امکانات کامپیوتری شرکت محترم مهندسان مشاور دریاخاک و پی استفاده شد که بدینوسیله قدردانی می شود.

ملحوظ کردن اثرات رفتار غیر خطی خاک، در نظر گرفته شود و ثانیاً سیستم مقاوم جانبی طوری در نظر گرفته شود که حداکثر نیروی وارده به سازه کمترین مقدار ممکن شود که در اینجا سیستم نوع قاب خمشی مناسبتر است.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر شهرام وهدانی و خانم

مراجع

- 1 - Naeim, F. (2001). *The Seismic Design Handbook*, 2nd Edition, John A. Martin & Associates, INC., Los Angeles, CA 90015.
- 2 - Mylonakis, G. and Gazetas, G. (2000). "Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental." *J. of Earthquake Engineering*, Vol. 4, No. 3, PP. 277-301 (Imperial College Press).
- ۳ - گتمیری، ب. و حائری، س. م. و همکاران، "راهنمای تحلیل بر هم کنش دینامیکی خاک-سازه و اثرات آن بر واکنش دینامیکی سازه." مرکز مطالعات مقابله با سوانح طبیعی ایران، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، (۱۳۷۵).
- 4 - Lysmer, J., Ostadan, F. and Chin, C. C. (1999). "SASSI2000, theoretical manual and user's manual." *Geotechnical Eng. Division, Civil Eng. Department, Univ. of California, Berkeley, CA 94720*.
- 5 - Stewart, P. S., Seed, R. B. and Fenves, G. L. (1998). "Empirical evaluation of inertial soil-structure interaction effects." *Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley*.
- 6 - Chin, C. C. (1998). *Substructure Subtraction Method and Dynamic Analysis of Pile Foundations*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- 7 - Wolf, J. P. (1985). *Dynamic Soil-Structure Interaction*. Prentice-Hall Inc.
- 8 - Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1969). "The influence of soil conditions on ground motion during earthquakes." *J. of Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE*, Vol. 94, No. SM1, PP. 99-137.
- 9 - Waas, G. (1972). "Earth vibration effects and abatement for military facilities-analysis method for footing vibrations through layered media." *Technical Report 5-71-14, U. S. Army Engineer Waterways Experimental Station, Vicksburg, Mississippi, September*.
- 10 - Chen, J. C. (1980). *Analysis of Local Variation in Free-Field Seismic Ground Motions*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, November.
- 11 - Tajirian, F. (1981). *Impedance Matrices and Interpolation Techniques for 3-D Interaction Analysis by the Flexible Volume Method*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.
- 12 - NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program), (2000). *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Building, 2000 Edition, 2 Volumes and maps, FEMA 368 and 369*.
- 13 - Ishihara, K. (1996). *Soil behavior in earthquake geotechnics*. Oxford Eng. Science Series.
- 14 - Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972). "Shear modulus and damping in soils: design equation and curves." *ASCE, J. of Soil Mechanic and Foundation Division*, Vol. 98, No. SM7, PP. 667-692.
- 15 - Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970). *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis*, Report EERC 70-10, Earthquake Eng. Research Center, UCB, December.
- 16 - Schnabel P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972). "SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites." *Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 72-12, December 1972*.
- 17 - Lussou, P., Bard P.Y., Modaressi, H. and Gariel, J.C. (2000). "Quantification of soil nonlinearity based on simulation." *J. of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 20, PP. 509-516.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | | | |
|---------------------------|------------|-----------------------|-----------------|
| 1 - Rayleigh | 2 - Love | 3 - Consistent | 4 - Lumped mass |
| 5 - Transmitting boundary | 6 - Hankel | 7 - Cut-off Frequency | |