Archive of SID

مطالعه اثر اندرکنش سازه ـ خاک ـ سازه بر پاسخ غیرخطی سازه‌های بلند *

فریبرز ناطقی‌الهی[۱] علی رضایی تبریزی[۲] فرهاد بهنام‌فر[۳]

چکیده در این مطالعه اثر اندرکنش سازه ـ خاک ـ سازه بر پاسخ غیرخطی سازه‌های بلند، با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی، به روش المان محدود، مورد بررسی قرار گرفته است. سازه‌های استفاده شده برای آنالیز شامل دو ساختمان ۱۵ و ۳۰ طبقه فولادی می‌باشند که به ترتیب در رده برجهای متوسط و بلند قرار دارند و برروی دو پروفیل خاک نرم و خاک سخت به فواصل یک چهارم و یک هشتم بعد پی، در نظر گرفته شده‌اند. مهمترین پارامترهای بررسی شده، شامل تغییرمکان جانبی غیرخطی و تغییرمکان نسبی میان طبقه‌ای غیرخطی سازه در طبقات می‌باشد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که بسته به مشخصات دینامیکی خاک، سازه و محتوای فرکانسی زلزله ورودی، اندرکنش سازه‌های مجاور می‌تواند باعث افزایش یا کاهش پاسخ دینامیکی سازه و میزان خسارت آن شود.

واژه‌های کلیدی اندرکنش خاک ـ سازه، سازه بلند، پاسخ دینامیکی، فرکانس طبیعی.

Study of Structure-Soil-Structure Interaction Effect on Nonlinear Response of Tall Buildings

F. Natheghi A. Rezaei F. Behnamfar

Abstract *In this study, Structure-Soil-Structure interaction effect on nonlinear response of high rise buildings using of dynamic nonlinear analysis by finite element method have been investigated. The structures used in this analysis are two 15 and 30 story steel structures which are categorized as mid-rise and high-rise towers. These structures have been studied under two distinct condators namely; $\frac{1}{8}$ and $\frac{1}{4}$ width of foundation in between located on two soft and hard soil profiles. The most important studied parameters include nonlinear lateral displacements and nonlinear interstory drifts. The outputs indicate that interaction of adjacent buildings can result in increase or decrese of level of damage, depending on dynamic specifications of soil, structure and frequency content of input motion.*

Key Words Soil-Structure Interaction, Tall Structures, Nonlinear Response, Natural Frequency.

---

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۱/۸/۲۰ و مقاله اصلاح‌شده در تاریخ ۸۱/۱۰/۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استاد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

(۲) کارشناس ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

(۳) استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

در حالت کلاسیک، برای آنالیز سازه فرض می‌شود که حرکت اعمال شده بر پایه سازه مساوی حرکت میدان آزاد زمین است. این پندار فقط برای ساختمانهای ساخته شده بر روی سنگ یا زمین سخت درست است. برای سازه‌های ساخته شده بر روی خاک نرم، حرکت شالوده عموماً با حرکت میدان آزاد متفاوت بوده و یک مؤلفه دورانی ناشی از انعطاف‌پذیری تکیه‌گاه به حرکات افقی شالوده اضافه می شود. برای سازه‌های بلند، این مؤلفه دورانی می‌تواند مهم باشد. حضور لایه خاک، محتوای فرکانسی حرکت زمین را تغییر داده و فرکانس‌های بالای آن را فیلتر می‌کند. اثر لایه خاک بر روی امواج زمین‌لرزه، نتیجه یک فرآیند پراکنش پیچیده است که می‌تواند به صورت بزرگنمائی یا کوچکنمائی دینامیکی در فرکانس‌های مختلف، بروز کند. اثر سازه در پاسخ ساختگاه به دو صورت انعکاس موج و انکسار آن خود را نشان می‌دهد:

انعکاس موج: زمانی‌که موج از یک محیط نرم (خاک) به یک محیط صلب (پی ساختمان) می‌رسد، منعکس می‌شود (اندرکنش سینماتیک)؛

انکسار موج: زمانی‌که موج از یک محیط نرم (خاک) به یک محیط نرم دیگر (سازه) می‌رسد، منکسر می‌شود (اندرکنش جرمی).

چنانچه مشخصات دینامیکی سازه و خاک یکسان باشد یا خیلی نزدیک به هم باشند، عمده موج وارد سازه شده و باعث به ارتعاش درآمدن آن می‌شود. از طرفی، اندرکنش خاک سازه به دلیل افزایش تغییرمکانهای جانبی سازه، نقش بسزائی در عملکرد آن داشته و پارامتر مهمی در آنالیز خسارت به شمار می‌رود. اندرکنش سازه‌های مجاور هم تحت بارگذاری زلزله، از اهمیت ویژه‌ای در آنالیز سازه‌های حساس برخوردار است. حضور سازه مجاور، بسته به مشخصات دینامیکی خاک و سازه و محتوای فرکانسی زلزله می‌تواند موجب تغییر در پاسخ دینامیکی سازه موردنظر شود [۱ و ۲]. برای آنالیز اندرکنش خاک سازه و اندرکنش سازه‌های مجاور هم، روش‌های مختلفی وجود دارد؛ در این مقاله تنها به روش المان محدود اشاره خواهد شد. در این روش کل سیستم خاک ـ پی ـ سازه بطور یکجا مدل شده و در یک گام منفرد تحلیل می‌شوند.

هدف اصلی مقاله، بررسی اثر اندرکنش سازه‌های مجاور بر پاسخ غیرخطی سازه‌های بلند می‌باشد. برای این منظور، دو سازه ۱۵ و ۳۰ طبقه فولادی بر روی دو پروفیل خاک نرم و خاک سخت، در فواصل یک هشتم و یک چهارم بعد پی، مورد آنالیز قرار گرفته‌اند که در قسمت مربوط به مدلسازی و نتایج عددی به تفصیل به آنها اشاره خواهد شد.

اندرکنش خاک سازه

در حالت کلاسیک برای آنالیز سازه با پای گیردار، حرکت اعمال شده به پایه سازه مساوی حرکت میدان آزاد زمین است. در حالت سازه با پای انعطاف‌پذیر، افزون بر آنکه یک مؤلفه دورانی به حرکت افقی سازه اضافه می‌شود، قسمتی از انرژی ارتعاشی سازه می‌تواند با انتقال به خاک زیرپی، بر اثر میرایی تشعشعی حاصل از انتشار موج و میرایی هیسترزیس مصالح خاک، تلف شود. درصورتی‌که در حالت کلاسیک با صلب فرض کردن خاک زیر سازه این اتلاف انرژی درنظر گرفته نمی‌شد.

بطور کلی اثرات اندرکنش خاک سازه را می‌توان در کاهش فرکانس طبیعی سیستم، افزایش میرایی، افزایش تغییرمکانهای جانبی سازه، افزایش اثر P-Δ برای سازه‌های بلند و تغییر در برش پایه ساختمان (بسته به محتوای فرکانسی زلزله و خواص دینامیکی خاک و سازه) خلاصه کرد.

روش‌های آنالیز اندرکنش خاک ـ سازه

برای آنالیز اندرکنش خاک ـ سازه و اندرکنش سازه‌های

www.SID.ir

Archive of SID

مجاور، روش‌های مختلفی وجود دارد. این روش‌ها عبارتند از: روش اجزاء محدود، روش اجزاء مرزی، روش تلفیقی و روش پارامترهای متمرکز در اینجا به روش المان محدود اشاره خواهد شد. در این روش سازه و خاک زیر پی تا فاصله مناسبی المان‌بندی شده و نگاشت حرکت زمین (بستر سنگی) به گره‌های مرزی خاک، روی سنگ بستر اعمال می‌شود (شکل ۱).

از معایب عمده این روش می‌توان به حجم زیاد ورودی و خروجی، پیچیدگی و وقت‌گیر بودن آن اشاره کرد. مزیت عمده این روش، امکان فرض رفتار غیرخطی برای مصالح خاک و سازه و همچنین، امکان مدلسازی هندسه‌های پیچیده می‌باشد. باتوجه به شکل (۱) معادله حرکت در حوزه زمان برای سیستم خاک و سازه مطابق رابطه زیر است [3] :

$$\begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] & [\bar{M}_{bi}] \\ [M_{bs}] & [M^{s}_{bb}]+[\bar{M}^{g}_{bb}] & \\ & [\bar{M}_{ib}] & [\bar{M}_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{r}^{t}_{s} \\ \ddot{r}^{t}_{b} \\ \ddot{r}^{t}_{i} \end{Bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] & [\bar{C}_{bi}] \\ [C_{bs}] & [C^{s}_{bb}]+[\bar{C}^{g}_{bb}] & \\ & [\bar{C}_{ib}] & [\bar{C}_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{r}^{t}_{s} \\ \dot{r}^{t}_{b} \\ \dot{r}^{t}_{i} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] & [\bar{K}_{bi}] \\ [K_{bs}] & [K^{s}_{bb}]+[\bar{K}^{g}_{bb}] & \\ & [\bar{K}_{ib}] & [\bar{K}_{ii}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r^{t}_{s} \\ r^{t}_{b} \\ r^{t}_{i} \end{Bmatrix} =$$

$$-\begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \\ [\bar{M}_{ir}]\{\ddot{r}^{f}_{r}\}+[\bar{C}_{ir}]\{\dot{r}^{f}_{r}\}+[\bar{K}_{ir}]\{r^{f}_{r}\} \end{Bmatrix} \qquad (۱)$$

مطابق شکل (۱) یک سازه تنها به همراه شالوده انعطاف‌پذیر شامل پی گسترده و دیوارهای حائل به صورت مدفون در خاک درنظر گرفته شده است و محدوده خاک از طرفین به مرزهایی که در فاصله دور از سازه قرار دارند، محدود است. مصالح خاک، دارای میرایی ماده‌ای است و فاصله مرزهای کناری به‌گونه‌ای درنظر گرفته شده که امواج منتشره از فصل مشترک خاک و سازه در حین زلزله به این مرزها نرسد. برای مشخص شدن گره‌های مدل از زیرنویس‌هایی به شرح زیر استفاده شده است. گره‌هایی که در فصل مشترک خاک و سازه قرار دارند با زیرنویس b، گره‌های خود سازه با زیرنویس s، گره‌های خاک در محدوده داخلی با زیرنویس i و گره‌های خاک روی مرزها با زیرنویس r مشخص شده‌اند. حرف s نشان دهنده سازه، حرف g نشان دهنده زمین خاکبرداری شده و حرف f نشان دهنده میدان آزاد است. در رابطه فوق ماتریس‌های [M]، [C] و [K] نشان دهنده جرم، میرایی و سختی استاتیکی می‌باشند. برای ماتریس‌های مشخصه گره‌های خاک واقع در داخل محدوده (i) از بالانویس (بار) استفاده شده است. بردار {r} نشان دهنده جابجایی و حرف t به معنی کل می‌باشد.

ملاحظات مربوط به روش المان محدود

ابعاد المان‌ها. چگونگی تقسیم‌بندی و ابعاد المان‌ها، تأثیر بسزائی بر پاسخ سیستم دارد. استفاده از شبکه‌های بزرگ المان محدود، باعث فیلتر شدن مؤلفه‌های با فرکانس بالا می‌شود، چراکه طول موج کوتاه آنها قابل مدلسازی به‌وسیله نقاط گرهی با فواصل زیاد نمی‌باشد. بزرگترین بعد هر المان باید به یک هشتم تا یک پنجم کوتاهترین طول موج درنظر گرفته‌شده درآنالیزمحدود شود [٤].

شرایط مرزی. در آنالیز المان محدود، کاهش تعداد المان‌ها سبب افزایش سرعت محاسبات می‌گردد. در بیشتر مسائل اندرکنش خاک سازه، مرزهای صلب یا تقریباً صلب مانند بستر سنگی، در فاصله قابل ملاحظه‌ای از ناحیه موردنظر قرار دارند. درنتیجه امواج

www.SID.ir

Archive of SID

منتشر شده از فصل مشترک خاک و سازه به اندازه کافی میرا می‌شود. در روش المان محدود، نحوه مدلسازی مرزها از اهمیت خاصی برخوردار است. انواع مرزها در تحلیل المان محدود را می‌توان به سه گروه مرزهای ابتدایی، مرزهای محلی و مرزهای سازگار تقسیم‌بندی کرد که در زیر به آنها اشاره‌ای کوتاه می‌شود [٤]:

مرزهای ابتدایی. شرایط مرزی جابجایی صفر به‌وسیله مرزهای ابتدایی مشخص می‌شود (شکل ۲-الف). خاصیت انعکاس کامل مرزهای ابتدائی سبب حبس شدن انرژی در داخل سیستم می‌شود. به این پدیده اثر جعبه‌ای می‌گویند. اثر جعبه‌ای موجب ایجاد خطاهای قابل توجه در پاسخ سیستم می‌گردد. فاصله مرزهای ابتدائی باید به حد کافی‌دورتر از فصل‌مشترک خاک و سازه قرار گیرد تا امواج منتشره میرا شده و به آن نرسد.

مرزهای محلی. استفاده از میراگر ویسکوز (شکل ۲ـ ب) نشان دهنده یک مرز محلی معمولی است [۳]. 1985,Wolf ثابت کرد که مقدار ضریب میراگر لازم برای جذب کامل انرژی، وابسته به زاویه موج برخورد کننده می‌باشد. امواج با زوایای مختلفی به مرز برخورد می‌نمایند یک مرز محلی با ضریب میراگر ثابت، همواره قسمتی از انرژی موج برخورد کننده را منعکس خواهد کرد. با افزایش فاصله بین مرز و محدوده موردنظر می‌توان اثرات انعکاس از مرزهای محلی را کاهش داد.

مرزهای سازگار یا انتقالی. این‌گونه مرزها، مرزهایی هستند که می‌توانند تمامی امواج حجمی و سطحی را در کلیه زوایای برخورد و همه فرکانس‌ها، جذب نمایند. یک نمونه از این مرزها در شکل (۳) نشان داده شده است. این مدل علاوه بر اینکه به عنوان مرزهای سازگار استفاده می‌شود،می‌تواند برای مدلسازی اندرکنش شمع‌های مجاور هم‌بکارگرفته شود [5] .

ملاحظات عملی در تحلیل اندرکنش خاک- سازه

انتخاب مدل مناسب برای نشان دادن خواص خاک. برای زمین‌لرزه‌های با $PGA \le 0.4\ g$ روی سنگ بستر به شرط آنکه حداکثر کرنش برشی ایجاد شده در خاک، کمتر از 0.01 باشد مدل خطی معادل، مدل مناسبی برای مدلسازی رفتار غیرخطی خاک خواهد بود (شکل ٤). در این مدل، سختی معادل خاک با استفاده از مدول برشی سکانت و میرایی ویسکوز معادل با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شوند [٤]:

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \qquad (۲)$$

$$\zeta = \frac{1}{4\pi}\frac{W_D}{W_S} \qquad (۳)$$

در روابط بالا، G_{sec} مدول برشی سکانت، τ_c تنش برشی بیشینه، γ_c کرنش برشی بیشینه، ζ میرایی معادل، W_D انرژی مستهلک شده در یک سیکل کامل و W_S انرژی کرنشی بیشینه می‌باشد.

انتخاب روش آنالیز. در صورتی که شرایط یاد شده برای حداکثر شتاب زمین‌لرزه و کرنش برشی بیشینه ایجاد شده در خاک صادق باشد، روش خطی معادل یکی از مناسبترین و متداولترین روش‌ها، برای آنالیز اندرکنش خاک سازه خواهد بود.در این روش، رفتار غیرخطی خاک، به‌وسیله مدل خطی معادل درنظر گرفته می‌شود. نکته مهم، تعیین سختی و میرایی مناسب برای المان‌های خاک می‌باشد که به روش سعی و خطا انجام می‌شود. در آغاز با حدس مقادیر اولیه برای سختی و میرایی، آنالیز، یکبار بطور کامل انجام شده و سپس براساس کرنش برشی بیشینه خاک، مقادیر آن اصلاح می‌گردد و این روند تا همگرایی نتایج ادامه می‌یابد [۱و ٤].

www.SID.ir

Archive of SID

انتخاب سنگ کف لرزه‌ای . سنگ کف لرزه‌ای، مبدأ حرکات وارده به لایه خاک است. سنگ کف لایه‌هایی از زمین است که دارای صلبیت بالایی بوده و تأثیرات ساختگاهی چندانی نداشته باشد. عموماً لایه‌هایی از زمین که دارای سرعت موج برشی بیش از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بر ثانیه می‌باشند، به عنوان سنگ کف لرزه‌ای انتخاب می‌شوند [۱].

انتخاب حرکات ورودی مناسب . استفاده از زمین‌لرزه مناسب در آنالیز اندرکنش خاک‌ـسازه بسیار حائز اهمیت است. شتابنگاشت انتخاب شده باید مشخصات موردنظر برای حرکت لرزه‌ای سنگ کف (از جمله شتاب حداکثر، محتوای فرکانسی، مدت زمان لرزش، بزرگا، فاصله از مرکز زلزله و رژیم تکتونیکی منطقه) را دارا باشد. بهترین حرکت ورودی، شتابنگاشتی است که در محل موردنظر، طی یک زمین‌لرزه واقعی ثبت شده باشد. در صورت عدم وجود نگاشتی ایده‌آل برای محل، می‌توان از شتابنگاشتهایی که منشاء ایجاد آن با منشاء زلزله محتمل محل همانند بوده و بر روی رخنمون سنگی ثبت شده باشند، استفاده نمود. برای اینکار، حداکثر شتاب و پریود غالب شتابنگاشت باید به حداکثر شتاب و پریود غالب سنگ بستر همپایه شوند. تغییر پریود غالب شتابنگاشت انتخابی به پریود غالب موردنظر به این صورت است که اگر فواصل زمانی مقادیر شتابنگاشت انتخاب شده Δt_1 و پریود غالب آن T_1 باشد، پریود غالب موردنظر T_2 به‌وسیله تبدیل فواصل زمانی شتابنگاشت به مقدار Δt_2 از رابطه زیر بدست می‌آید [۱]:

$$\Delta t_2 = \frac{T_2}{T_1}\Delta t_1 \qquad (٤)$$

معرفی مدل

معرفی سازه‌ها . اولین گام برای آنالیز اندرکنش سازه‌های مجاور هم، انتخاب ابعاد مناسب برای سازه‌ها، از نظر ارتفاع و بعد پی می‌باشد. سازه‌های انتخاب شده دارای ابعاد پلان ۲۰m×۲۰m بوده و به ارتفاع ٤۵ متر و ۹۰ متر می‌باشند و از لحاظ رده‌بندی، در رده برجهای متوسط و بلند قرار دارند. سازه اول با ارتفاع ٤۵ متر در ۱۵ طبقه وسازه دوم با ارتفاع ۹۰ متر در ۳۰ طبقه می‌باشد. جرم سازه‌ها در طبقات [$DL + 0.2LL = 800 kg/m^2$] می‌باشد.هر دو سازه دارای سیستم قاب خمشی ویژه فولادی بوده و بارگذاری زلزله برای هر کدام، براساس فرض خاک نوع III، مطابق آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران به صورت آنالیز مودال انجام گرفته و برش پایه حاصل از آنالیز مودال به برش پایه حاصل از روش استاتیکی معادل افزایش داده شده است. در طراحی المان‌های سازه‌ای، کلیه ضوابط آئین‌نامه برای قاب خمشی ویژه، مورد توجه قرار گرفته است. آنالیز و طراحی سازه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ETABS انجام شده است. سازه‌ها در هر طرف شامل چهار دهانه ۵ متری می‌باشند (شکل ۵). ابعاد المان‌های سازه‌ای در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است.

معرفی لایه خاک . مهمترین پارامتر در انتخاب لایه خاک، پریود دینامیکی آن است که متناظر با فرکانس مود اول سایت در آنالیز میدان آزاد، پس از غیرخطی شدن خاک می‌باشد. در اینجا از یک پروفیل خاک نرم که هم پریود با سازه ۱۵ طبقه و یک پروفیل خاک سخت که هم پریود با پریود غالب سنگ بستر است، استفاده شده است (شکل ٦). هر دو پروفیل، مربوط به جنوب شهر تهران می‌باشند. پروفیل شماره ۱ به لحاظ پریود دینامیکی لایه خاک، یک پروفیل بحرانی برای ساختمان‌های بلند محسوب می‌شود. برای بررسی اثر سختی خاک، از پروفیل شماره ۲ که پریود دینامیکی آن فاصله زیادی با پریود ساختمانهای بلند دارد، استفاده شده است. هر دو پروفیل خاک، از جنس رس بوده و بر روی بستر سنگی قرار دارند.

www.SID.ir

Archive of SID

معرفی نرم‌افزار و المان‌های استفاده شده برای مدلسازی سازه و خاک . کلیه آنالیزها به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 5.4 نگارش انجام شده است. مدلسازی به صورت دو بعدی بوده و برای مدلسازی المان‌های سازه‌ای از المان beam23 و برای مدلسازی خاک از المان Plane 42 در حالت کرنش مسطح استفاده شده است. المان beam 23 یک المان تیر دو بعدی با قابلیت لحاظ کردن رفتار غیرخطی مصالح و اثر P.Δ و المان Plane 42 یک المان چهار گرهی است که هرگره آن دارای دو درجه آزادی انتقالی می‌باشد. رفتار غیرخطی مصالح فولادی با استفاده از مدل دو خطی با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و رفتار غیرخطی مصالح خاک، به روش خطی معادل و با بهره‌گیری از یک ماکرو مدل شده است. مدلسازی جرم سازه با المان mass 21 و به صورت متمرکز می‌باشد. تحلیلها به روش دینامیکی غیرخطی و با لحاظ کردن اثر P.Δ انجام گرفته است. برای مدلسازی رفتار غیرخطی مصالح خاک، سختی و میرایی متغیر با تراز کرنش، با استفاده از منحنی‌های ارائه شده توسط (1969, Idriss, Seed) تعریف گردیده است.

معرفی رکورد . رکوردهای استفاده شده برای آنالیز، به زمین لرزه‌های ال سنترو، طبس و لوماپریتا مربوط می‌باشد که در این مقاله، به دلیل تشابه نتایج حاصل از آنالیز در ارتباط با اثر اندرکنش سازه‌های مجاور، به ارائه نتایج مربوط به زمین‌لرزه لوماپریتا بسنده شده است. رکورد مربوط به زمین‌لرزه لوماپریتا در ایستگاه Gilroy.1 بر روی رخنمون سنگی ثبت شده و PGA و پریود غالب آن، به ترتیب، g ۰/۴۱و ۰/۲ ثانیه می‌باشدکه به PGA و پریود غالب سنگ بستر در تهران، همپایه شده است. لایه‌های خاک با سرعت موج برشی بالاتر از ۸۰۰ متر بر ثانیه به عنوان سنگ کف لرزه‌ای درنظر گرفته شده‌اند. پریود غالب سنگ بستر، باتوجه به طول گسل‌های فعال در منطقه تهران، برای زمین‌لرزه به بزرگی ۷/۵ ریشتر و فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر، براساس منحنی‌های ارائه شده توسط (1969,Idriss, Seed) [۲]، ۰/۳۵ ثانیه بدست آمده است. PGA سنگ بستر برای زمین‌لرزه با دوره بازگشت ۴۷۵ سال مساوی0.4g درنظر گرفته شده است تا طراحی لرزه‌ای انجام گرفته براساس آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، با استفاده از آنالیز دینامیکی غیرخطی کنترل شود [۱].

کنترل نتایج آنالیز . همانطور که اشاره شد، مدلسازی رفتار غیرخطی خاک، به روش خطی معادل با استفاده از یک ماکرو در نرم‌افزار ANSYS صورت گرفته است. برای خاطر جمعی از درستی نتایج، پاسخ میدان آزاد زمین، با استفاده از نرم‌افزار FLUSH که یک نرم‌افزار معتبر برای آنالیز اندرکنش خاک‌ـسازه است، محاسبه شده و با نتایج حاصل از ANSYS مقایسه گردیده است که در بخش نتایج عددی به آن اشاره خواهد شد. نتایج بدست آمده، بیانگر دقت بالای مدلسازی خاک با استفاده از نرم‌افزار ANSYS است.

مدلسازی میرایی هندسی، نوع مرزها، ابعاد المان‌ها و فاصله سازه‌ها مرزهای جانبی سیستم از نوع مرزهای ساده بوده که برای مدلسازی میرایی هندسی، خاک زیر سازه با استفاده از شبکه المان محدود تا فاصله مناسبی المان‌بندی شده تا امواج منتشر شده از فصل مشترک سازه و خاک بطور مطلوبی میرا شود. برای این کار مرزهای جانبی سیستم از هر طرف تا فاصله ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ برابر شعاع پی، امتداد داده شد ملاحظه گردید پاسخ سیستم خاک سازه در حالت ۱۸ برابر به همگرایی می‌رسد از این‌رو، مرزهای جانبی در فاصله ۱۸۰ متر از لبه پی قرار دارند. برای تعیین ابعاد المان‌های خاک نیز از یک فرآیند سعی و خطا (با انتخاب ابعاد مختلف برای المان‌ها) استفاده شده و باتوجه به همگرایی پاسخ، ابعاد المان‌ها در پروفیل

www.SID.ir

Archive of SID

شماره ۱، ۳ متر برای لایه بالا و ٦ متر برای لایه پائین و در پروفیل شماره ۲، ۲/٦۷ متر انتخاب گردید. فاصله بین سازه‌ها، ۲/۵ و ۵ متر است که به ترتیب با یک هشتم و یک چهارم بعد پی متناظر باشند.

نتایج عددی

در این قسمت، نتایج آنالیز میدان آزاد برای پروفیل خاک سخت (خاک شماره ۲)، که با بکارگرفتن نرم‌افزارهای FLUSH و ANSYS بدست آمده‌اند، ارائه شده است. مطابق شکل (۸)، مدلسازی غیرخطی خاک، توسط ANSYS از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. نتایج بدست آمده از آنالیز سازه‌های ۱۵ و ۳۰ طبقه برای مدلهای مختلف اندرکنشی، در جدول‌های (۳ تا ٦) آورده شده است. نتایج به صورت حداکثر جابجائی غیرخطی طبقات و حداکثر دریفت میان طبقه‌ای در طبقات مختلف سازه می‌باشد. مقادیر پاسخ غیرخطی سازه‌ها در شکل‌های (۹ تا ۱۲) به صورت منحنی رسم شده‌اند و عملکرد سازه‌ها براساس آئین‌نامه fema 273 تخمین زده شده است[6] . مطابق این آئین‌نامه، برای سازه‌های فولادی با سیستم قاب خمشی، در صورتی‌که حداکثر تغییرمکان نسبی غیرخطی، کمتر از ۰/۷ درصد باشد، سازه در مرحله عملکرد کامل، در صورتی‌که حداکثر تغییرمکان نسبی غیرخطی بین ۰/۷ تا ۲/۵ درصد باشد، سازه در مرحله ایمنی جانی، برای حداکثر تغییرمکان نسبی غیرخطی بین۲/۵ تا ۵ درصد، سازه در حد پیش از فروریزش قرار داشته و برای مقادیر بالاتر از ۵ درصد، دچار فروریزش می‌شود[6] .

نتایج مربوط به پروفیل خاک شماره ۱ (خاک نرم)

مقایسه سیستم اندرکنش خاک سازه با سیستم اندرکنش سازه‌های یکسان مجاور هم. سازه ۳۰ طبقه: باتوجه به نتایج بدست آمده، اندرکنش سازه‌های ۳۰ طبقه مجاور هم باعث کاهش پاسخ غیرخطی سازه، شامل دریفت‌ها و تغییرمکانهای غیرخطی طبقات، نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه تنها می‌شود. که مقدار این کاهش کمتر از ۱۰ درصد است. با افزایش فاصله سازه‌ها از ۲/۵ متر به ۵ متر، پاسخ سازه دچار کاهشی جزئی، در حدود ۵ درصد، می‌گردد. باتوجه به مقادیر حداکثر دریفت غیرخطی طبقات، سازه از نظر عملکرد در مرحله ایمنی جانی قرار دارد و اندرکنش سازه‌های یکسان مجاور هم باعث تغییر در سطح عملکرد سازه نمی‌شود ولی انتظار می‌رود خسارت سازه ۳۰ طبقه در اثر اندرکنش سازه یکسان مجاور، کاهش پیدا کند.

سازه ۱۵ طبقه: اندرکنش سازه‌های مجاور ۱۵ طبقه مجاور هم باعث کاهش پاسخ غیرخطی سازه، شامل دریفت‌ها و تغییرمکانهای غیرخطی طبقات، نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه تنها می‌شود. مقدار این کاهش در حدود ۲۰ درصد است. با افزایش فاصله بین سازه ها از ۲/۵ متر به ۵ متر، مقدار پاسخ غیرخطی سازه با نرخ کمتر از ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. باتوجه به مقادیر حداکثر دریفت غیرخطی طبقات، سازه از نظر عملکرد در مرحله ایمنی جانی قرار دارد و اندرکنش سازه‌های یکسان مجاور هم باعث تغییر در سطح عملکرد سازه نمی‌شود ولی خسارت سازه ۱۵ طبقه در اثر اندرکنش سازه یکسان مجاور، دچار کاهش خواهد شد.

مقایسه سیستم اندرکنش خاک سازه با سیستم اندرکنش سازه‌های غیریکسان مجاور هم . سازه ۳۰ طبقه: اندرکنش سازه‌های ۱۵ و ۳۰ طبقه مجاوو هم باعث کاهش پاسخ غیرخطی سازه ۳۰ طبقه، شامل دریفت‌ها و تغییرمکانهای طبقات، نسبت به سیستم اندرکنش خاک و سازه ۳۰ طبقه می‌شود که نرخ این کاهش حدود ۱۰ درصد است. با افزایش فاصله بین سازه‌ها از ۲/۵ متر به ۵ متر، پاسخ سازه دچار افزایشی

www.SID.ir

Archive of SID

در حدود ۵ درصد می‌شود. باتوجه به مقادیر حداکثر دریفت غیرخطی طبقات، سازه از نظر علمکرد در مرحله ایمنی جانی قرار دارد و اندرکنش سازه مجاور باعث تغییر در سطح عملکرد آن نمی‌شود ولی انتظار می‌رود، خسارت سازه ۳۰ طبقه در اثر اندرکنش سازه غیریکسان مجاور، دچار کاهش شود.

سازه ۱۵ طبقه: نکته مهمی که در نتایج آنالیز مشاهده می‌شود، افزایش پاسخ غیرخطی سازه ۱۵ طبقه، شامل دریفت‌ها و تغییرمکانهای طبقات (با نرخ حدود ۳۵ درصد)، در اثر حضور سازه ۳۰ طبقه مجاور می‌باشد که علت آن‌را می‌توان به هم فرکانس بودن سازه ۱۵ طبقه با لایه خاک زیرین ربط داد. این امر سبب می‌شود عمده موج زلزله، که قبلاً توسط لایه خاک (در پریود دینامیکی لایه خاک) تشدید شده، جذب سازه ۱۵ طبقه شود. باتوجه به مقادیر حداکثر دریفت غیرخطی طبقات، سازه ۱۵ طبقه در مرحله ایمنی جانی قرار داشته و اندرکنش سازه غیرهمسان مجاور، باعث تغییر در سطح علمکرد آن نمی‌شود ولی افزایش قابل توجهی در میزان خسارت سازه ۱۵ طبقه در اثر حضور سازه ۳۰ طبقه مجاور، رخ می‌دهد.

نتایج مربوط به پروفیل خاک شماره ۲ (خاک سخت)

مقایسه سیستم اندرکنش خاک سازه با سیستم اندرکنش سازه‌های یکسان مجاور هم. سازه ۳۰ طبقه: اندرکنش سازه‌های ۳۰ طبقه مجاور هم، تغییر چندانی در پاسخ غیرخطی سیستم، شامل دریفت‌ها و تغییرمکانهای طبقات، بوجود نمی‌آورد و اثر حضور سازه مجاور همسان قابل چشم‌پوشی کردن است. افزایش فاصله سازه‌ها از ۲/۵ متر به ۵ متر نیز موجب تغییر در پاسخ سیستم نمی‌شود. باتوجه به مقادیر حداکثر دریفت‌ها، عملکرد سازه در مرحله ایمنی جانی قرار داشته و اندرکنش سازه‌های یکسان مجاور، باعث تغییر در میزان خسارت سازه ۳۰ طبقه نمی‌شود.

سازه ۱۵ طبقه: اندرکنش سازه‌های مجاور ۱۵ طبقه، باعث کاهش پاسخ غیرخطی سازه، شامل دریفت‌ها و تغییرمکانهای غیرخطی طبقات، نسبت به حالت اندرکنش خاک و سازه تنها می‌شود که مقدار این کاهش، کمتر از ۱۰ درصد است. با افزایش فاصله بین سازه‌ها از ۲/۵ متر به ۵ متر، تغییرچندانی در مقدار پاسخ مشاهده نمی شود. باتوجه به مقادیر حداکثر دریفت غیرخطی طبقات، سازه از نظر عملکرد در مرحله ایمنی جانی قرار دارد و اندرکنش سازه‌های یکسان مجاور هم باعث تغییر در سطح عملکرد سازه نمی‌شود ولی انتظار می‌رود خسارت سازه ۱۵ طبقه در اثر اندرکنش سازه همسان مجاور، دچار کاهش جزئی شود.

مقایسه سیستم اندرکنش خاک سازه با سیستم اندرکنش سازه‌های غیریکسان مجاور هم. سازه ۳۰ طبقه : اندرکنش سازه‌های ۱۵ و ۳۰ طبقه مجاور هم، باعث کاهش پاسخ غیرخطی سازه ۳۰ طبقه، شامل دریفت‌ها و تغییرمکانهای طبقات، نسبت به سیستم اندرکنش خاک و سازه ۳۰ طبقه می‌شود که نرخ این کاهش حدود ۵ درصد است. با افزایش فاصله بین سازه‌ها از ۲/۵ متر به ۵ متر، تغییری در پاسخ سیستم ایجاد نمی‌شود. باتوجه به مقادیر حداکثر دریفت غیرخطی طبقات، سازه ۳۰ طبقه در مرحله ایمنی جانی قرار دارد و اندرکنش سازه ۱۵ طبقه مجاور، باعث کاهش جزئی در میزان خسارت خواهد شد ولی تغییری در سطح عملکرد سازه بوجود نمی‌آورد.

سازه ۱۵ طبقه: اندرکنش سازه‌های ۱۵ و ۳۰ طبقه مجاور هم، باعث کاهش پاسخ غیرخطی سازه ۱۵ طبقه، شامل دریفت‌ها و تغییرمکانهای طبقات، نسبت به سیستم اندرکنش خاک و سازه ۱۵ طبقه می‌شود که نرخ این کاهش کمتر از ۱۵ درصد است. با افزایش فاصله

www.SID.ir

Archive of SID

سازه‌ها از ۲/۵ متر به ۵ متر، تغییر چندانی در مقدار پاسخ مشاهده نمی‌شود. باتوجه به مقادیر حداکثر دریفت غیرخطی طبقات، سازه از نظر عملکرد در مرحله ایمنی جانی قرار دارد و پاسخ سازه ۱۵ طبقه در اثر اندرکنش سازه غیریکسان مجاور، دچار کاهش خواهد شد

نتیجه‌گیری

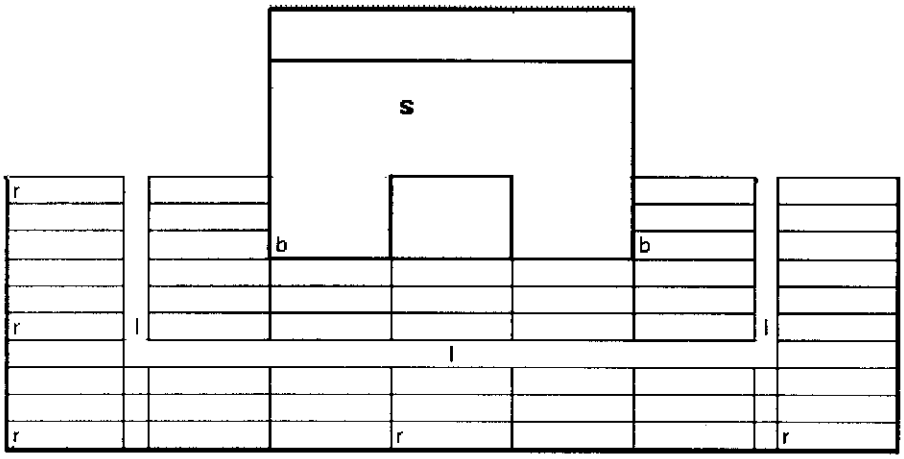
نتیجه کلی بدست آمده از این تحقیق، آن است که اثر اندرکنش سازه‌های مجاور هم در مواردی که پریود دینامیکی خاک و سازه نزدیک بهم باشند، نقش قابل توجهی در افزایش پاسخ غیرخطی (شامل تغییرمکانها و دریفت‌های طبقات) و خسارت سازه خواهد داشت و قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد. در سایر موارد که پریود دینامیکی لایه خاک فاصله زیادی با پریود سازه دارد، اندرکنش سازه‌های مجاور معمولاً اثر کاهنده بر پاسخ غیرخطی و خسارت سازه از خود نشان می‌دهد.

فهرست علائم

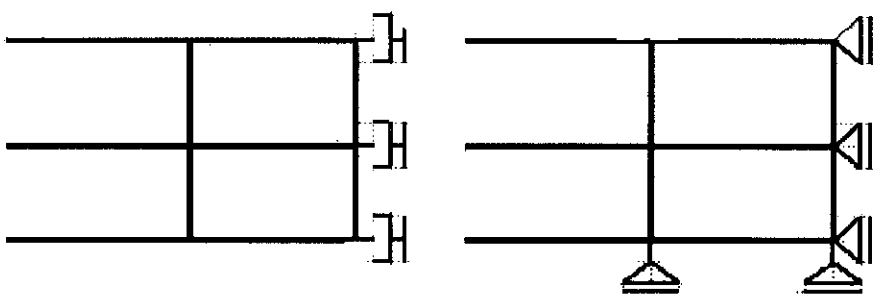
جرم المان‌های سازه‌ای	M_{ss}
جرم المان‌های پی	m_{bb}
جرم المان‌های خاک	$\overline{m}_{ii}$
میرایی المان‌های مشترک پی و سازه	C_{sb}, S_{bs}
میرایی المان‌های مشترک پی و خاک	$\overline{C}_{bi}, \overline{C}_{ib}$
سختی المان‌های سازه‌ای	K_{ss}
سختی المان‌های پی	K_{bb}
سختی المان‌های خاک	$\overline{K}_{ii}$
بردارهای تغییرمکان، سرعت و شتاب کلی پی	$r_b^t, \dot{r}_b^t, \ddot{r}_b^t$
جرم المان‌های مشترک خاک و مرز	$\overline{M}_{ir}$
مدول برشی سکانت	G_{sec}
کرنش برشی بیشینه	γ_c
گامهای زمانی شتابنگاشت اصلاح شده	Δt_2
پریود غالب زمین‌لرزه مورد انتظار	T_2
جرم المان‌های مشترک پی و سازه	M_{sb}, M_{bs}
جرم المان‌های مشترک پی و خاک	$\overline{m}_{bi}, \overline{m}_{ib}$
میرایی المان‌های سازه‌ای	C_{ss}
میرایی المان‌های پی	C_{bb}
میرایی المان‌های خاک	$\overline{C}_{ii}$
سختی المان‌های مشترک پی و سازه	K_{sb}, K_{bs}
سختی المان‌های مشترک پی و خاک	$\overline{K}_{bi}, \overline{K}_{ib}$
بردارهای تغییرمکان، سرعت و شتاب کلی سازه	$r_s^t, \dot{r}_s^t, \ddot{r}_s^t$
بردارهای تغییرمکان، سرعت و شتاب کلی خاک	$r_i^t, \dot{r}_i^t, \ddot{r}_i^t$
میرایی المان‌های مشترک خاک و مرز	$\overline{C}_{ir}$
تنش برشی بیشینه	τ_c
گامهای زمانی شتابنگاشت موجود	Δt_1
پریود غالب زمین‌لرزه موجود	T_1
مدل اندرکنش خاک و سازه ۱۵ طبقه	ssi15
مدل اندرکنش خاک و سازه ۳۰ طبقه	ssi30
مدل اندرکنش سازه‌های مجاور ۱۵ طبقه به فاصله ۵ متر	sssi15L=5
مدل اندرکنش سازه‌های مجاور ۳۰ طبقه به فاصله ۵ متر	sssi30L=5
مدل اندرکنش سازه‌های مجاور ۳۰ و ۱۵ طبقه به فاصله ۵ متر از هم	sssi3015L=5
مدل اندرکنش سازه‌های مجاور ۱۵ طبقه به فاصله ۲/۵ متر	sssi15L=2.5
مدل اندرکنش سازه‌های مجاور ۳۰ طبقه به فاصله ۲/۵ متر	sssi30L=2.5
مدل اندرکنش سازه‌های مجاور ۳۰ و ۱۵ طبقه به فاصله ۲/۵ متر از هم	sssi3015L=2.5

www.SID.ir

Archive of SID

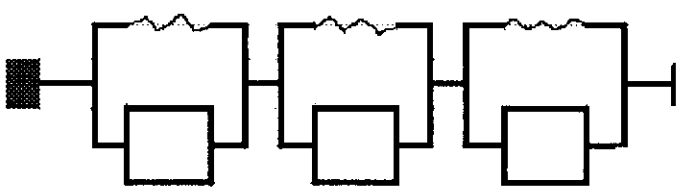


شکل ۱ کل سیستم خاک و سازه [3]



(ب) (الف)

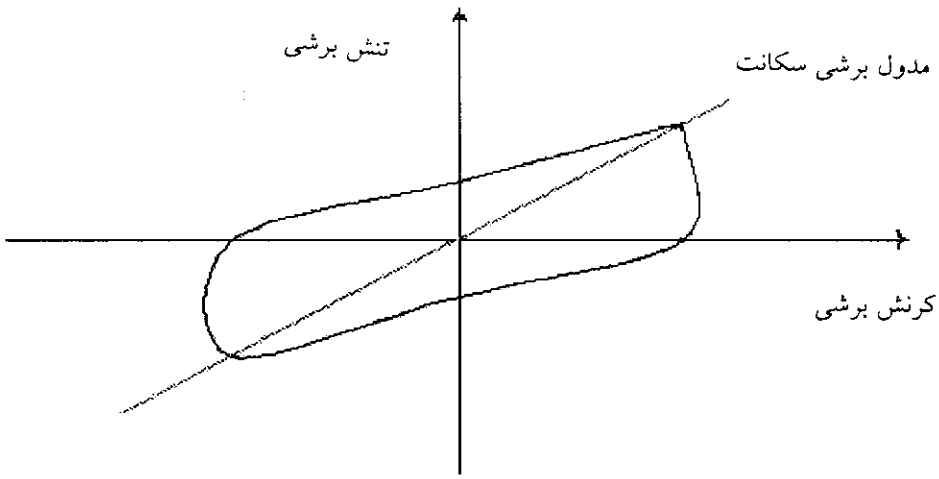
شکل ۲ الف- مدل مرزهای ساده، ب- مدل مرزهای محلی [3]



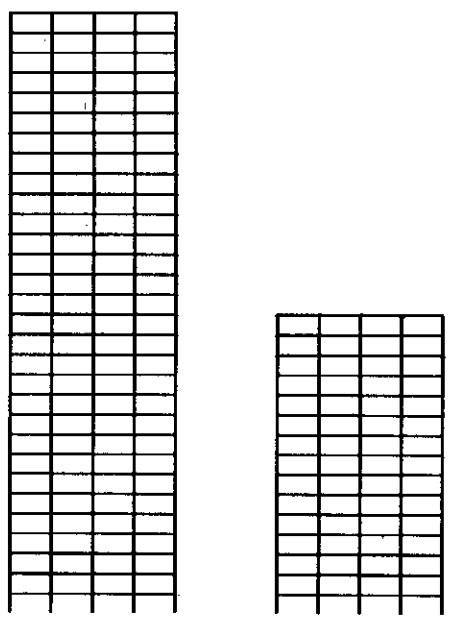
شکل ۳ مدل مرزهای انتقالی [5]

www.SID.ir

Archive of SID



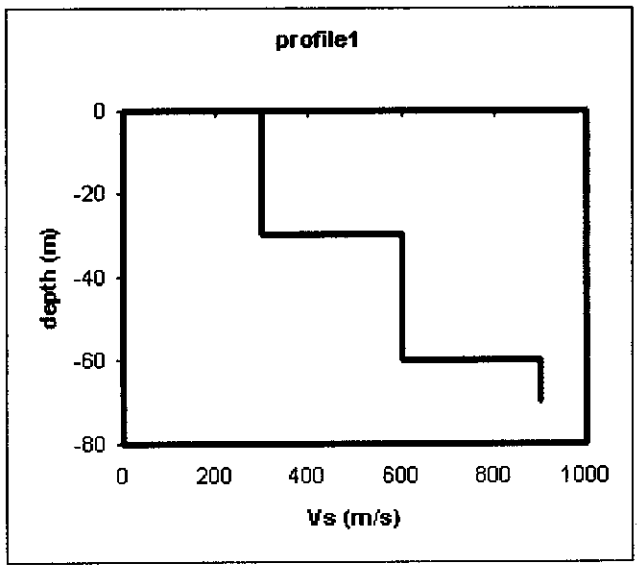
شکل ٤ مدل خطی معادل خاک[٤]

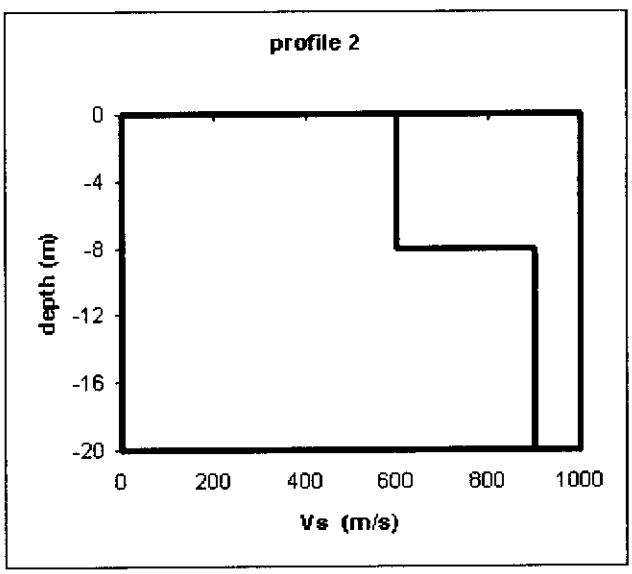


شکل ٥ مدل سازه‌ها الف- سازه ۱۵ طبقه، ب- سازه ۳۰ طبقه

www.SID.ir

Archive of SID

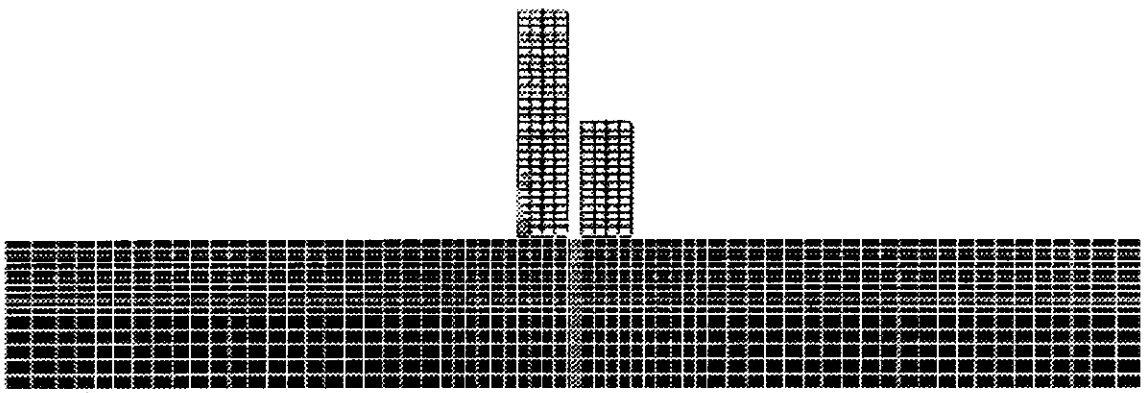




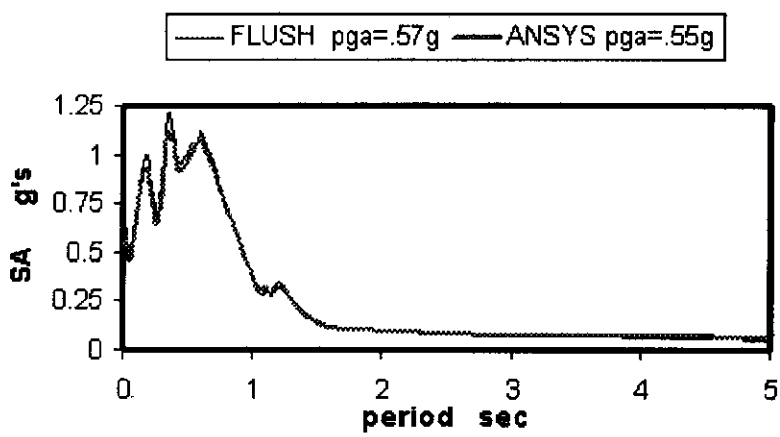
شکل ٦ مشخصات پروفیل‌های خاک

www.SID.ir

Archive of SID



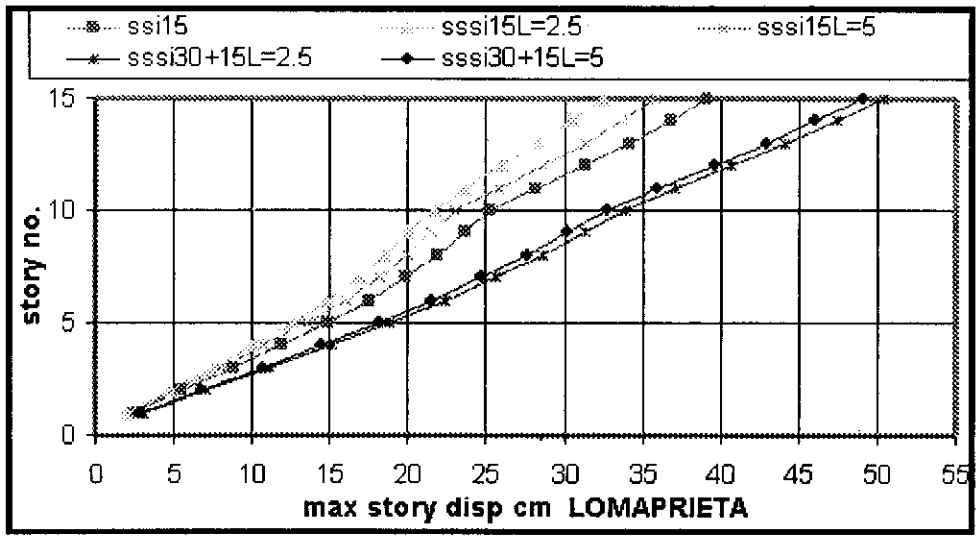
شکل ۷ مدل المان محدود اندرکنش سازه‌های ۱۵ و ۳۰ طبقه به فاصله ۵ متر از هم بر روی پروفیل خاک نرم (خاک شماره ۱)



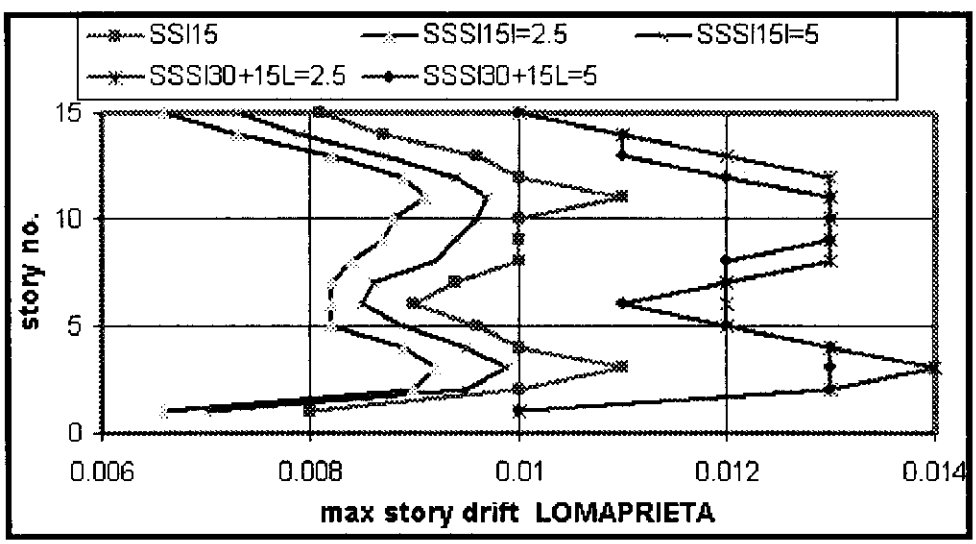
شکل ۸ طیف پاسخ شتاب لوماپریتا، پروفیل خاک شماره ۲ (میرایی ۵ درصد)

www.SID.ir

Archive of SID



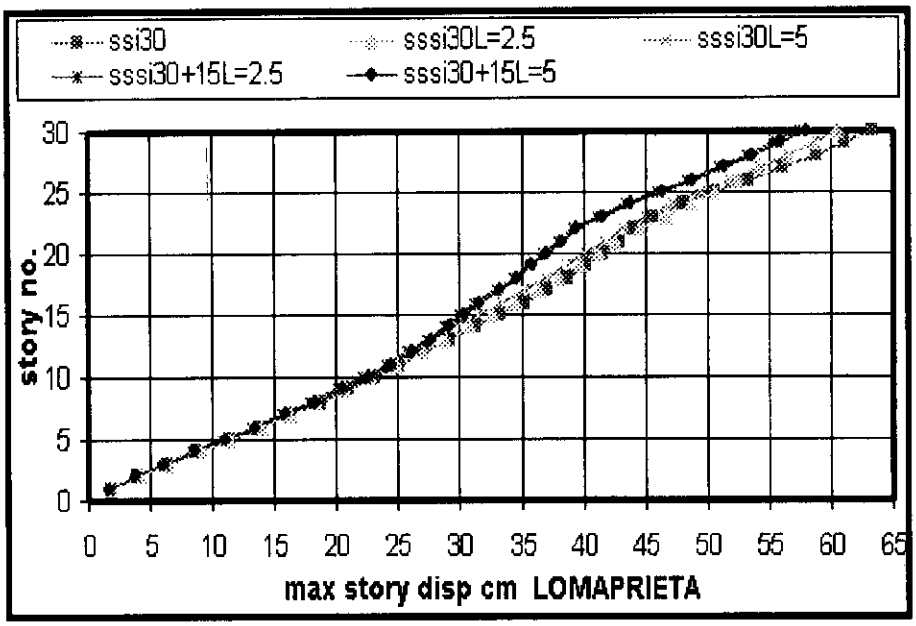
شکل ۹ حداکثر جابجایی غیرخطی سازه ۱۵ طبقه برای مدلهای مختلف اندرکنشی (لوماپریتا) پروفیل خاک شماره ۱



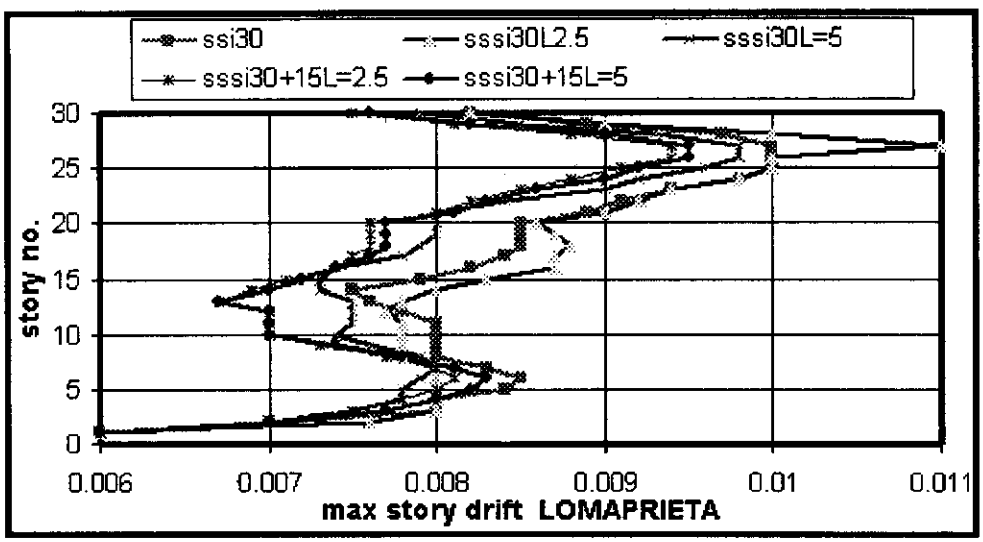
شکل ۱۰ حداکثر دریفت غیرخطی سازه ۱۵ طبقه برای مدلهای مختلف اندرکنشی (لوماپریتا) پروفیل خاک شماره ۱

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۱ حداکثر جابجایی غیرخطی سازه ۳۰ طبقه برای مدل‌های مختلف اندرکنشی (لوماپریتا) پروفیل خاک شماره ۲



شکل ۱۲ حداکثر دریفت غیرخطی سازه ۳۰ طبقه برای مدل‌های مختلف اندرکنشی (لوماپریتا) پروفیل خاک شماره ۲

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ مشخصات مقاطع ستون‌ها در طبقات مختلف سازه ۱۵ طبقه .

Columns in Story no	طول H (cm)	عرض B (cm)	ضخامت t (cm)
۱-۵	٤٥	٤٥	۲/۲
٦-۱۰	٤٥	٤٥	۱/٦
۱۱-۱۵	٤٥	٤٥	۱/٤

Beams in Story no	ارتفاع d (cm)	عرض بال b_f (cm)	ضخامت بال t_f (cm)	ضخامت بال t_w (cm)
۱-۵	٤٥	۲۲	۱/۵	۱
٦-۱۰	٤٥	۲۰	۱/۵	۱
۱۱-۱٤	٤٥	۱۸	۱/٤	۱
۱۵	۳۰	۱٦	۱۲	۰/۸

جدول ۲ مشخصات مقاطع ستون‌ها در طبقات مختلف سازه ۳۰ طبقه

Columns in Story no	H (cm)	B (cm)	t (cm)
۱-۵	۵۵	۵۵	۳
٦-۱۰	۵۵	۵۵	۲/۲
۱۱-۱۵	۵۵	۵۵	۱/۸
۱٦-۲۰	۵۰	۵۰	۱/٦
۲۱-۳۰	٤٥	٤٥	۱/٤

Beams in Story no	d (cm)	b_f(cm)	t_f (cm)	t_w (cm)
۱-۲۰	٤٥	۲۱	۱/۸	۱
۲۱-۲۵	٤٥	۲۱	۱/۵	۱
۲٦-۲۹	٤٥	۱۸	۱/۵	۱
۳۰	۳۰	۱۷	۱/۲	۰/۸

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳ حداکثر تغییرمکان غیرخطی سازه ۱۵ طبقه برای سیستم‌های مختلف اندرکنشی ـ پروفیل خاک شماره ۱ (برحسب cm)

زمین لرزه لوماپریتا

Story no.	sssi15	sssi15L=2.5	sssi15L=5	sssi30+15L=2.5	sssi30+15L=5
۱	۲/٤	۲	۲/۲	۳/۱	۳
۲	٥/٥	٤/۷	٥	۷	٦/۸
۳	۸/۸	۷/٥	۸	۱۱/۱	۱۰/۷
٤	۱۱/۹	۱۰/۱	۱۰/۸	۱٥/۱	۱٤/٥
٥	۱٤/۸	۱۲/٦	۱۳/٥	۱۸/۸	۱۸/۱
٦	۱۷/٥	۱٤/۹	۱٦	۲۲/٤	۲۱/٥
۷	۱۹/۸	۱٦/۹	۱۸/۱	۲٥/٦	۲٤/۷
۸	۲۱/۹	۱۸/٥	۲۰	۲۸/٦	۲۷/٦
۹	۲۳/٦	۲۰	۲۱/٥	۳۱/۳	۳۰/۲
۱۰	۲٥/۲	۲۱/۸	۲۳	۳۳/۹	۳۲/۷
۱۱	۲۸/۲	۲۳/٦	۲٥/۸	۳۷/۱	۳٦
۱۲	۳۱/۳	۲٦	۲۸/۷	٤۰/۷	۳۹/٦
۱۳	۳٤/۲	۲۸/٤	۳۱/۳	٤٤/۱	٤۳
۱٤	۳٦/۸	۳۰/٥	۳۳/٦	٤۷/٤	٤٦/۱
۱٥	۳۹/۲	۳۲/٥	۳٥/۸	٥۰/٤	٤۹/۱

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤ حداکثر دریفت غیرخطی سازه ۱۵ طبقه برای سیستم‌های مختلف اندرکنشی ـ پروفیل خاک شماره ۱ (برحسب cm)
زمین‌لرزه لوماپریتا

Story no.	sssi15	sssi15L=2.5	sssi15L=5	sssi30+15L=2.5	sssi30+15L=5
۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰٦٦	۰/۰۰۷	۰/۰۱	۰/۰۱
۲	۰/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳
۳	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱٤	۰/۰۱۳
٤	۰/۰۱	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳
۵	۰/۰۰۹٦	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۹	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲
٦	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۵	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱
۷	۰/۰۰۹٤	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸٦	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲
۸	۰/۰۱	۰/۰۰۸٤	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲
۹	۰/۰۱	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۹٤	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳
۱۰	۰/۰۱	۰/۰۰۸۸	۰/۰۰۹٦	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳
۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹۱	۰/۰۰۹۷	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳
۱۲	۰/۰۱	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۹٤	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲
۱۳	۰/۰۰۹٦	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱
۱٤	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۷۹	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱
۱۵	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰٦٦	۰/۰۰۷۳	۰/۰۱	۰/۰۱

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵ حداکثرتغییرمکان غیرخطی سازه ۳۰ طبقه برای سیستم‌های مختلف اندرکنشی ـ پروفیل خاک شماره ۲

(برحسب cm)زمین‌لرزه لوماپریتا

Story no.	sssi15	sssi15L=2.5	sssi15L=5	sssi30+15L=2.5	sssi30+15L=5
۱	۱/۸	۱/۸	۱/۷	۱/۷	۱/۷
۲	٤	٤/۱	۳/۸	۳/۸	۳/۸
۳	۳/٦	٦/٥	٦/۱	٦	٦/۱
٤	۸/۸	۹	۸/۳	۸/٤	۸/٦
٥	۱۱/۳	۱۱/٥	۱۰/۷	۱۰/۸	۱۱
٦	۱۳/۹	۱۳/۹	۱۳/۱	۱۳/۲	۱۳/٥
۷	۱٦/٤	۱٦/۳	۱٥/٥	۱٥/٦	۱٥/۹
۸	۱۸/۷	۱۸/٥	۱۷/۸	۱۷/۹	۱۸/۳
۹	۲۱	۲۰/۷	۲۰	۲۰/۱	۲۰/٥
۱۰	۲۳/۲	۲۲/۹	۲۲	۲۲/۱	۲۲/٦
۱۱	۲٥/۱	۲٤/۹	۲۳/۹	۲٤/۱	۲٤/٥
۱۲	۲۷	۲۷	۲٥/۷	۲٥/۸	۲٦/۲
۱۳	۲۹/۲	۲۸/۹	۲۷/٤	۲۷/۳	۲۷/۷
۱٤	۳۱/۳	۳۰/۹	۲۹/٥	۲۸/۷	۲۹/۱
۱٥	۳۳/۳	۳۲/۷	۳۱/٤	۳۰	۳۰/٤
۱٦	۳٥/۲	۳٤/٦	۳۳/٤	۳۱/۲	۳۱/٦
۱۷	۳۷	۳٦/٤	۳٥/۲	۳۳/۲	۳۳/۲
۱۸	۳۸/۷	۳۸/۱	۳۷	۳٤/۳	۳٤/٦
۱۹	٤۰/۲	۳۹/۷۳	۳۸/٦	۳/٦	۳٥/۹
۲۰	٤۱/٦	٤۱/۳	٤۰/۲	۳٦/۸	۳۷/۱
۲۱	٤۲/۹	٤۲/۷	٤۱/۷	۳۷/۹	۳۸/۲
۲۲	٤٤/۱	٤٤/٦	٤۳/۲	۳۹/۱	۳۹/٤
۲۳	٤٥/٦	٤٦/۷	٤٥	٤۱/۱	٤۱/٦
۲٤	٤۸	٤۸/۷	٤۷/۱	٤۳/٤	٤۳/۹
۲٥	٥۰/٦	٥۰/۷	٤۹/٥	٤٥/۹	٤٦/٤
۲٦	٥۳/٤	٥۲/٥	٥۱/۹	٤۸/٤	٤۸/۹
۲۷	٥٦/۱	٥٤/۳	٥٤/۳	٥۰/۹	٥۱/٤
۲۸	٥۸/۸	٥٦/٥٤	٥٦/٦	٥۳/۲	٥۳/۷
۲۹	٦۱/۱	٥۸/٦	٥۸/۷	٥٥/٤	٥٥/۹
۳۰	٦۳/٤	٦۰/٥	٦۰/۸	٥۷/٥	٥۸

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٦ حداکثردریفت غیرخطی سازه ٣٠ طبقه برای سیستم‌های مختلف اندرکنش ـ پروفیل خاک شماره ٢ (برحسب cm)

زمین لرزه لوماپریتا

Story no.	sssi15	sssi15L=2.5	sssi15L=5	sssi30+15L=2.5	sssi30+15L=5
١	٠/٠٠٦	٠/٠٠٦	٠/٠٠٦	٠/٠٠٦	٠/٠٠٦
٢	٠/٠٠٧	٠/٠٠٧٦	٠/٠٠٧	٠/٠٠٧	٠/٠٠٧
٣	٠/٠٠٨	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٥	٠/٠٠٧٥	٠/٠٠٧٧
٤	٠/٠٠٨	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٨	٠/٠٠٧٨	٠/٠٠٨
٥	٠/٠٠٨٤	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٨	٠/٠٠٨	٠/٠٠٨٢
٦	٠/٠٠٨٥	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٩	٠/٠٠٨١	٠/٠٠٨٣
٧	٠/٠٠٨٣	٠/٠٠٨	٠/٠٠٨	٠/٠٠٨	٠/٠٠٨١
٨	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٨	٠/٠٠٧٩	٠/٠٠٧	٠/٠٠٧٨
٩	٠/٠٠٨	٠١/٠٠٧٨	٠/٠٠٧٩	٠/٠٠٧٣	٠/٠٠٧٤
١٠	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٨	٠/٠٠٧٤	٠/٠٠٧	٠/٠٠٧
١١	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٨	٠/٠٠٧٥	٠/٠٠٧	٠/٠٠٧
١٢	٠/٠٠٧٨	٠/٠٠٧	٠/٠٠٧٥	٠/٠٠٧	٠/٠٠٧
١٣	٠/٠٠٧٦	٠/٠٠٧٨	٠/٠٠٧٥	٠/٠٠٦٧	٠/٠٠٦٧
١٤	٠/٠٠٧٥	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٣	٠/٠٠٦٩	٠/٠٠٧
١٥	٠/٠٠٧٦	٠/٠٠٨٣	٠/٠٠٧٣	٠/٠٠٧١	٠/٠٠٧٢
١٦	٠/٠٠٨٢	٠/٠٠٨٧	٠/٠٠٧٤	٠/٠٠٧٤	٠/٠٠٧٤
١٧	٠/٠٠٨٤	٠/٠٠٨٧	٠/٠٠٧٨	٠/٠٠٧٥	٠/٠٠٧٦
١٨	٠/٠٠٨٥	٠/٠٠٨٨	٠/٠٠٧٩	٠/٠٠٧٦	٠/٠٠٧٧
١٩	٠/٠٠٨٥	٠/٠٠٨٧	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٦	٠/٠٠٧٧
٢٠	٠/٠٠٨٥	٠/٠٠٨٦	٠/٠٠٨	٠/٠٠٧٦	٠/٠٠٧٧
٢١	٠/٠٠٨٩	٠/٠٠٩	٠/٠٠٨	٠/٠٠٨	٠/٠٠٨١
٢٢	٠/٠٠٩١	٠/٠٠٩٢	٠/٠٠٨٤	٠/٠٠٨٢	٠/٠٠٨٣
٢٣	٠/٠٠٩٤	٠/٠٠٩٤	٠/٠٠٩	٠/٠٠٨٥	٠/٠٠٨٦
٢٤	٠/٠٠٩٨	٠/٠٠٩٨	٠/٠٠٩٢	٠/٠٠٨٨	٠/٠٠٩
٢٥	٠/٠١	٠/٠١	٠/٠٠٩٦	٠/٠٠٩١	٠/٠٠٩٢
٢٦	٠/٠١	٠/٠١	٠/٠٠٩٨	٠/٠٠٩٤	٠/٠٠٩٥
٢٧	٠/٠١	٠/٠١١	٠/٠٠٩٨	٠/٠٠٩٤	٠/٠٠٩٥
٢٨	٠/٠٠٩٧	٠/٠١	٠/٠٠٩٣	٠/٠٨٨٨	٠/٠٠٩
٢٩	٠/٠٠٨٩	٠/٠٠٩	٠/٠٠٨٥	٠/٠٠٨١	٠/٠٠٨٢
٣٠	٠/٠٠٨٢	٠/٠٠٨٢	٠/٠٠٧٩	٠/٠٠٧٥	٠٠٧٦٠

www.SID.ir

Archive of SID

مراجع

۱. رضائی تبریزی، علی و ناطقی الهی، فریبرز و بهنام‌فر، فرهاد، " مطالعه اثر اندرکنش سازه ـ خاک ـ سازه بر پاسخ غیرخطی سازه‌های بلند" ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، شهریور (۱۳۸۱).

۲. حسین‌زاده، نقدعلی و ناطقی الهی، فریبرز، " مطالعه تجربی اثرات اندرکنش خاک سازه در پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های منفرد و مجاور هم روی میز لرزان "، پایان‌نامه دکترای مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، آبان ماه (۱۳۸۱).

3. Wolf , J. P., "*Dynamic Soil Structure Interaction* ", Prentice- Hall , pp. 369–370, (1985).

٤. میرحسینی، سیدمجدالدین و عارف‌پور، بابک، " مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای " پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ٤٣٨-٢٦٥، بهار (۱۳۷۸).

5. Kazuo Knagai, " Subgrade model for transient response of multiple embedded bodies ", *Earthquake Engng , Struct dyn.* Vol. 23, pp. 1097–1114, (1994).

6. Federal Emergency Management Agency "NEHRP Guide Lines for the Seismic Rehabilitation of Buildings ", FEMA 273.

www.SID.ir