

# مطالعه آزمایشگاهی (میز لرزان) اثرات اندرکنش خاک-سازه در پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای مجاور هم

نقدعلی حسین‌زاده\*، فریبرز ناطقی‌الهی\*\* و فرهاد بهنام‌فر\*

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت مقاله: ۸۱/۲/۲۹ - دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۴/۷)

**چکیده** - در این مقاله اثرات اندرکنش دینامیکی خاک-سازه در پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای مجاور هم به کمک آزمایشهای دینامیکی مدل‌های مقیاس شده روی میز لرزان مورد بررسی قرار گرفته است. چهار مدل سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه و دو مدل خاک نسبتاً نرم برای انجام این آزمایشها طراحی و ساخته شده‌اند. پی مدل‌های انتخابی یکپارچه، صلب و به شکل مربع در نظر گرفته شده است. ظرف مخصوص مدل خاک طوری طراحی و ساخته شده است که علاوه بر نگهداری خاک به سهولت روی میز لرزان قابل نصب است. همچنین، این ظرف قابلیت عملکرد مطلوب خاک را به عنوان یک محیط ویسکوالاستیک نیمه بینهایت تأمین می‌کند.

نتایج تجربی حاصل از آزمایشهای میز لرزان توافق خوبی با نتایج مدلسازیهای عددی به روش اجزای محدود دارند. نتایج تجربی و تحلیلی نشان می‌دهند که اثرات اندرکنش سینماتیکی در مقایسه با اندرکنش اینرسی چندان اهمیتی ندارد. در ساختمانهای کم‌تراز ۵ طبقه، حرکات افقی و گهواره‌ای پی‌ها عوامل اصلی اندرکنش خاک-سازه شناخته می‌شود، لیکن در سازه‌های بلندتر، حرکات گهواره‌ای نقش کلیدی ایفا می‌کند. مهمترین اثرات اندرکنش خاک-سازه به صورت افزایش پی‌ریود مد اول و نسبت میرایی سازه مشاهده می‌شود. اثر سازه‌های مجاور هم در فرکانس‌های بالاتر از فرکانسهای پایین اهمیت دارد. به علاوه، این اثرات در ساختمانهای مشابه و نزدیک به هم بیشتر دیده می‌شود.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک-سازه، ساختمانهای مجاور هم، اندرکنش سینماتیکی، اندرکنش اینرسی.

## Shake Table Study of Soil-Structure Interaction Effects on Seismic Response of Adjacent Buildings

N.A. Hosseinzadeh, F. Nateghi-Alahi and F. Behnamfar  
International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

**Abstract:** : In this paper the effect of soil-structure interaction in seismic response of adjacent buildings is studied using shake table scale model tests. Four structural models of 5, 10, 15 and 20 stories high and two relatively soft soil models were

\*\* - استاد

\* - استادیار

designed for the laboratory tests. The foundation system for structural models was considered as square rigid mats. A special container was designed and constructed to support the soil model with special emphasis on easy connection to the shake table. This container also provided sufficient environment to allow for the elastic half space of the soil.

There was a good agreement between shaking table test results and finite element analyses. From the experimental and analytical results, it can be concluded that the effects of kinematic interaction is negligible in comparison with inertial interaction. In buildings lower than 5 stories high, the horizontal and rocking mode of foundation were known to be the main causes of soil-structure interaction. but in taller buildings, the rocking mode was the dominant one. The major effects of soil-structure interaction were found to be increasing first mode period and damping ratio of the structure. Cross-interaction of adjacent buildings was seen to be more important in high frequency ranges in comparison to low frequency ranges. In addition, these effects were considerable in similar and near adjacent buildings.

**Keywords:** Soil-Structure Interaction, Adjacent Buildings, Kinematic Interaction, inertial Interaction.

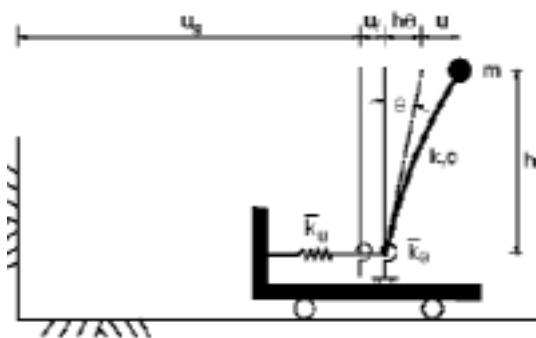
## ۱- مقدمه

۱۹۹۷ منعکس شده است [۳ و ۴]. بخش عمده این پیشرفت‌ها به اطلاعات حرکات قوی زلزله‌ها مربوط می‌شود. به عنوان مثال پیشرفت‌های اخیر در شناخت اثرات ساختگاه از بزرگنمایی قابل توجه حرکات زمین در خاکهای نرم و چسبیده تحت زلزله‌هایی نظیر زلزله ۱۹۸۵ مکزیکوسی و زلزله ۱۹۸۹ لوماپریتا حاصل شده است.

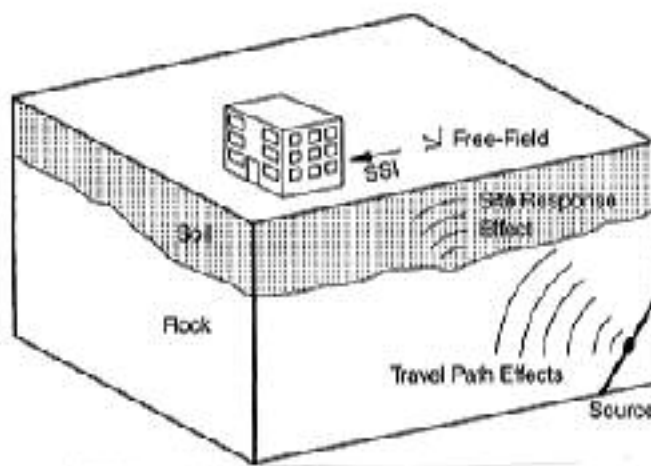
در طول سه دهه اخیر تحقیقات گسترده‌ای برای تعیین مشخصات مهندسی اثرات اندرکنش خاک-سازه به عمل آمده است [۵-۱۱]. وضوابط ساده شده اندرکنش خاک-سازه در آیین‌نامه‌های NEHRP, 1997 و ATC, 1978 در نظر گرفته شده‌اند [۳ و ۵]. اما این ضوابط هنوز در مقابل اطلاعات تجربی موجود و اسنچی نشده‌اند آن‌گونه که در مورد اثرات ساختگاه انجام گرفته است. با وجود تحقیقات گسترده در مورد اندرکنش خاک-سازه منفرد هنوز دانش موجود در مورد اثر متقابل سازه‌های مجاور هم محدود است. بخش عمده تحقیقات در این زمینه به مدلسازی تحلیلی و عددی نظیر روش‌های اجزای محدود و اجزای مرزی اختصاص یافته است. پارامترهای متعددی در این مسئله نقش دارند از جمله: مشخصات خاک-پی-سازه، فاصله ساختمانها، ارتفاع ساختمانها، و غیره. اما هنوز نقش و درجه اهمیت این پارامترها برای کاربرد عملی روشن نشده است [۱۲-۱۶]. به هر حال با در نظر گرفتن اثرات ساختگاه و اندرکنش خاک-سازه می‌توان مطالعات آسیب پذیری لرزه‌ای و تهیه طیفهای پاسخ غیرخطی سازه‌ها را بیش از پیش به واقعیت نزدیک کرد [۱۷-۱۹].

ارتعاشات لرزه‌ای مؤثر بر سازه‌ها تابعی از پارامترهای متعدد نظیر: اثرات سرچشمه زلزله، اثرات مسیر عبور امواج، اثرات ساختگاه و اثرات اندرکنش خاک-سازه است که در شکل (۱) نشان داده شده است. اثرات سرچشمه زلزله بیانگر بزرگی زلزله، مکانیزم گسلش و موقعیت آن نسبت به ساختگاه است. اثرات مسیر عبور امواج بر اساس کاهندگی امواج لرزه‌ای منتشر شده در طول مسیر بستر سنجی از سرچشمه به طرف ساختگاه تعیین می‌شود. اثرات ساختگاه نیز بزرگنمایی یا کاهندگی دامنه امواج لرزه‌ای منتشره از بستر سنگی به طرف سطح آزاد را بیان می‌کند. نتیجه نهایی سه پارامتر اول به عنوان حرکت لرزه‌ای سطح آزاد شناخته می‌شود که بیانگر پاسخ زمین در غیاب هرگونه اثرات ناشی از ارتعاش سازه‌هاست. به این ترتیب، اثرات اندرکنش خاک-سازه از انعطاف پذیری خاک زیر پی و ارتعاشات نسبی بین پی و سطح آزاد ناشی می‌شود. با منظور کردن این اثرات می‌توان نیروهای اینرسی و تغییر مکانهای واقعی یک سیستم سازه-پی-خاک را تحت اثر حرکات لرزه‌ای سطح آزاد تعیین کرد. مسئله اندرکنش خاک-سازه منفرد در حالت دو سازه مجاور هم به مسئله پیچیده اندرکنش سازه-خاک-سازه تبدیل می‌شود. در حالت کلی، برای مطالعه خطر زلزله و آسیب پذیری لرزه‌ای سازه‌ها مسئله اندرکنش شهر-ساختگاه<sup>۲</sup> مطرح است [۲ و ۱].

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی برای شناخت حرکات لرزه‌ای سطح آزاد به عمل آمده است. نتایج این تحقیقات در بسیاری از آیین‌نامه‌های زلزله نظیر NEHRP, 1997 و UBC,



شکل ۲- مدل ساده شده اندرکنش خاک-سازه [۱]



شکل ۱- مشخصات مهندسی اندرکنش خاک-سازه [۱]

• اندرکنش اینرسی: نیروهای اینرسی سازه تولید نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در تراز پایه می‌کنند که سبب تغییر مکان پی نسبت به سطح آزاد می‌شود. توابع امپدانس پی برحسب فرکانس بیانگر انعطاف‌پذیری و میرایی سیستم پی-خاک است.

• اندرکنش سینماتیکی: وجود پی سخت روی خاک باعث تغییر حرکات پی نسبت به سطح آزاد می‌شود. سه عامل می‌تواند سبب این تغییر حرکات باشد. عامل اول قیود سینماتیکی مربوط به حرکت جسم صلب پی است که در آن تمام نقاط سطح تماس پی-خاک حرکات یکسانی را تجربه می‌کنند. عامل دوم به مدفون بودن پی مربوط می‌شود طوری که با افزایش عمق مدفون بودن، حرکات لرزه‌ای زمین کاهش پیدا می‌کند. عامل سوم نیز به تفرق امواج لرزه‌ای از گوشه‌ها و ناهمواریهای پی مربوط می‌شود. اثرات سینماتیکی با توابع انتقال وابسته به فرکانس بیان می‌شود که حرکات سطح آزاد را به حرکات پی مربوط می‌کند.

توابع امپدانس وانتقال اغلب برحسب توابع مختلط بیان می‌شوند. قسمت موهومی توابع امپدانس بیانگر میرایی هیستریزس خاک به علاوه میرایی تشعشعی امواج لرزه‌ای منتشره از پی به داخل خاک نیمه بی‌نهایت است. این توابع به مشخصات سختی و میرایی خاک بستگی دارند. در صورتی که خاک صلب فرض شود، دامنه تابع انتقال حرکت افقی پی برابر

در این مقاله سعی شده است با استفاده از نتایج آزمایشهای دینامیکی مدل‌های مقیاس شده روی میز لرزان مهمترین جنبه‌های عملکرد سازه‌های مجاور هم مورد بررسی قرار بگیرد. ابتدا، روشهای مستقیم و زیر سازه برای تحلیل مسائل اندرکنش خاک-سازه و قابلیت‌های هر روش با استفاده از ادبیات مهندسی موجود به طور اجمال مطرح شده‌اند. سپس ضمن معرفی مشخصات هندسی و مکانیکی مدل‌های آزمایشگاهی و برنامه آزمایش آنها روی میز لرزان، نتایج آزمایشهای دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در خاتمه، ضمن مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل‌سازیهای عددی، مهمترین نتایج و یافته‌های این تحقیق ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که برای مطالعات تحلیلی از برنامه رایانه‌ای FLUSH استفاده شده است. برای این منظور تغییراتی در متن اصلی این برنامه داده شده است تا روی رایانه‌های شخصی و با سیستم واحد متریک قابل اجرا باشد.

تا آنجایی که نویسندگان مقاله اطلاع دارند، این کار پژوهشی نخستین مورد از انجام آزمایشات اندرکنش خاک-سازه در کشور است.

## ۲- تحلیل اندرکنش خاک-سازه به روش زیرسازه

اندرکنش دینامیکی از دو مکانیزم اندرکنش بین سازه، پی و خاک به شرح زیر ناشی می‌شود:

در معادلات فوق  $G$  مدول برشی دینامیکی خاک است. حال اگر سیستم تک درجه شکل (۲) به صورت یک سیستم تک درجه معادل با پایه گیردار دارای پیوند مؤثر  $\tilde{T}$  و میرایی مؤثر  $\tilde{\xi}$  در نظر گرفته شود داریم [۳ و ۵]:

$$\frac{\tilde{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_u} + \frac{kh^2}{k_\theta}} \quad (6)$$

$$\tilde{\xi} = \tilde{\xi}_0 + \frac{\xi}{(\tilde{T}/T)^3} \quad (7)$$

در معادلات فوق  $T$  پیوند سازه با پایه گیردار  $(T = 2\pi\sqrt{k/m})$ ،  $\tilde{T}$  پیوند مؤثر سازه با پایه انعطاف پذیر،  $\xi$  نسبت میرایی سازه با پایه گیردار،  $\tilde{\xi}_0$  نسبت میرایی پی (میرایی چرخه ای خاک و میرایی تشعشعی پی) و  $\tilde{\xi}$  میرایی مؤثر سازه با پایه انعطاف پذیرند. این معادلات مبنای ضوابط آیین نامه های ATC, 1978 و NEHRP, 1997 برای محاسبه نیروها و تغییرشکل های محاسباتی ساختمانها را تشکیل می دهند.

روابط بین مشخصات سازه های با پایه صلب و انعطاف پذیر به پارامترهایی از قبیل: نسبت  $h/r_\theta$ ، نسبت پواسون خاک ( $\nu$ )، نسبت میرایی چرخه ای خاک ( $\beta$ ) و پارامترهای بدون بعد  $\sigma$  و  $\gamma$  طبق معادلات زیر بستگی دارد [۱]:

$$\sigma = V_s T/h \quad (8)$$

$$\gamma = m/\rho\pi r_u^2 h \quad (9)$$

در معادلات فوق  $\sigma$  و  $\gamma$  به ترتیب بیانگر نسبت سختی و جرم سازه به خاک اند. در ساختمانهای معمولی  $\sigma > 2$  و  $0.10 \sim 0.2$   $\gamma$  هستند. پارامترهای  $\tilde{T}/T$  و  $\tilde{\xi}_0$  به  $\sigma$  خیلی حساس اند در صورتی که حساسیت این پارامترها به  $\gamma$  به ترتیب متوسط و کم است. در حالت پی دایره ای صلب متکی بر سطح نیم فضای ویسکوالاستیک، نتایج تحلیلی  $\tilde{T}/T$  و  $\tilde{\xi}_0$  برحسب  $1/\sigma$  مطابق شکل (۳) است. این نتایج نشان می دهند که  $1/\sigma$  یک پارامتر تعیین کننده برای تغییر پیوند ارتعاشی سازه محسوب می شود. به علاوه به ازای مقدار ثابت  $1/\sigma$ ، مقدار  $\tilde{T}/T$  با افزایش  $h/r$  افزایش می یابد. پارامتر  $\tilde{\xi}$  می تواند نسبت به  $\xi$  افزایش یا کاهش یابد که بستگی به پارامترهای  $\tilde{T}/T$  و  $\tilde{\xi}_0$

واحد و فاز آن برابر صفر خواهد بود (حرکات پی و سطح آزاد یکسان اند). در این حالت قسمت حقیقی تابع امپدانس بی نهایت و قسمت موهومی آن برابر صفر بوده و اثرات اندرکنش اینرسی نیز صرف نظری می شود [۱۱].

اگر اثرات اندرکنش سینماتیکی صرف نظر شود، سیستم ساده شده برای تحلیل اثرات اندرکنش اینرسی مطابق شکل (۲) خواهد بود. این سیستم شامل یک سازه تک درجه به ارتفاع  $h$  جرم  $m$ ، سختی  $k$  و میرایی  $c$  است که روی پایه نرم با سختی افقی  $k_u$  و سختی پیچشی  $k_\theta$  قرار گرفته است. توابع امپدانس پی های صلب متکی بر نیم فضای ویسکوالاستیک در حالت کلی به شکل زیر است [۱]:

$$\bar{k}_j = k_j(a_0, \nu) + i\omega c_j(a_0, \nu) \quad (1)$$

در معادله فوق  $j$  بیانگر مد حرکت افقی ( $u_f$ ) یا چرخشی ( $\theta$ ) پی،  $\omega$  فرکانس زاویه ای،  $a_0$  فرکانس بدون بعد ( $a_0 = \omega r/V_s$ )، شعاع پی دایره ای،  $V_s$  سرعت موج برشی و  $\nu$  نسبت پواسون خاک اند. در پی های غیر دایره ای شعاع دایره معادل برای حرکات افقی و چرخشی از سازگاری سطح مقطع  $A_f$  و ممان اینرسی  $I_f$  پی به دست می آید ( $r_\theta = \sqrt{4I_f/\pi}$ ،  $r_u = \sqrt{A_f/\pi}$ ).

مقادیر سختی و میرایی واقعی فنرهای افقی و پیچشی پی صلب متکی به نیم فضا از معادلات زیر محاسبه می شوند [۱]:

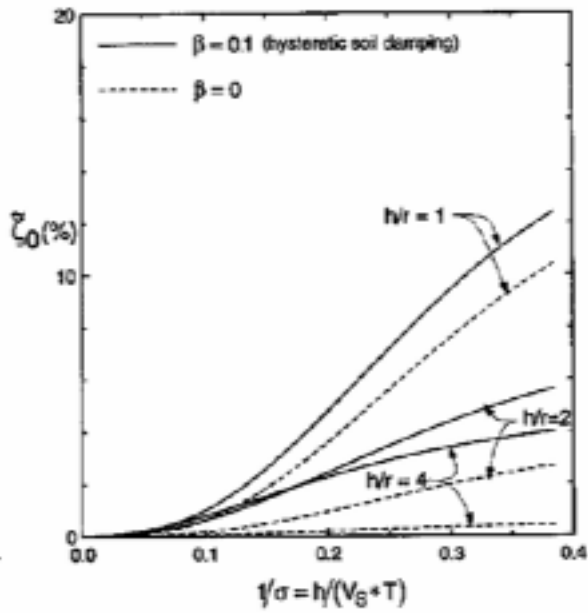
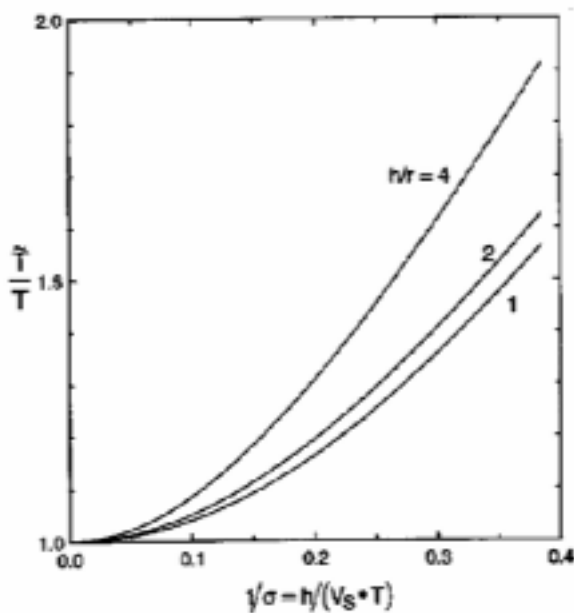
$$k_u = \alpha_u K_u, \quad c_u = \beta_u \frac{K_u r_u}{V_s} \quad (2)$$

$$k_\theta = \alpha_\theta K_\theta, \quad c_\theta = \beta_\theta \frac{K_\theta r_\theta}{V_s} \quad (3)$$

در معادلات فوق  $\alpha_u, \beta_u, \alpha_\theta, \beta_\theta$  ضرایب بدون بعد سختی و میرایی اند که وابسته به فرکانس هستند.  $K_u$  و  $K_\theta$  نیز بیانگر سختی استاتیکی پی هستند که از معادلات زیر به دست می آیند [۱]:

$$K_u = \frac{8}{2-\nu} Gr_u \quad (4)$$

$$K_\theta = \frac{8}{3(1-\nu)} Gr_\theta^3 \quad (5)$$



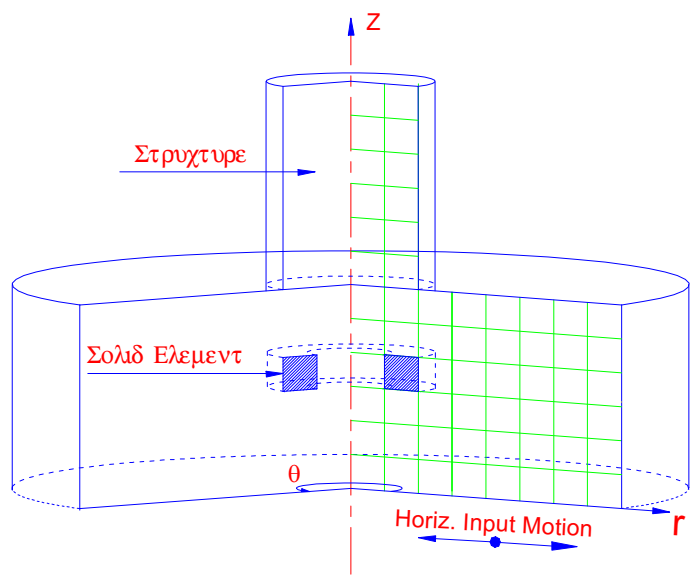
شکل ۳- تغییرات پریرود و میرایی سازه تک درجه با پی دایره ای صلب روی نیم فضای ویسکو الاستیک  
(  $\xi_0 = 5\%$ ,  $\gamma = 0.15$ ,  $\nu = 0.45$  ) [۱]

اگرچه مدل‌های متعدد اجزای محدود دو یا سه بعدی در محدوده خطی و غیرخطی در دسترس اند، ولی استفاده از آنها در حل مسائل اندرکنش خاک-سازه اغلب وقت گیر بوده و در ضمن فاقد رفتار غیرخطی مناسب برای خاک و دانش کافی در این زمینه‌اند. در این میان برنامه رایانه‌ای FLUSH از قابلیت‌های خاصی برای تحلیل مسائل خاک-سازه برخوردار است [۱۲]. مدل اجزای محدود در این برنامه دو بعدی بوده و قابلیت تحلیل تنش مسطح و کرنش مسطح وجود دارد. برای در نظر گرفتن اثرات سه بعدی خاک می‌توان از مدل تقارن محوری مطابق شکل (۴) استفاده کرد. اما در بعضی از موارد مانند سازه‌های مجاور هم شرایط تقارن محوری برقرار نیست. به علاوه، برای تأمین میرایی تشعشعی باید مرزهای مدل به حد کافی از سازه دور باشد. در چنین مواردی می‌توان از مرزهای ویسکوز<sup>۳</sup> مطابق شکل (۵) استفاده کرد [۱۲]. به علاوه برای محدود کردن ابعاد شبکه گسترده اجزای محدود، مرزهای انتقالی<sup>۴</sup> مطابق شکل (۶-الف) قابل استفاده است [۱۲]. به این ترتیب با کاهش قابل توجه شبکه اجزای محدود تحلیل مدل‌های

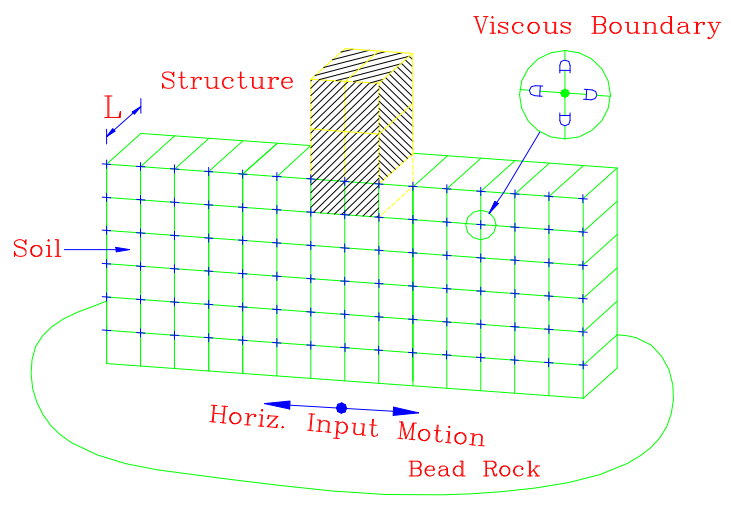
دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود  $\zeta_0$  با افزایش  $1/\sigma$  افزایش ولی با افزایش  $h/r$  کاهش می‌یابد.

### ۳- تحلیل اندرکنش خاک - سازه به روش مستقیم

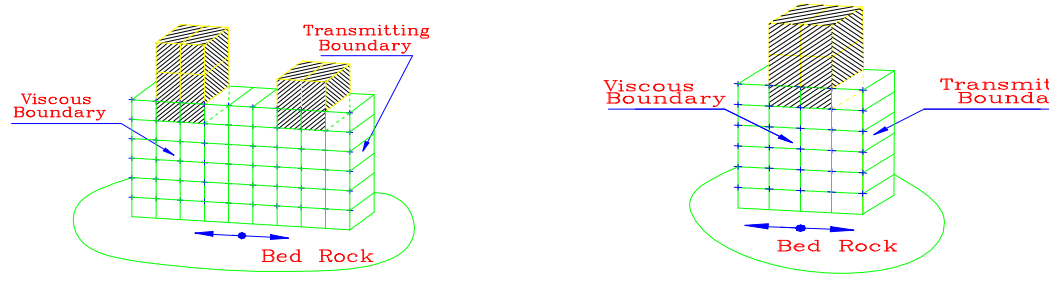
روشهای تحلیلی مبتنی بر محاسبه توابع امپدانس عموماً با یک مدل ساده در نظر گرفته می‌شود که برای پی‌های منفرد دایره‌ای صلب متکی بر نیم‌فضای ویسکو الاستیک قابل کاربرد است. در این‌گونه روشها اثر عوامل مختلف از قبیل: خاکهای لایه‌ای روی بستر سنگی، مدفون بودن پی‌ها، پی‌های با شکل غیردایره‌ای، پی‌های انعطاف‌پذیر، پی‌های شمعی و غیره عموماً به صورت تقریبی در نظر گرفته می‌شوند. برای حل مسائل پیچیده مربوط به هندسه پی، رفتار غیرخطی مصالح، اثر سازه‌های مجاور هم و غیره می‌توان از روشهای حل عددی مبتنی بر اجزای محدود استفاده کرد که به‌عنوان روش مستقیم برای تحلیل کامل اندرکنش خاک-سازه شناخته می‌شود. اشکال عمده‌ای که معمولاً به این روشها گرفته می‌شود پر هزینه بودن این‌گونه محاسبات عددی در مقایسه با روشهای تحلیلی است.



شکل ۴- مدل اجزای محدود خاک-سازه با تقارن محوری [۱۲]



شکل ۵- مدل اجزای محدود سه بعدی ساده شده خاک-سازه با مرزهای ویسکوز [۱۲]



شکل ۶- مدل اجزای محدود سه بعدی ساده شده خاک-سازه با (الف) مرزهای انتقالی و (ب) سازه های مجاور هم [۱۲]

لرزان، ظرفیت جک‌های هیدرولیکی و غیره ضریب مقیاس مدلسازی برابر  $\lambda = 1/100$  انتخاب شده است. برای طرح مدل‌های مقیاس شده از تئوری تشابه هندسی و دینامیکی استفاده شده است. با توجه به اینکه روابط مقیاس برای شرایط  $1g$  به دست آمده‌اند (g شتاب جاذبه زمین است)، در نتیجه شتابهای مدل و نمونه یکسان‌اند [۱۳].

برای تهیه مدل‌های سازه‌ای از سیستم قاب خمشی با اتصالات پیچ و مهره استفاده شده است. صفحات فولادی در تراز طبقات، سیستم کف صلب و جرم طبقات را تشکیل داده‌اند. پی‌ها به صورت یکپارچه، صلب و به شکل مربع‌اند. ارتفاع هر طبقه برابر 3cm، وزن هر طبقه برابر 0.4 kg و ابعاد پلان پی 20 cm × 20 cm هستند. مشخصات مدل‌های سازه‌ای در شکل (۸) و نمایی از مدل‌های ساخته شده نیز در شکل (۹) ارائه شده است. مهاربندهای عرضی برای جلوگیری از پیچش و تغییرشکل‌های برون صفحه‌ای (عمود بر امتداد ارتعاش) در نظر گرفته شده‌اند. این مهاربندها در جهت طولی مدل‌ها (در امتداد ارتعاش) تاثیری ندارند.

هدف از طرح مدل‌های خاک این است که رفتار زمین‌های نوع II و III مطابق طبقه بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران و برایش دوم شبیه سازی شود [۲۰]. بنابراین سرعت موج برشی مدل‌های مقیاس شده به ترتیب در حدود 30 m/sec و 45 m/sec مورد نظر است. با آزمایش نمونه‌های مختلف در آزمایشگاه مکانیک خاک پژوهشگاه، این نتیجه‌گیری حاصل شد که خاکهای ریزدانه با رطوبت بالا علاوه بر اینکه سرعت موج برشی کمتری دارند از پایداری کافی در مقابل ارتعاشات متعدد نیز برخوردارند. بنابراین خاک رس لای دار مطابق استاندارد ASTM با رطوبت ۲۸٪ برای مدل خاک نوع III و ۲۴٪ برای مدل خاک نوع II انتخاب شده است.

علاوه بر طرح مدل خاک، ظرف مخصوصی برای نگهداری و نصب آن روی میز لرزان مورد نیاز است. عملکرد ظرف باید به گونه‌ای باشد که شرایط رفتار واقعی خاک را به عنوان یک محیط ویسکوالاستیک نیمه بی‌نهایت تامین کند. بنابراین یک

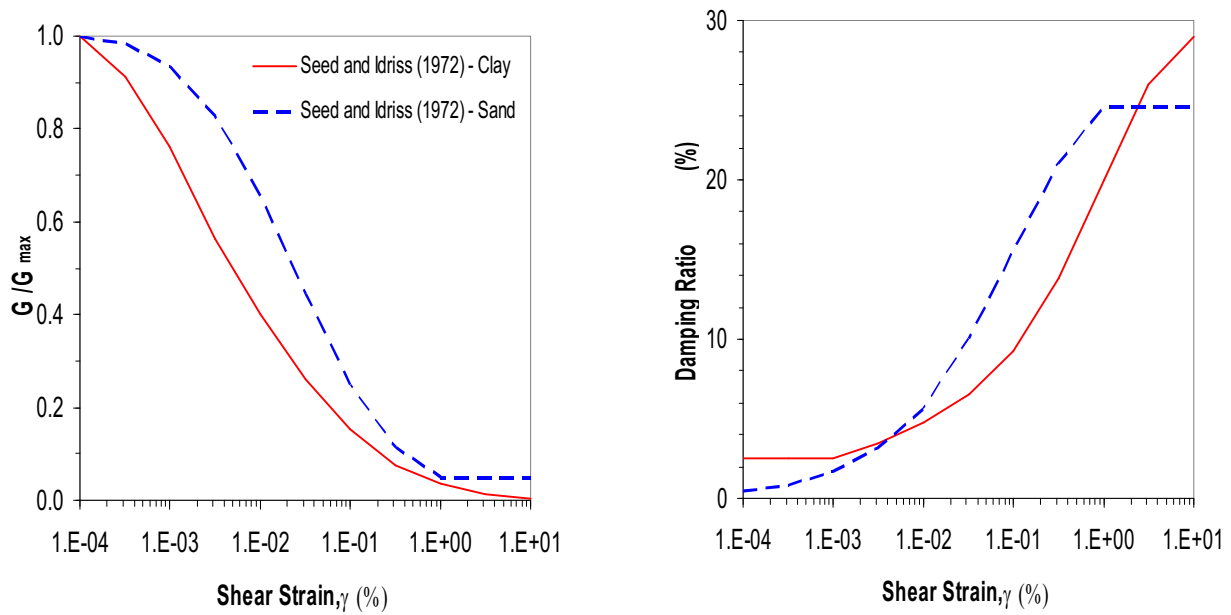
پیچیده نظیر سازه‌های مجاور هم نیز مطابق شکل (۶-ب) امکانپذیر می‌شود. مطالعات عددی نشان می‌دهد که نتایج روش مرزهای ویسکوز توافق خوبی با مدل تقارن محوری دارد. همچنین، نتایج مدل مرزهای انتقالی با مدل شبکه گسترده سازگار است.

برای مدلسازی خاک در این برنامه از عناصر چهار گرهی<sup>۵</sup> یا سه گرهی<sup>۶</sup> و برای مدلسازی سازه از عناصر خمشی (تیر) استفاده شده است. توزیع جرم می‌تواند به صورت پیوسته یا متمرکز در نقاط گرهی و یا ترکیبی از آنها در نظر گرفته شود. تاریخچه زمانی زلزله ورودی روی بستر سنگی یا روی سطح آزاد خاک اعمال می‌شود. رفتار غیرخطی خاک تحت اثر حرکات لرزه‌ای شدید با روش خطی معادل در نظر گرفته شده است. حل معادلات تعادل دینامیکی به روش مختلط<sup>۷</sup> این مزیت را فراهم ساخته است که مدول برشی خاک نیز به صورت مختلط تعریف شده و در نتیجه میرایی هر عضو نسبت به اعضای دیگر می‌تواند متفاوت باشد. نمونه‌ای از منحنی تغییرات مدول برشی و میرایی عناصر خاک بر حسب کرنش برشی مؤثر برای خاکهای رسی و ماسه‌ای در شکل (۷) ارائه شده است.

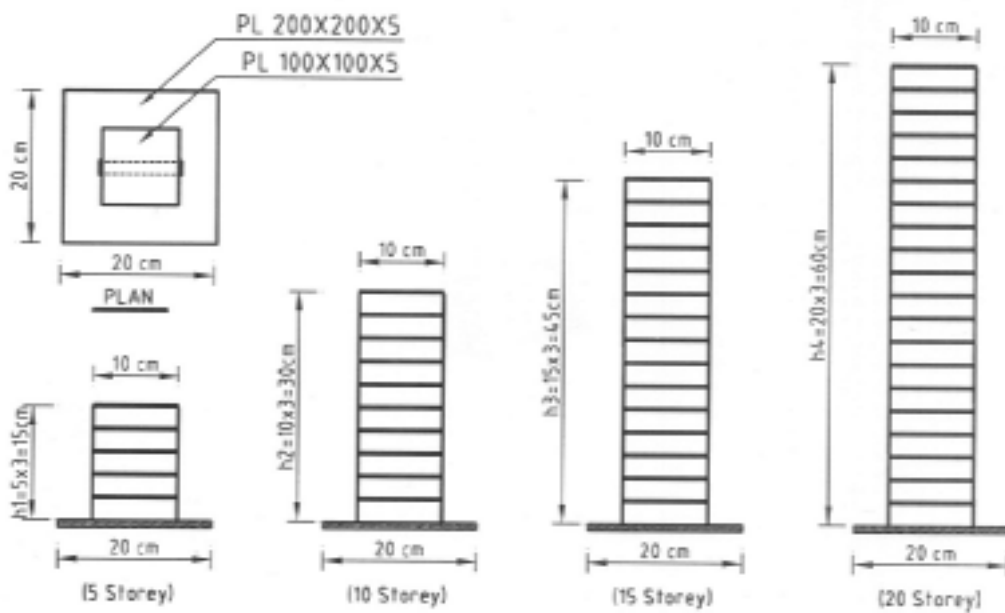
مجموعه قابلیت‌های فوق‌الذکر، برنامه رایانه‌ای FLUSH رابه عنوان یک برنامه تخصصی برای تحلیل مسائل اندرکنش خاک-سازه از دیگر برنامه‌های رایانه‌ای متمایز می‌سازد. متن اصلی این برنامه برای رایانه‌های مادر نوشته شده است. لذا برای اجرایی کردن آن روی رایانه‌های شخصی برای تحلیل نتایج آزمایشگاهی، تغییراتی در متن اصلی این برنامه داده شده است.

#### ۴- مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی

چهار مدل سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه برای مطالعات آزمایشگاهی اندرکنش خاک-سازه طراحی و ساخته شده‌اند. مشخصات مدل‌ها طوری در نظر گرفته شده‌اند که با شرایط نمونه‌های واقعی یک محیط شهری مشابه باشد. باتوجه به امکانات موجود از جمله فضای آزمایشگاهی، ابعاد هندسی میز



شکل ۷- منحنی تغییرات مدول برشی و میرایی چرخه ای خاک با کرنش برشی [۱۲و۸]



شکل ۸- مشخصات مدل‌های سازه ای ۲۰، ۱۰، ۱۵، ۵ و ۲۰ طبقه

تغییرشکل‌های برشی در مدل خاک به راحتی امکانپذیر است. حلقه‌های فولادی پیرامون دیواره نرم ضمن تأمین فشار جانبی محصور کننده از شکم دادن خاک و کاهش ارتفاع آن جلوگیری می‌کند. صفحه فلزی تحتانی که مجموعه ظرف و خاک داخل آن را به میز لرزان اتصال می‌دهد، به عنوان بستر سنگی عمل

ظرف استوانه‌ای شکل به قطر 120 cm و به ارتفاع 70 cm با جداره انعطاف‌پذیر طراحی و ساخته شده است. برای جزییات طراحی ظرف به مرجع [۱۳] مراجعه شود. نمایی از این ظرف در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود. جداره ظرف به صورت یک غشای لاستیکی نرم عمل می‌کند به طوری که ایجاد





شکل ۱۰- نمایی از ظرف مدل خاک ساخته شده

برنامه آزمایشها شامل ۶ مرحله است که در جدول (۱) خلاصه شده است. در مرحله ۱ مدل‌های سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با پایه صلب (بدون اندرکنش با خاک)، در مرحله ۲ پاسخ سطح آزاد در غیاب مدل‌های سازه‌ای، در مراحل ۳ و ۴ اندرکنش سینماتیکی پی‌های سطحی منفرد و مجاور هم و در مراحل ۵ و ۶ اندرکنش سازه‌های منفرد و مجاور هم با خاک مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. آزمایش سازه‌های مجاور هم تمام ترکیبات دوتایی (۵-۱۰، ۵-۱۵، ۵-۲۰، ۱۰-۱۵، ۱۰-۲۰ و ۱۵-۲۰) به ازای فواصل  $d/a = 1, 2, 3, 4$  را شامل می‌شود که  $d$  فاصله بین پی‌ها و  $2a$  طول پی است. مجموعه آزمایشها شامل: ارتعاش آزاد مدل‌های سازه‌ای، آزمایش سرعت موج برشی خاک، آزمایش جاروی فرکانسی و آزمایش دینامیکی تحت زلزله‌های ۱۹۴۰ ال سنترو و ۱۹۷۸ طبس است. این مراحل آزمایشی در دو فاز I و II برای دو نوع خاک مختلف انجام گرفته است.

برای انجام آزمایش ارتعاش آزاد تغییرمکان اولیه ای در نوک مدل‌های سازه‌ای ایجاد شده است. آزمایش سرعت موج برشی با استفاده از روش زمان عبور موج<sup>۸</sup> و به دو حالت انجام گرفته است. در حالت اول ضربه افقی به صفحه تحتانی و در حالت دوم ضربه افقی به سطح مدل خاک اعمال شده است. با اندازه‌گیری زمان عبور موج برشی تولید شده از لایه خاک سرعت موج برشی محاسبه می‌شود. مقدار میانگین دو مرحله به عنوان سرعت موج برشی خاک اختیار شده است. آزمایش



شکل ۹- نمایی از مدل‌های سازه‌ای ساخته شده

می‌کند. سطوح داخلی ظرف که با خاک در تماس‌اند به حد کافی ناصاف‌اند تا از لغزش خاک در جداره‌ها جلوگیری کنند. مدل خاک آماده شده در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متر و تا ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر داخل ظرف پر می‌شود طوری که خاک کاملاً همگن حاصل شود. وزن مخصوص مدل خاک برابر  $\gamma_s = 19 \text{ KN/m}^3$  و نسبت پواسون آن برابر  $\nu = 0.4$  و وزن مجموعه ظرف به‌علاوه خاک داخل آن در حدود ۱۵ KN است.

## ۵- برنامه آزمایش مدل‌ها روی میز لرزان

برای انجام آزمایش‌های دینامیکی از میز لرزان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استفاده شده است. ابعاد این میز  $1.2\text{m} \times 1.4\text{m}$  است که توسط یک سیستم هیدرولیکی با حداکثر نیروی ۵۰ KN به ارتعاش درمی‌آید. جک هیدرولیکی می‌تواند ترکیبی از امواج سینوسی، دوزنقه‌ای، جاروی فرکانسی سینوسی و یا هر رکورد دلخواه نظیر زلزله واقعی را تولید کند. ارتعاشات به صورت یک بعدی و در جهت افقی تولید می‌شوند. قابلیت تولید ارتعاشات قائم نیز وجود دارد. عملکرد قسمتهای مختلف میز لرزان شامل پمپ هیدرولیکی، جکها، سیگنال‌های ورودی-خروجی و غیره توسط یک سیستم رایانه‌ای دیجیتال کنترل می‌شود. به‌علاوه، برای ثبت ارتعاشات از سیستم هشت کاناله DMCPLUS و شتاب‌سنج‌های AR-F استفاده شده است.

جدول ۱- مراحل آزمایش مدل‌های خاک-سازه روی میز لرزان

مرحله آزمایش	نوع مدل	شرح آزمایشها	توضیحات
۱	مدل سازه‌ای با پایه گیردار (بدون اندرکنش با خاک)	ارتعاش آزاد، جاروی فرکانسی، زلزله الاسترو، زلزله طبس	مدلهای سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه
۲	مدل سطح آزاد (خاک)	سرعت موج برشی، جاروی فرکانسی، زلزله الاسترو، زلزله طبس	
۳	مدل اندرکنش سینماتیکی پی-خاک	سرعت موج برشی، جاروی فرکانسی، زلزله الاسترو، زلزله طبس	
۴	مدل اندرکنش سینماتیکی پی-خاک-پی	سرعت موج برشی، جاروی فرکانسی، زلزله الاسترو، زلزله طبس	$d/a = 1, 2, 3, 4$
۵	مدل اندرکنش دینامیکی خاک-سازه	ارتعاش آزاد، جاروی فرکانسی، زلزله الاسترو، زلزله طبس	مدلهای سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه
۶	مدل اندرکنش دینامیکی سازه-خاک-سازه	ارتعاش آزاد، جاروی فرکانسی، زلزله الاسترو، زلزله طبس	$d/a = 1, 2, 3, 4$ تمام ترکیبات دوتایی مدلهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه

است. نتایج آزمایشهای مقدماتی در تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش مدلها مورد توجه قرار گرفته‌اند.

### ۶- نتایج آزمایشهای میز لرزان

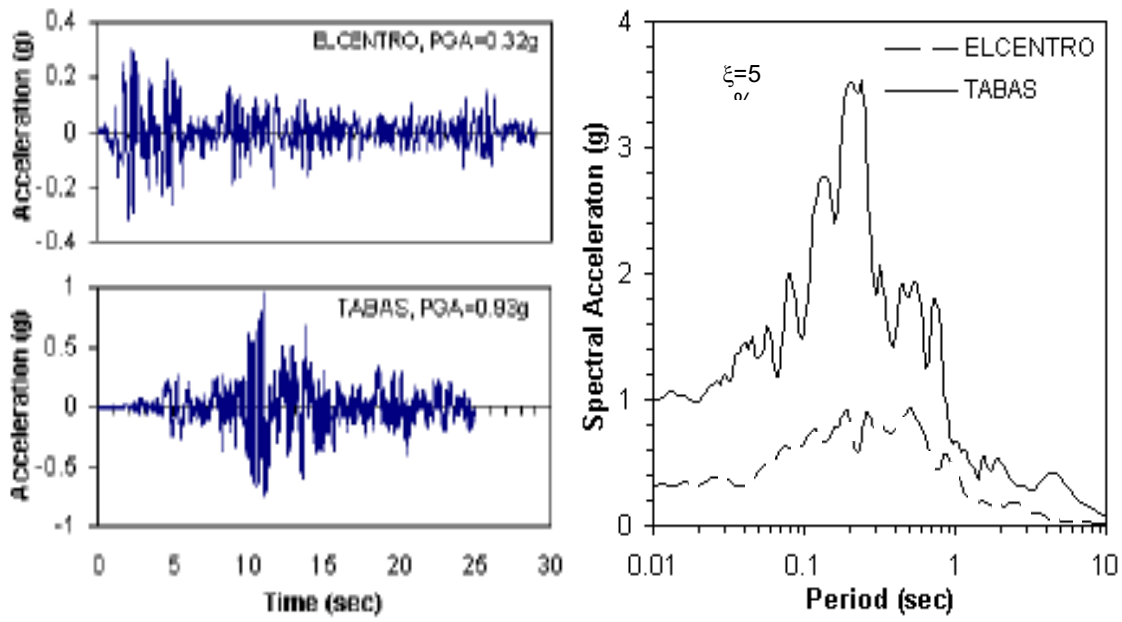
باتوجه به اینکه برنامه آزمایش مدلها روی میز لرزان مراحل و آزمایشهای مختلف را شامل می‌شود، لذا می‌توان اثر پارامترهای مختلف از جمله: تعداد طبقات سازه، نوع خاک، فاصله سازه‌های مجاورهم، تأثیر نوع زلزله و غیره را در اندرکنش خاک-سازه مورد مطالعه قرار داد. پردازش اولیه اطلاعات شامل انتخاب قسمت مطلوب نگاشتهای ثبت شده، اعمال ضریب کالیبراسیون شتاب‌سنجها، تصحیح خط پایه و فیلتر کردن نوفه‌ها<sup>۹</sup> است. بدیهی است که ارائه تمام نتایج آزمایشها در اینجا مقدور نبوده و فقط به ارائه نتایج نمونه بسنده شده است.

#### ۶-۱- پاسخ مدل‌های سازه‌ای با پایه گیردار

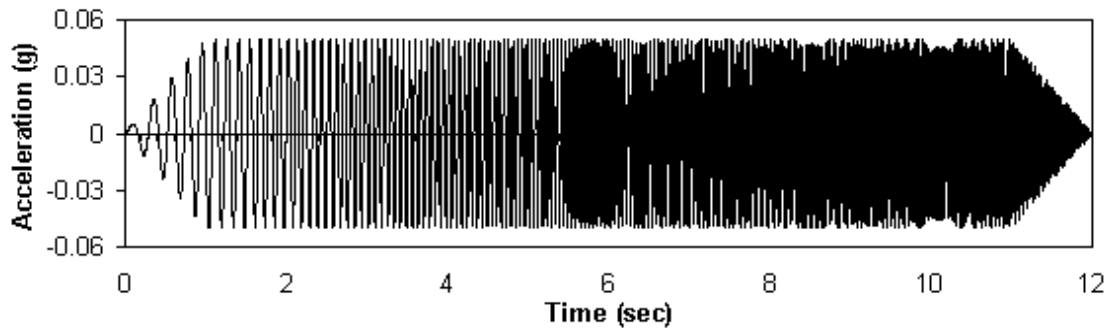
نمونه‌ای از نتایج تابع انتقال فوریه پاسخ شتاب نوک مدل‌های سازه‌ای با پایه‌گیردار نسبت به زلزله ورودی السنسترو در شکل (۱۳) ملاحظه می‌شود. مشخصات دینامیکی (فرکانس و میرایی) این مدلها در محدوده ارتعاشات خطی

سرعت موج برشی خاک در تمام مراحل آزمایش و در روزهای مختلف انجام گرفته است. آزمایشهای دینامیکی تحت زلزله‌های الاسترو و طبس نیز توسط میز لرزان تولید و به مدلها اعمال شده است. تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب این زلزله‌ها با حداکثر شتاب افقی (PGA) به ترتیب برابر 0.32g و 0.93g در شکل (۱۱) ارائه شده است. فواصل زمانی ثبت ارتعاشات این زلزله‌ها برابر ۰/۰۲sec است که با توجه به ضریب مقیاس مدلسازی ( $\lambda=1/100$ ) به ۰/۰۰۲sec کاهش یافته است. قبل و بعد از اعمال رکوردهای زلزله در هر مرحله، آزمایش جاروی فرکانسی<sup>۹</sup> کم‌دامنه انجام گرفته است تا تغییرات احتمالی فرکانسهای ارتعاشی مدلها به علت رفتار غیرخطی خاک یا سازه در اثر زلزله کنترل شود. تاریخچه زمانی این جاروی فرکانسی به صورت یک شتابنگاشت ۱۲ ثانیه‌ای در محدوده فرکانسی ۳ تا ۱۸ هرتز و با حداکثر دامنه شتاب ۰/۰۵ g است که در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

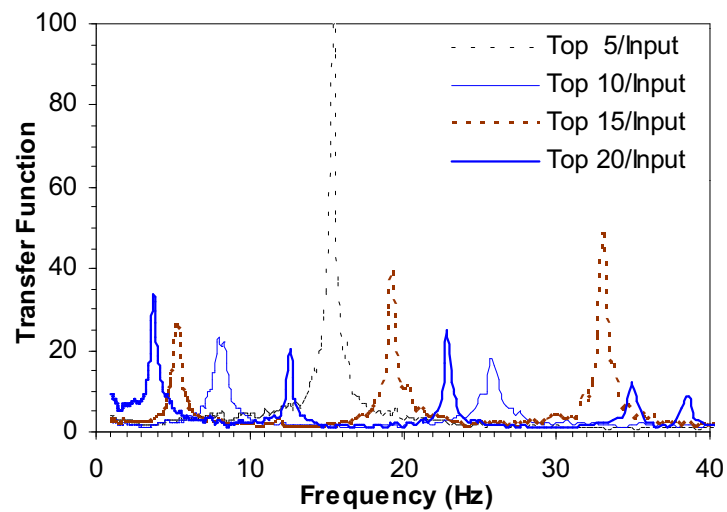
قبل از انجام آزمایشهای اصلی روی مدل‌های اندرکنش خاک-سازه، مجموعه‌ای از آزمایشهای مقدماتی انجام گرفته است. هدف از انجام این آزمایشها بررسی عملکرد میز لرزان و دقت تولید سیگنالهای موردنظر، شناسایی مدها و فرکانسهای نامطلوب در پاسخ میز لرزان، اندرکنش میز-مدل و غیره بوده



شکل ۱۱- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ شتاب زلزله های ورودی السترو و طبس برای آزمایشهای میز لرزان



شکل ۱۲- جاروی فرکانسی در محدوده ۳ الی ۱۸ هرتز با حداکثر شتاب  $PGA=0.05g$



شکل ۱۳- تابع انتقال پاسخ شتاب نوک مدل های سازه ای با پایه گیردار

$$f_n = \frac{(2n-1)V_s}{4H} \quad (10)$$

در رابطه بالا  $f_n$  فرکانس مد  $n$ ام،  $V_s$  سرعت موج برشی و  $H$  ضخامت لایه خاک روی بستر سنگی اند.

نتایج تابع انتقال فوریه پاسخ شتاب سطح آزاد نسبت به زلزله ورودی الاسترو با شدتهای مختلف در فاز I مطابق شکل (۱۴) و طیف پاسخ شتاب آن مطابق شکل (۱۵) حاصل شده اند. همان طور که ملاحظه می شود در زلزله های کوچک ( $PGA \leq 0.03g$ )، ضریب بزرگنمایی خاک در حدود ۱۰ است که تحت زلزله های متوسط ( $PGA \approx 0.1g$ ) و بزرگ ( $PGA \approx 0.3g$ ) به حدود ۶ و ۴ تقلیل می یابد. همچنین، نتایج نشان می دهند که حداکثر پاسخ شتاب سطح آزاد خاک تحت زلزله های کوچک در حدود ۲ برابر بستر سنگی است که در زلزله های متوسط و بزرگ به حدود ۱/۵ و ۱/۲ برابر کاهش پیدا می کند. علاوه بر محتوای فرکانسی زلزله، رفتار غیرخطی خاک نیز تحت زلزله های بزرگ عامل مهمی در کاهش پاسخ سطح آزاد محسوب می شود. نتایج نشان می دهند که فرکانس اصلی ارتعاش مدل خاک در زلزله های متوسط و بزرگ به ترتیب در حدود ۷ تا ۱۰ درصد کاهش یافته است. به این ترتیب، رفتار غیرخطی خاک با کاهش فرکانس و افزایش میرایی می تواند عامل مهمی در کاهش خسارات ناشی از زلزله های شدید باشد.

### ۳-۶- اندرکنش سینماتیکی خاک- پی منفرد

مدهای ارتعاش پی در حالت دو بعدی شامل حرکات: افقی (H)، قائم (V) و گهواره ای (R) است که در شکل (۱۶) نشان داده شده است. نتایج طیف فوریه و تابع انتقال پاسخ شتاب مدهای افقی و گهواره ای پی نسبت به پاسخ سطح آزاد تحت زلزله الاسترو ( $PGA = 0.13g$ ) در شکل (۱۷) ارائه شده است. این نتایج نشان می دهند که حرکات افقی پی تا فرکانسهای 35 Hz تقریباً با حرکات افقی سطح آزاد یکسان است. همچنین، حرکات گهواره ای پی تا فرکانس 22 Hz مد خاصی را نسبت به سطح آزاد تولید نمی کند. دامنه حرکات قائم پی نیز در مقایسه با حرکات افقی ناچیز بوده و قابل

( $PGA \leq 0.03g$ ) و غیرخطی ( $PGA \approx 0.1g$ ) مطابق جدول (۲) به دست می آید. همان طور که ملاحظه می شود فرکانس مد اصلی ارتعاش مدل های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه در محدوده خطی به ترتیب ۱۵/۵۰، ۸/۳۰، ۵/۳۵ و ۳/۷۵ هرتز است. با توجه به ضریب مقیاس مدلسازی ( $\lambda = 1/100$ )، فرکانسهای مشابه برای نمونه های واقعی برابر ۱۰ درصد مقادیر مذکورند که در مقایسه با ساختمانهای متداول در یک محیط شهری مناسب اند. آثار رفتار غیرخطی در پاسخ مدل های سازه ای به صورت کاهش فرکانس و افزایش میرایی مشاهده می شود. این آثار در پاسخ مدل ۱۰ طبقه بیشتر از بقیه مدلها دیده می شود. مقایسه نتایج در شروع و خاتمه مجموعه آزمایشهای هر فاز (حدود ۴۰۰ مرتبه ارتعاش در محدوده  $PGA \leq 0.1g$ ) نشان می دهد که در طول مدت انجام آزمایشها مشخصات مدل های سازه ای تغییر قابل توجهی نداشته و نتایج به دست آمده از مراحل مختلف قابل مقایسه اند.

### ۲-۶- پاسخ سطح آزاد

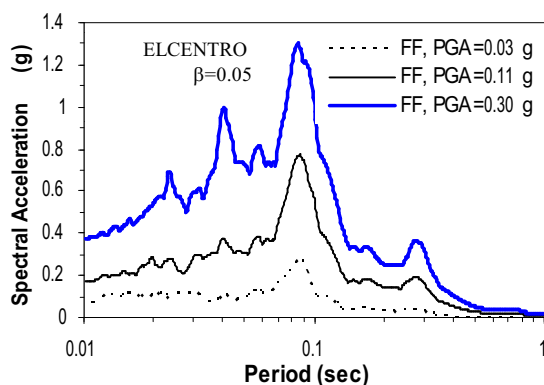
میانگین سرعت موج برشی مدل خاک تحت ارتعاشات کم دامنه حاصل از آزمایشهای سرعت موج برشی در فازهای I و II به ترتیب معادل 31 m/sec و 43 m/sec حاصل شده است که با زمینهای نوع III و II براساس طبقه بندی آیین نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران و ویرایش دوم مطابقت دارد [۲۰]. بیشترین تغییرات سرعت موج برشی اندازه گیری شده در روزهای مختلف نسبت به مقدار میانگین کمتر از ۴ درصد است. در نتیجه، مدل های خاک پایداری کافی در مقابل ارتعاشات متعدد و شرایط محیطی را داشته و نتایج حاصل از مراحل مختلف قابل مقایسه اند. مشخصات دینامیکی مدل های خاک (فرکانس و میرایی) تحت ارتعاشات محدوده خطی مطابق جدول (۳) حاصل شده است. همان طور که ملاحظه می شود فرکانس مد اصلی خاک در فازهای I و II به ترتیب ۱۳/۰ و ۱۸/۰ هرتز و میرایی مربوطه به ترتیب ۳/۸ و ۳/۹ درصد حاصل شده اند. این فرکانسها توافق خوبی را با فرکانسهای حاصل از معادله تحلیلی زیر برای خاکهای چسبیده نشان می دهد:

جدول ۲- مشخصات دینامیکی مدل‌های سازه‌ای با پایه گیردار

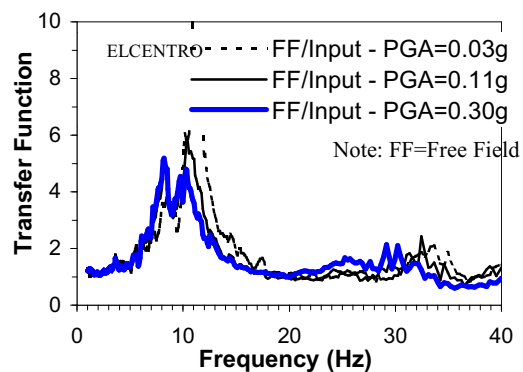
محدوده غیرخطی		محدوده خطی		مد ارتعاشی	مدل سازه‌ای
میرایی (%)	فرکانس (Hz)	میرایی (%)	فرکانس (Hz)		
0.33	15.30	0.33	15.50	اول	۵ طبقه
3.4	7.60	0.66	8.30	اول	۱۰ طبقه
	21.0		25.50	دوم	
1.17	5.20	0.45	5.35	اول	۱۵ طبقه
	19.20		19.40	دوم	
	32.00		32.20	سوم	
1.3	3.70	0.60	3.75	اول	۲۰ طبقه
	12.60		12.60	دوم	
	22.50		22.90	سوم	

جدول ۳- مشخصات دینامیکی مدل خاک تحت ارتعاشات کم دامنه (خطی)

میرایی خاک (%)	فرکانس ارتعاشی (Hz)		مد ارتعاشی	Vs (m/s)	فاز آزمایش
	تحلیلی (رابطه ۱۰)	تجربی			
3.8	12.9	13.0	اول	30.0	فاز I
4.5	38.8	35.0	دوم		
3.9	17.9	18.0	اول	43.0	فاز II
4.8	53.8	50.0	دوم		



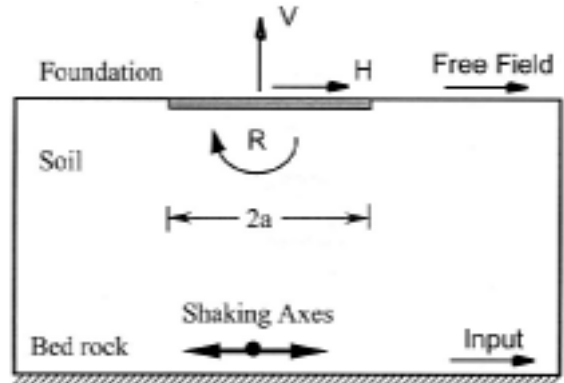
شکل ۱۵- طیف پاسخ شتاب سطح آزاد تحت زلزله السنترو



شکل ۱۴- تابع انتقال پاسخ شتاب سطح آزاد نسبت به زلزله ورودی السنترو

#### ۶-۴- اندرکنش سینماتیکی پی- خاک- پی

نتایج آزمایش پی‌های مجاور هم مشابه پی منفرد بوده و اثر متقابل آنها عملاً قابل صرف نظر کردن می‌باشد. با توجه به اینکه اثرات اندرکنش سینماتیکی در فرکانسهای بالا مشاهده می‌شود، لذا به نظر می‌رسد این‌گونه اثرات در ساختمانهای سخت و صلب نظیر نیروگاهها یا در ساختمانهای با لوازم مکانیکی، الکتریکی و الکترونیکی حساس از اهمیت بیشتری برخوردار باشد.

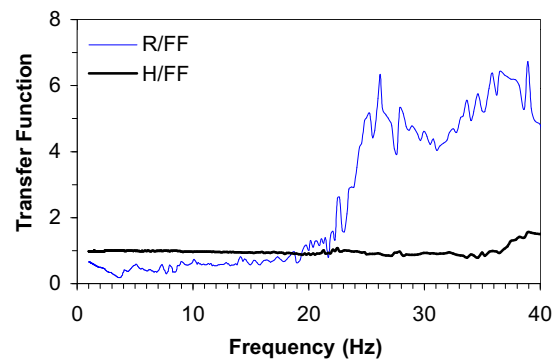
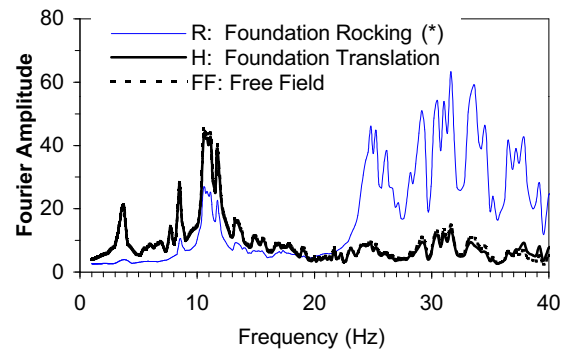


شکل ۱۶- مدهای ارتعاشی یک پی صلب سطحی یکپارچه

#### ۶-۵- اندرکنش دینامیکی خاک- سازه منفرد

نمایی از آزمایشهای این مرحله در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود. در این مرحله مدل‌های سازه ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه روی خاک مورد آزمایش قرار گرفته اند. نمونه ای از نتایج تبدیل فوریه پاسخ شتاب نوک مدل‌های سازه‌ای به علاوه پاسخ مدهای افقی و گهواره ای پی‌ها و تابع انتقال آنها نسبت به سطح آزاد تحت زلزله السترو ( $PGA=0.1g$ ) در فاز I مطابق شکل (۱۹) حاصل شده است. با جمع بندی نتایج این آزمایشها، مشخصات دینامیکی مدل‌های سازه‌ای (فرکانس و میرایی) در محدوده ارتعاشات خطی ( $PGA \leq 0.03g$ ) و غیرخطی ( $PGA \approx 0.1g$ ) مطابق جدول (۴) به دست می‌آید. نتایج این جدول به خوبی آثار مهم اندرکنش خاک-سازه را در کاهش فرکانس و افزایش میرایی مدل‌های سازه ای نسبت به مدل‌های با پایه گیردار نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود کاهش فرکانس مد اول سازه ۵ طبقه فقط ۱/۵٪ است در صورتی که این کاهش در مدل ۲۰ طبقه به بیش از ۵/۵٪ می‌رسد (جدول ۲ و ۴ مقایسه شوند). این اثرات در مدهای بالاتر قابل توجه نیست. از سوی دیگر، بررسی مقادیر میرایی نشان می‌دهد که اندرکنش خاک-سازه میرایی مدل ۵ طبقه را در حدود ۳٪ افزایش داده است در صورتی که این افزایش در مدل ۲۰ طبقه به ۱۰۰٪ می‌رسد. در سازه‌های با میرایی زیاد (مدل ۱۰ طبقه)، اثرات اندرکنش خاک-سازه اهمیت کمتری دارد.

مطالعات بیشتر نشان می‌دهند که مکانیزم اصلی اثرات

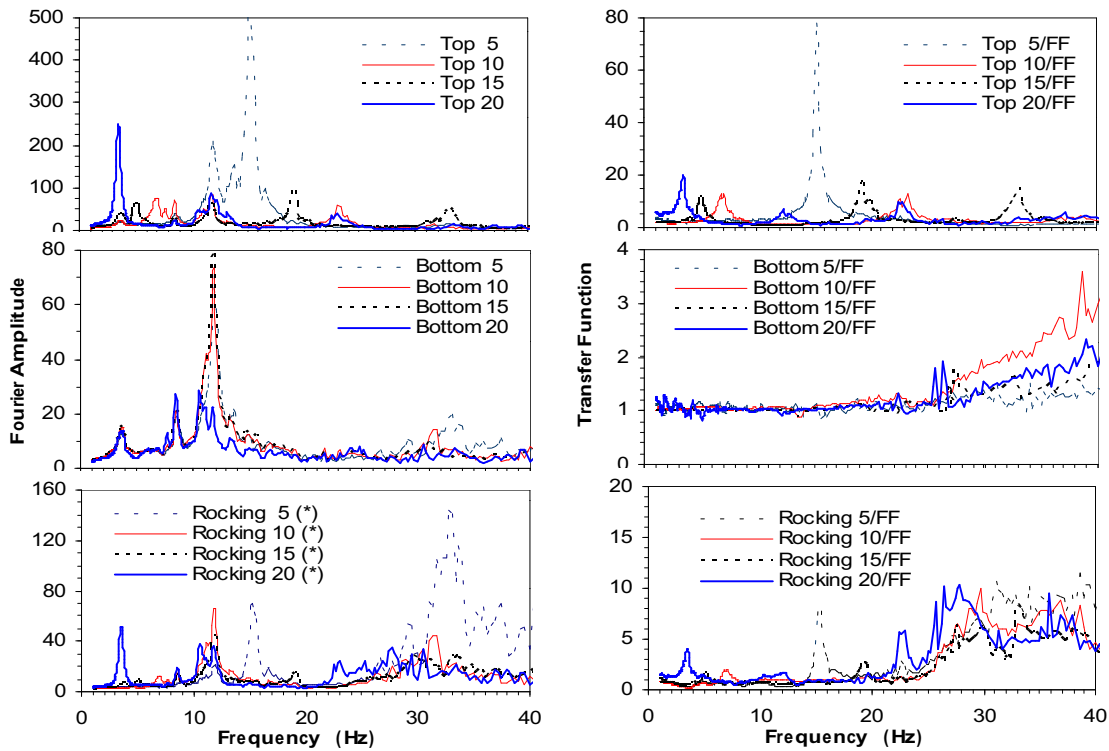


شکل ۱۷- تبدیل فوریه و تابع انتقال پاسخ شتاب مدهای ارتعاشی گهواره‌ای وافقی پی منفرد نسبت به سطح آزاد تحت زلزله السترو

صرف نظر کردن است. به این ترتیب ملاحظه می‌شود که اثرات اندرکنش سینماتیکی پی‌ها به فرکانسهای بالاتر از مدهای اصلی ارتعاش سازه‌ها مربوط می‌شود که عملاً از نظر مطالعات آسیب‌پذیری لرزه‌ای اهمیت زیادی ندارند.



شکل ۱۸- نمایی از آزمایشهای اندرکنش خاک-سازه منفرد



شکل ۱۹- تبدیل فوریه و تابع انتقال پاسخ شتاب نوک مدل‌های سازه‌ای و مدهای افقی و گهواره‌ای پی‌ها نسبت به سطح آزاد تحت زلزله السنترو

مدل ۵ طبقه) تقریباً یکسان است؛ اما با افزایش ارتفاع ساختمان سهم مدگهواره‌ای به شدت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال سهم مد گهواره‌ای پی در پاسخ نوک مدل سازه‌ای ۲۰ طبقه در حدود ۹ برابر سهم مد افقی آن است.

اندرکنش خاک-سازه به مدهای ارتعاش افقی و گهواره‌ای پی‌ها مربوط است. اگر سهم این مدها در پاسخ نوک سازه معادل  $u_f$  و  $h\theta$  (مطابق شکل ۲) در نظر گرفته شود، با مراجعه به نتایج می‌توان گفت که سهم این مدها در پاسخ ساختمانهای کوتاه

جدول ۴- مشخصات دینامیکی مدل‌های سازه‌ای منفرد روی خاک در فاز I

مدل سازه‌ای	مد ارتعاشی	محدوده خطی		محدوده غیرخطی	
		فرکانس (Hz)	میرایی (%)	فرکانس (Hz)	میرایی (%)
۵ طبقه	اول	15.25	0.35	15.23	0.35
	اول	7.91	0.70	7.40	0.35
۱۰ طبقه	دوم	24.90		20.50	
	اول	5.14	0.80	5.00	0.80
۱۵ طبقه	دوم	19.20		19.00	
	سوم	33.10		32.00	
	اول	3.55	1.20	3.50	1.20
۲۰ طبقه	دوم	12.60		12.60	
	سوم	22.90		22.50	
	اول				

#### ۶-۶- اندرکنش دینامیکی سازه- خاک- سازه

نمایی از آزمایش‌های این مرحله در شکل (۲۰) ملاحظه می‌شود که تمام ترکیب‌های دوتایی مدل‌های سازه ای ۱۵، ۱۰، ۵ و ۲۰ طبقه روی خاک را شامل می‌شود. نمونه‌ای از نتایج تابع انتقال فوریه مربوط به پاسخ شتاب نوک مدل‌های سازه ای ۱۵ و ۲۰ طبقه مجاور هم و مدهای افقی و گهواره‌ای پی‌های آنها نسبت به زلزله ورودی ال‌سترو ( $PGA = 0.1 g$ ) در فاز I به ازای فواصل  $d/a = 1, 2, 3, 4$  مطابق شکل (۲۱) حاصل شده است. نتایج نشان می‌دهند که با تحریک کردن یکی از مدل‌های سازه‌ای، ارتعاشات از طریق پی و خاک به سازه مجاور منتقل می‌شود. اگرچه این گونه انتقال ارتعاشات از مکانیزم پیچیده‌ای برخوردار است ولی مجموعه این اثرات را می‌توان در تغییر مشخصات دینامیکی (فرکانس و میرایی) و پاسخ مدل‌های سازه‌ای جستجو کرد.

با مراجعه به نتایج آزمایش‌ها، تغییر فرکانس‌های ارتعاشی و میرایی مدل‌های سازه‌ای مجاور هم در مد اصلی مطابق جدول (۵) به دست می‌آید. مقایسه نتایج این جدول با نتایج مشابه برای مدل‌های سازه ای منفرد (جدول ۴) نشان می‌دهد که سازه‌های مجاور هم تأثیر عمده‌ای در تغییر فرکانس و میرایی همدیگر ندارند. تنها در فواصل  $d/a = 1, 2$  تغییراتی در فرکانس‌های ارتعاشی سازه‌های نزدیک به هم ملاحظه می‌شود. علاوه بر فرکانس‌های ارتعاشی، تغییرات جزئی در میرایی سازه‌های مجاور هم نسبت به سازه منفرد مشاهده می‌شود لیکن

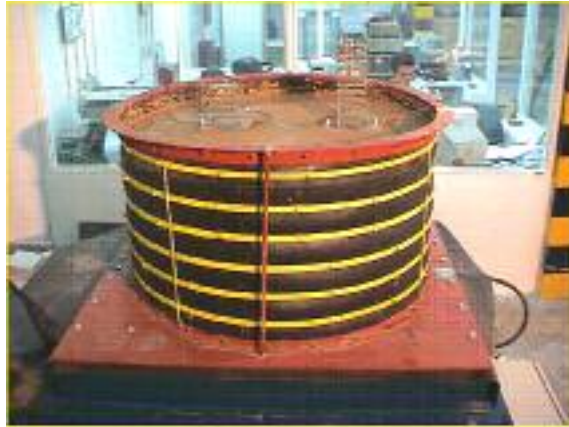
روند خاصی قابل شناسایی نیست. در سازه‌های با میرایی زیاد (مدل ۱۰ طبقه) از اهمیت اندرکنش متقابل سازه‌ها کاسته می‌شود.

برای ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه‌های مجاور هم، تغییرات ضریب بزرگنمایی پاسخ شتاب نوک سازه‌ها (دامنه تابع انتقال فوریه) در مد اول برحسب نوع و فاصله سازه‌ها تحت اثر زلزله ال‌سترو در شکل (۲۲) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مهمترین اثرات اندرکنش سازه‌های مجاور هم در ساختمان‌های کوتاه (۵ طبقه) اتفاق می‌افتد و با افزایش ارتفاع سازه از اهمیت این اثرات کاسته می‌شود. در نتیجه این ایده مطرح می‌شود که اثرات متقابل سازه‌های مجاور هم به فرکانس‌های بالا مربوط می‌شود. تاثیر قابل توجه این اثرات در دامنه پاسخ مدهای دوم و سوم مدل‌های سازه‌ای ۱۵ و ۲۰ طبقه (مطابق شکل ۲۱) بیش از پیش این ایده را تقویت می‌کند. به علاوه، تغییرات پاسخ شتاب سازه‌های مجاور هم برحسب فاصله ( $d/a$ ) از یک شکل سینوسی تبعیت می‌کند. این عملکرد جالب توجه در ساختمان‌های کوتاه (۵ طبقه) و با فرکانس‌های نزدیک به هم بیشتر مشهود است. با افزایش فاصله ساختمانها اثرات اندرکنش متقابل سازه ها کاهش می‌یابد.

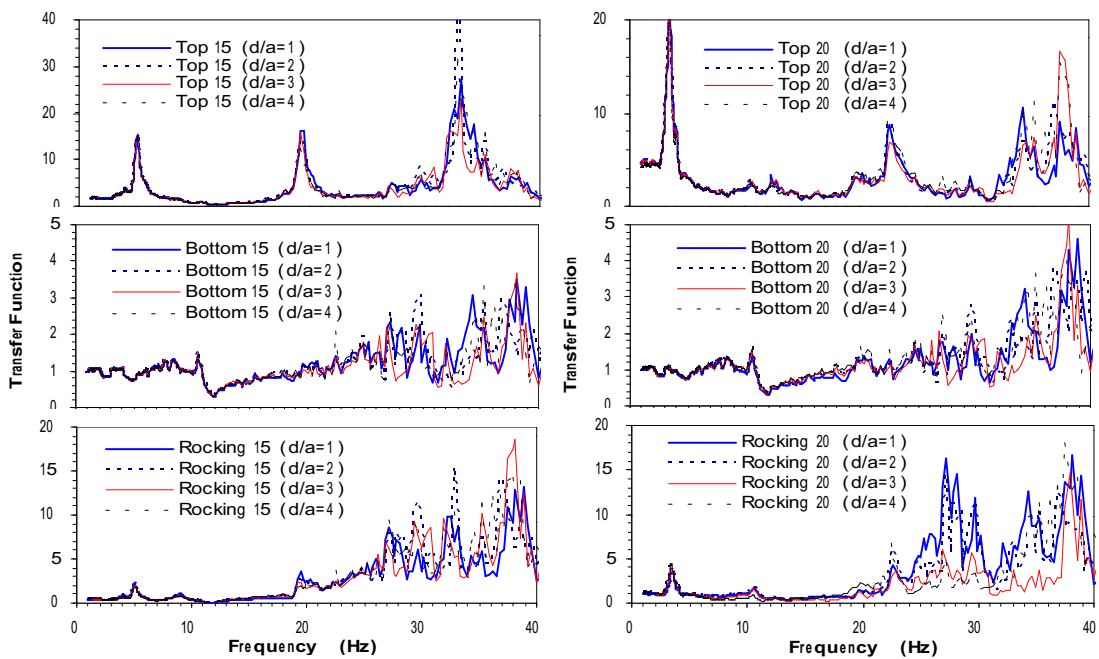
#### ۷- مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی

برای تحلیل نتایج آزمایشگاهی از برنامه رایانه‌ای FLUSH استفاده شده است. مدل اجزای محدود به کار رفته در این برنامه برای تحلیل مدل‌های آزمایشی خاک- سازه در شکل





شکل ۲۰- نمایی از آزمایشهای اندرکنش سازه-خاک-سازه



شکل ۲۱- تابع انتقال پاسخ شتاب نوک مدل‌های سازه‌ای مجاور هم ومد‌های افقی وگهواره ای پی آنها نسبت به سطح آزاد تحت زلزله السترو

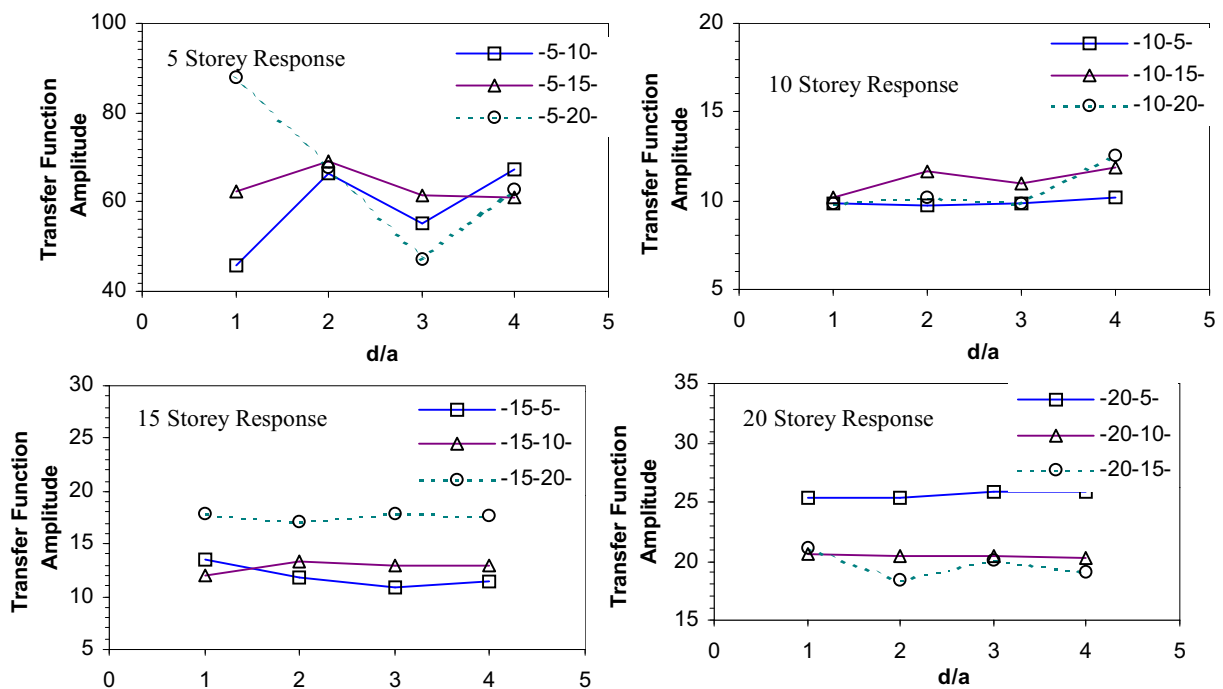
(۲۵) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج تجربی و تحلیلی پاسخ سطح آزاد و همچنین پاسخ نوک مدل‌های سازه‌ای توافق بسیار خوبی با هم دارند. این توافق هم در تاریخچه زمانی شتاب و هم در طیف پاسخ شتاب دیده می‌شود. بیشترین تفاوت به پاسخ مد‌های بالاتر مدل‌های مربوط می‌شود. نتایج مشابهی برای سازه‌های مجاور هم نیز حاصل شده است که برای اختصار ارائه نشده‌اند. تفاوت‌های جزئی در نتایج تجربی- تحلیلی به خطاهای آزمایشگاهی و فرضیات مدلسازی

(۲۳) نشان داده شده است. مشخصات هندسی و مکانیکی خاک و سازه و همچنین زلزله ورودی مطابق مشخصات مدل‌های آزمایشی در نظر گرفته شده‌اند.

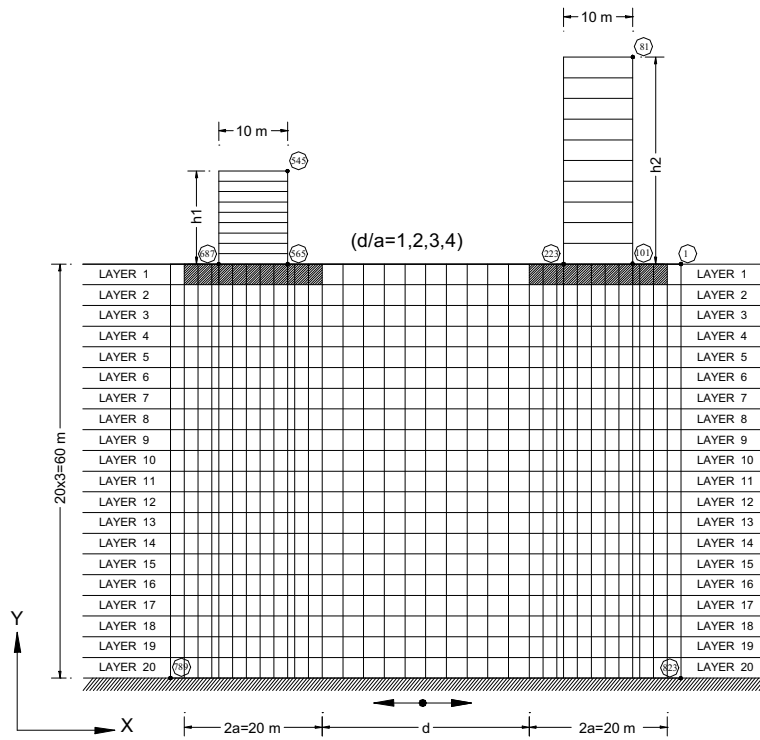
نمونه ای از نتایج تجربی- تحلیلی پاسخ شتاب سطح آزاد تحت زلزله السترو با حداکثر شتابهای  $0.3g$  و  $1.0g$  در فاز I مطابق شکل (۲۴) به دست آمده است. همچنین، نمونه‌ای از نتایج تجربی- تحلیلی پاسخ شتاب نوک مدل‌های خاک-سازه منفرد برای سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت زلزله السترو در شکل

جدول ۵- مشخصات دینامیکی مدل‌های سازه‌های مجاور هم روی خاک در مد اصلی

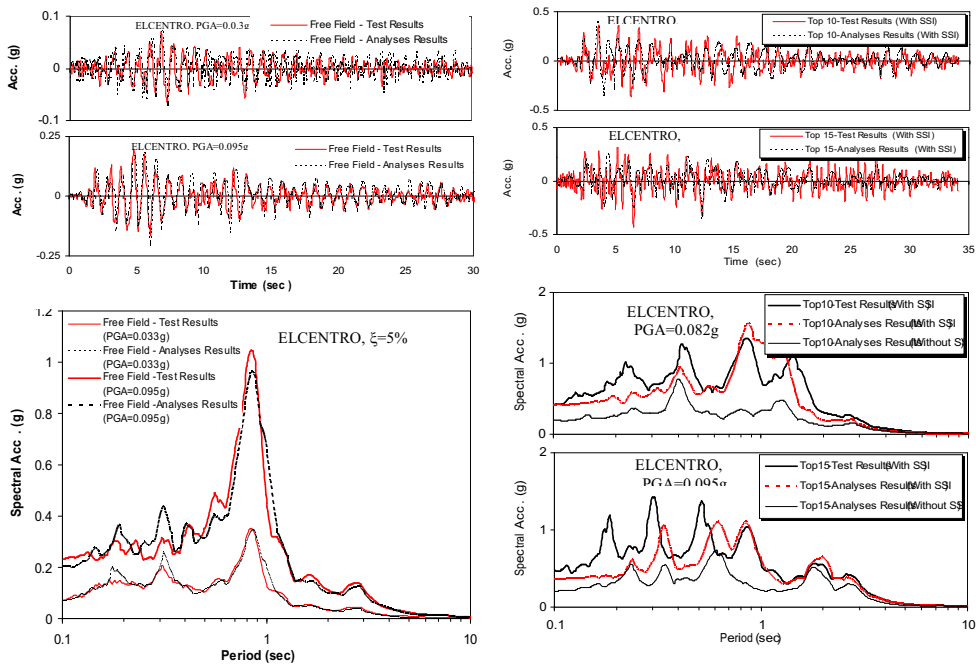
میرایی در محدوده خطی (%)				حداکثر شتاب زلزله ورودی (g)	فرکانس ارتعاشی (Hz) تحت زلزله				مدل سازه‌ای موردنظر	مدل سازه‌های مجاور هم
d/a=4	d/a=3	d/a=2	d/a=1		d/a=4	d/a=3	d/a=2	d/a=1		
0.37	0.46	0.52	0.6	0.07	15.129	15.129	15.129	15.267	5 طبقه	5-10
0.35	0.40	0.40	0.35	0.035	51.129	51.129	51.129	51.129		5-15
0.36	0.45	0.45	0.33	0.035	15.267	15.128	15.408	15.408		5-20
0.70	0.84	0.66	0.8	0.07	7.107	7.107	7.107	7.107	10 طبقه	5-10
0.74	0.72	0.59	0.63	0.095	7.107	7.107	7.107	7.107		10-15
0.58	0.89	0.75	0.87	0.95	7.107	7.107	7.107	7.042		10-20
0.78	0.80	0.90	0.74	0.035	5.187	5.187	5.139	5.139	15 طبقه	5-15
0.67	0.64	0.65	0.71	0.095	5.048	5.048	5.048	5.048		10-15
0.65	0.66	0.70	0.63	0.095	5.094	5.094	5.048	5.003		15-20
0.92	0.92	1.05	1.10	0.035	3.555	3.555	3.555	3.555	20 طبقه	5-20
1.45	1.11	1.13	1.15	0.095	3.429	3.429	3.429	3.429		10-20
1.34	1.62	1.10	0.98	0.095	3.460	3.429	3.430	3.492		15-20



شکل ۲۲- تغییرات حداکثر دامنه پاسخ شتاب نوک مدل‌های سازه‌های مجاور هم در مد اول بر حسب نوع و فاصله سازه‌ها تحت زلزله الاسترو



شکل ۲۳- مدل اجزای محدود FLUSH برای تحلیل مدل‌های آزمایشی خاک-سازه



شکل ۲۵- نمونه‌ای از نتایج تجربی-تحلیلی پاسخ شتاب نوک مدل‌های خاک-سازه منفرد برای سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت زلزله السنترو

شکل ۲۴- نمونه‌ای از نتایج تجربی-تحلیلی پاسخ سطح آزاد تحت زلزله السنترو با حداکثر شتابهای 0.03g و 0.10g

۳- در زمینهای نوع III اثرات اندرکنش خاک-سازه در تغییر فرکانسهای ارتعاشی و میرایی سازه‌ها قابل توجه بوده و می‌تواند در طرح و محاسبات و یا در مطالعات آسیب پذیری لرزه‌ای سازه‌ها با اهیت باشد. در زمینهای نوع II این اثرات تا حدودی در ساختمانهای ۱۵ و ۲۰ طبقه قابل توجه بوده ولی در ساختمانهای ۵ و ۱۰ طبقه قابل اغماض اند.

۴- مکانیزم اصلی اندرکنش خاک-سازه به مدهای افقی و گهواره‌ای پی‌ها مربوط می‌شود. این مدها در ساختمانهای کوتاه (مدل ۵ طبقه) اهمیت تقریباً یکسانی دارند. ولی با افزایش ارتفاع سازه اثرات مد گهواره‌ای غالب می‌شود. به عنوان مثال سهم مد گهواره‌ای پی در پاسخ نوک مدل سازه‌ای ۲۰ طبقه در حدود ۹ برابر سهم مد افقی آن است.

۵- اثرات اندرکنش خاک-سازه اساساً در مد اصلی (اول) سازه‌ها مشاهده می‌شود و اثر مدهای بالاتر تقریباً ناچیز است.

۶- اثرات متقابل سازه‌های مجاور هم نقش عمده‌ای در تغییر فرکانس و میرایی سازه‌ها ایفا نمی‌کند. اهمیت این گونه اثرات در فرکانسهای بالاتر از فرکانسهای پایین است.

۷- بیشترین اثرات سازه‌های مجاور هم در پاسخ سازه‌های نزدیک به هم ( $d/a \leq 2$ ) ملاحظه می‌شود. به علاوه، این اثرات در پاسخ ساختمانهای مشابه بیشتر است.

۸- تغییرات دامنه پاسخ فرکانسی سازه‌های مجاور هم برحسب فاصله ( $d/a$ ) از یک شکل تقریباً سینوسی تبعیت می‌کند. این گونه عملکرد در ساختمانهای با فرکانسهای مشابه بیشتر مشهود است.

### قدردانی

این پروژه تحقیقاتی از طریق طرح ملی تحقیقات به شماره ۳۱۳۰۳۲۶۹ و با حمایت شورای پژوهشهای علمی کشور انجام یافته است که بدین وسیله قدردانی به عمل می‌آید.

عددی مربوط می‌شوند. به هر حال، نتایج نشان می‌دهند که برنامه رایانه‌ای FLUSH از دقت و قابلیت خوبی برای تحلیل سیستمهای خاک-سازه برخوردار است. در خاتمه این نکته مهم خاطر نشان می‌شود که پاسخ سطح آزاد به رفتار غیر خطی خاک بسیار حساس است. بنابراین، در انتخاب منحنی تغییرات مدول برشی و میرایی چرخه‌ای خاک با کرنش برشی (شکل ۷) به خصوص تحت زلزله‌های بزرگ باید دقت کافی به عمل آورد.

### ۸- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر چهار مدل سازه‌ای ۱۵، ۱۰، ۵ و ۲۰ طبقه روی زمینهای نوع III ( $V_s=310\text{m/sec}$ ) و نوع II ( $V_s=430\text{m/sec}$ ) مطابق طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران ویرایش دوم به صورت تکی و مجاور هم روی میز لرزان آزمایش شده و مجموعه بزرگی از اطلاعات آزمایشگاهی مربوط به پاسخ سطح آزاد خاک، اندرکنش سینماتیکی پی‌های منفرد و مجاور هم و همچنین اندرکنش دینامیکی سازه‌های منفرد و مجاور هم حاصل شده است. ارزیابی نتایج نشان می‌دهند که میز لرزان پژوهشگاه عملکرد مناسبی داشته و سیگنالهای مورد نظر را با دقت کافی تولید می‌کند. همچنین، ظرف طراحی شده برای مدل خاک قابلیت عملکرد مطلوب خاک را به عنوان یک محیط نیمه بی‌نهایت ویسکوالاستیک تامین کرده است. با مروری بر نتایج تجربی و تحلیلی به دست آمده می‌توان مهمترین یافته‌های این تحقیق را به شرح زیر خلاصه کرد:

- ۱- اثرات اندرکنش سینماتیکی پی- خاک در فرکانسهای بالاتر از مد اصلی مدلهای سازه‌ای اتفاق می‌افتد. لذا این اثرات در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه‌ها چندان قابل توجه نیستند.
- ۲- ضریب بزرگنمایی دینامیکی زمینهای نوع III و II نسبت به بستر سنگی تحت زلزله‌های متوسط ( $PGA \approx 0.10g$ ) به ترتیب در حدود ۶ و ۴ است. حداکثر شتاب لرزه‌ای این زمینها به ترتیب در حدود ۲ و ۱/۵ برابر نسبت به بستر سنگی تقویت می‌شود.

- |                          |                     |               |
|--------------------------|---------------------|---------------|
| 1. free field            | 5. quadrilateral    | 9. sine sweep |
| 2. site city interaction | 6. triangular       | 10. noise     |
| 3. viscous boundary      | 7. complex response |               |
| 4. transmitting boundary | 8. travel time      |               |

## مراجع

- Stewart, J.P. Seed, R.B. and Fenves, G.L. "Empirical Evaluation of Inertial Soil – Structure Interaction effects," *PEER* – 98107.1998.
- Wirgin A. and P-Y Bard, "Effects of Building on the Duration and Amplitude of Ground Motion in Mexico City," *Bull. of Seismological Society of America*. Vol. 86, No 32, pp 914-920, 1996.
- Building Seismic Safety Council (BSSC), "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings, part 1. Provisions and part 2. Commentary," Rep. No. FEMA 222A. 1995.
- "Uniform Building Code (UBC), " *International Conference of Building Officials*, 1997.
- Applied Technology Council (ATC), "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations," Rep. No ATC 3-06, 1978.
- wolf, J.P. *Dynamic Soil – Structure Interaction*, Prentice – Hall Englewood cliffs, N.J., 1985.
- wolf, J.P. *Soil – Structure-Interaction Analysis in Time Domain*, Prentice-Hall, Inc., 1988.
- Das, B.M. "Principles of Soil Dynamics," *PWS-KENT*, 1993.
- Clough, R.W. and Penzien. J. *Dynamics of Structures*, Mc Graw – Hill, Inc., 1993.
- Chopra A.K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall Inc., 1995.
- Stewart J.P., Fenves G.L., R.B., Seed "Seismic Soil – Structure Interaction in Buildings, I: Analytical Methods and II: Empirical findings," *J. of Geotech. Engng., ASCE*, 125 (1), 1999.
- Lysmer J., Ukada T., Tsai C.F., H.B., Seed "FLUSH, A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil – Structure Interaction Problems," *EERC 75-30*, 1975.
- Meymand P.J., "Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction in Soft Clay," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering of California, Berkeley, 1998.
- Yano T., Kitada y, Iguchi M., T., Hirotani K., Yashida "Model Test on Dynamic Cross Interaction of Adjacent Buildings in Nuclear Power Plants," 12WCEE. 2000.
- بهنام فر، ف.، سوگی مورا، ی. ه.، "تحلیل دینامیکی سازه‌های بایی سطحی یامدفون تحت اثر زمین‌لرزه متغیر در مکان و اثر سازه‌های مجاور"، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، شماره ۲، زمستان ۱۳۷۷؛
- حسین زاده، ن. ع.، و ناطقی الهی، ف.، "اندرکنش خاک-سازه در ساختمانهای مجاور هم"، شورای پژوهشهای علمی کشور، (در دست چاپ)؛
- ناطقی الهی، ف.، و حسین زاده ن. ع.، "روش برای ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای ساختمانهای بتن مسلح دارای دیوار برشی"، کمیته فرعی-تخصصی مقابله با خطرات ناشی از زمین لرزه و لغزش لایه های زمین، ۱۳۷۸.
- ناطقی الهی، ف.، و حسین زاده ن. ع.، "ارزیابی مقاومت و شکل پذیری ساختمانهای بتن مسلح"، نشریه مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان، سال ۲۰، شماره ۲، زمستان ۱۳۸۰.
- حسین زاده، ن. ع.، و ناطقی الهی، ف.، "تعیین ضریب خسارت لرزه ای ساختمانهای بتنی مسلح معمولی تهران"، شورای پژوهشهای علمی کشور، (در دست چاپ).
- "آیین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله-استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران، ویرایش دوم"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۸.