



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۲۹۱ تا ۲۹۹  
Vol. 48, No. 3, Fall 2016, pp. 291-299



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science & Research  
Civil and Environmental Engineering  
(ASJR-CEE)

## بررسی تغییرات مشخصات دینامیکی سازه‌های مجاور هم با مطالعه موردی

حمید فروغی<sup>۱</sup>، فرهاد بهنام‌فر<sup>۲\*</sup>، بهاره مدنی<sup>۳</sup>

- ۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه نوشیروانی بابل  
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان  
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: ۱۳۹۲/۴/۲۱، پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱)

### چکیده

در این مطالعه به بررسی اثر نوع خاک تکیه‌گاهی و فاصله تا ساختمان مجاور بر مشخصات دینامیکی (فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی) یک ساختمان پرداخته شده و برای انجام این کار، معادلات حاکم بر حرکت دو ساختمان که در مجاورت یکدیگر قرار دارند و بر حرکت دینامیکی هم تأثیر گذارند، بسط داده شده است. برای مدلسازی اثر خاک، از فنرها و میراگرهای متمرکز در تراز پی استفاده شد و در پایان نیز با بررسی یک ساختمان واقعی، مشخصات دینامیکی آن در حالت بدون مجاورت و با مجاورت محاسبه و مقایسه شده است. این مشخصات در مورد ساختمان مزبور از قبل به روش ثبت ارتعاشات اجباری یا محیطی موجود بوده و در دسترس است. از مقایسه نتایج تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل دینامیکی پیشنهاد شده می‌تواند مقادیر مشخصه دینامیکی سازه‌های مورد بررسی را با دقت خوبی پیش‌بینی نماید.

### کلمات کلیدی:

ساختمان‌های مجاور، فرکانس طبیعی، نسبت میرایی، اندرکنش سازه-سازه-خاک-سازه

Please site this article using:

Forooghi, H., Behnamfar, F., and Madani, B., 2016. "Case Study for Evaluation of Dynamic Characteristics of Adjacent Buildings". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), pp. 291-299.

DOI: 10.22060/ceej.2016.604

URL: [http://ceej.aut.ac.ir/article\\_604.html](http://ceej.aut.ac.ir/article_604.html)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

E-mail: [farhad@cc.iut.ac.ir](mailto:farhad@cc.iut.ac.ir) نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات:



## ۱- مقدمه

امروزه پس از تحقیقات نظری، آزمایشگاهی و محلی فراوان، این مطلب روشن است که پاسخ دینامیکی سیستم‌های سازه‌ای هنگام اندرکنش با سازه‌های مجاور، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. حتی پاسخ دینامیکی پی‌های مستقل یا پی‌های متصل مجاور در یک سازه (به تنهایی) نیز از طریق خاک بین این پی‌ها به صورت همبسته در می‌آید و در واقع پاسخ‌ها متأثر از یکدیگر هستند. این پدیده اثر متقابل که تنها در ۳۰ سال اخیر مورد بررسی قرار گرفته است و عموماً آن را در حوزه اندرکنش خاک-سازه قرار می‌دهند، مسئله‌ای فراتر از اندرکنش سازه و خاک (SSI) است.

محاسبه اندرکنش دینامیکی بین سازه‌های مجاور، به پاسخ مسئله اندرکنش پی-خاک و مسئله همبستگی پی‌ها (از طریق محیط نگهدارنده آن‌ها) احتیاج دارد. حل هر یک از این مسائل با کاربرد فرمول‌های تحلیلی دشوار (که معمولاً به هندسه و بارگذاری پی بستگی دارد) یا روش‌های عددی (معمولاً روش اجزای محدود و یا روش اجزای مرزی) برای شکل‌های پیچیده‌تر و یا با استفاده از مدل‌های تقریبی مؤلفه متمرکز به دست می‌آید. این مدل‌ها را با وجود تقریبی بودن آن‌ها، می‌توان به دلیل سادگی آن‌ها جایگزین روش‌های عددی (که محاسبات زیادی دارند) و یا فرمول‌های تحلیلی پیچیده کرد.

در رابطه با اندرکنش خاک-سازه، باید تأثیر خاک بر سازه‌ها را در حالت مجاورت و بدون مجاورت بررسی نمود و نتیجه‌گیری کرد که مهمترین تأثیر اندرکنش خاک-سازه در حالت سازه منفرد، افزایش زمان تناوب طبیعی سازه نوسان‌کننده است. همچنین افزایش بیشینه تغییر مکان طبقه بالای دو ساختمان مجاور بر اثر درنظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه بررسی شده است [۱]. میرطاهری در تحقیقی دیگر به بررسی تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر ساختمان‌های مجاور پرداخت و نتیجه‌گیری کرد که میزان افزایش پاسخ ناشی از درنظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، به فاصله بین دو ساختمان بستگی دارد. درصد افزایش زمان تناوب سازه برای یک ساختمان منفرد، در ۵ حالت اولیه نشان داده شده و نتیجه‌گیری شد که در حالت اول، افزایش زمان تناوب بیشتری مشاهده می‌شود و در حالت‌های بعدی این روند تقریباً ثابت است [۲]. همچنین کول در تحقیقی دیگر برای درنظر گرفتن تأثیر خاک زیر سازه در مشخصات دینامیکی کل سیستم، سختی خاک را ثابت فرض نمود و طبق توسعه معادله‌ای، تأثیر خاک بر زمان تناوب اساسی سیستم سازه-پی را ارائه نمود و نتیجه‌گیری کرد که با اصلاح مقدار زمان تناوب ساختمان طبق فرمول به دست آمده می‌توان اندرکنش خاک-سازه را به نحوی در ساختمان‌ها به حساب آورد [۳].

ابتدا همبستگی پی‌ها از طریق خاک توسط ویتمن<sup>۱</sup> به عنوان یک مسئله مهم معرفی شد [۴]. مکالدن و متیسسن<sup>۲</sup> یک فرمول ماتریسی را

برای یافتن پاسخ دینامیکی یک پی متکی بر یک محیط نیمه بی‌نهایت الاستیک و مجاور با یک پی که به طور یکنواخت بارگذاری شده است، ارائه دادند [۵]. واربرتن<sup>۳</sup> در تحقیقی دیگر برای بررسی اندرکنش متقابل سازه‌های مجاور، دو جرم با پی مربعی یکسان را بر روی یک محیط نیمه بی‌نهایت الاستیک مورد بررسی قرار داده است [۶].

روش اجزای مرزی حوزه زمان گوان و نوک<sup>۴</sup> [۷] و روش اجزای مرزی حوزه فرکانس کیان و بسکوس<sup>۵</sup> [۸] از روش‌های دیگر حل عددی است که می‌توان در زمینه اندرکنش متقابل از آن‌ها نام برد. یکی از تحقیقات مهم انجام‌شده در زمینه مدلسازی اندرکنش متقابل، استفاده از حل دقیق بر مبنای المان‌های مرزی در حوزه زمان برای دو فنداسیون مربعی مجاور و به دست آوردن ضرایب سختی و میرایی برای مدل کردن ارتباط بین پاسخ‌های دینامیکی هر دو فنداسیون است [۹].

ناصر خاکی برای درنظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک-سازه از فنرها و میراگرهای همبسته که مشخصات آن‌ها به مشخصات خاک وابسته است، استفاده نمود و مقایسه زمان تناوب سیستم سازه‌های مجاور را با زمان تناوب سازه‌های منفرد واقع بر خاک در چند نمودار انجام داد [۱۰]. در تحقیق حاضر، از توابع همبستگی مربوط به فنرها و میراگرها برای محاسبه اندرکنش دینامیکی پی‌های سطحی که بر روی محیط همگن، ایزوتروپیک و الاستیک خطی قرار دارند، استفاده شده است. با استفاده از این توابع همبستگی، می‌توان پاسخ دینامیکی تعدادی پی، تحت تأثیر نیروهای خارجی وارد بر یک پی را در حوزه زمان محاسبه نمود.

## ۲- معادله تعادل دینامیکی برای سازه‌های مجاور

یک سازه متکی بر پی نرم، رفتار متفاوتی را در برابر تحریکات زلزله نسبت به یک سازه مشابه واقع بر پی صلب دارد. این تفاوت در رفتار به آن علت است که وجود پی انعطاف‌پذیر در زیر سازه باعث می‌شود تا خاک و سازه بر روی هم اثر متقابل داشته باشند و پاسخ سازه تحت تأثیر خاک قرار گیرد. در حالتی که سازه روی تکیه‌گاه صلب قرار گرفته باشد، انرژی ناشی از زلزله باید در خود سازه و بین مرزهای بالایی و پایینی آن (سقف و پی صلب) مستهلک شود. اما در صورتی که مرز پایینی با پی انعطاف‌پذیر جایگزین شود، آنگاه انرژی ناشی از ارتعاش سازه می‌تواند در خاک منتشر شده و در آن محیط نیمه بی‌نهایت میرا گردد. در چنین حالتی باید معادله تعادل برای کل سیستم نوشته شود. وجود خاک باعث می‌شود تا ابعاد ماتریس‌های مشخص‌کننده سیستم اولیه (سازه به تنهایی) تغییر کند. نرم‌بودن خاک زیر سازه باعث ایجاد تغییر شکل‌های اضافی می‌شود که شامل یک تغییر مکان و یک دوران است. بنابراین در حالت سیستم اندرکنشی، ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی دارای عناصر وابسته به سازه و پی است. به دلیل وجود دو تغییر شکل گفته‌شده، سیستمی با  $n$  جرم، دارای  $n+2$  درجه آزادی است. جابه‌جایی‌های  $V_f$  و  $\psi_f$  (تغییر مکان

<sup>3</sup> Warburton<sup>4</sup> Guan and Novak<sup>5</sup> Qian and Beskos<sup>1</sup> Whitman<sup>2</sup> Maccalden and Matthiesen

پی و تغییر مکان افقی طبقه  $i$  ام است.

**(ب) برش هر یک از سازه‌ها از محل پی:** با نوشتن معادله

تعداد در تراز کف پی هر یک از سازه‌ها، رابطه‌های (۲) و (۳) برای سازه‌های  $n$  و  $m$  طبقه حاصل می‌شود:

$$\sum m_i (\ddot{v}_g + \ddot{v}_f + \ddot{v}_i + h_i \ddot{\psi}_f) + m_f (\ddot{v}_g + \ddot{v}_f) + P_{f_1} = 0 \quad (2)$$

$$\sum m_i (\ddot{v}_g + \ddot{v}_f + \ddot{v}_i + h_i \ddot{\psi}_f) + m_f (\ddot{v}_g + \ddot{v}_f) + P_{f_2} = 0 \quad (3)$$

$P_{f_1}$  و  $P_{f_2}$  در این روابط بیانگر نیروهای افقی اندرکنشی سازه‌های ۱ و ۲ هستند. همچنین  $m_i$  معرف جرم طبقه  $i$  ام و  $m_f$  معرف جرم فنداسیون است.

**(ج) تعادل لنگری هر یک از سازه‌ها حول مرکز سطح پی:**

نوشتن معادله تعادل دورانی سازه‌های ۱ و ۲ در نهایت تبدیل به رابطه‌های (۴) و (۵) خواهد شد:

$$\sum_{i=1}^n m_i (\ddot{v}_g + \ddot{v}_f + \ddot{v}_i + h_i \ddot{\psi}_f) h_i + \sum_{i=1}^n I_i \ddot{\psi}_f + M_{f_1} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m m_i (\ddot{v}_g + \ddot{v}_f + \ddot{v}_i + h_i \ddot{\psi}_f) h_i + \sum_{i=1}^m I_i \ddot{\psi}_f + M_{f_2} = 0 \quad (5)$$

در روابط فوق،  $M_{f_1}$  و  $M_{f_2}$  لنگر خمشی اندرکنشی سازه‌های ۱ و ۲ و  $I_i$  ممان اینرسی دورانی طبقه  $i$  ام است.

مشاهده می‌شود که برای یک سیستم با  $n+m$  درجه آزادی با اثرات خاک، یک دستگاه معادلات شامل  $n+m+4$  معادله و  $n+m+8$  مجهول حاصل می‌شود. باید چهار مجهول اضافی ( $M_{f_1}$ ،  $P_{f_1}$  و  $P_{f_2}$ ،  $M_{f_2}$ ) را به نحوی به سایر تغییر مکان‌های مجهول ربط داد تا دستگاه به  $n+m+4$  معادله و  $n+m+4$  مجهول تبدیل شده و قابل حل باشد. چهار مجهول اضافی با استفاده از رابطه (۶) به جابجایی و دوران پی‌ها مربوط می‌شوند.

و دوران پی) دو درجه آزادی اضافه شده هستند. اگر دو سازه مجاور هم را در نظر بگیریم که از طریق خاک زیر با یکدیگر ارتباط دارند، در این حالت فرض بر آن است که انتقال انرژی بین دو سازه در هنگام وقوع زلزله تنها در اثر انتقال از طریق خاک و نه ضربه صورت می‌گیرد. در این قسمت معادله تعادل سازه‌های مجاور با در نظر گرفتن اندرکنش متقابل بررسی شده است. می‌توان فرمولاسیون قابل استفاده برای یک سیستم اندرکنشی تکی را با ایجاد تغییراتی در ماتریس‌ها، برای سیستم‌های چندتایی به کار برد. همبستگی از طریق ضرایب سختی و میرایی انجام می‌شود. بنابراین ماتریس‌های سختی و میرایی باید هم شامل سختی و میرایی سیستم‌های مستقل و هم دارای جملات همبسته مربوط به سیستم‌های مختلف (که به صورت عبارات غیرقطری ظاهر می‌شود) باشند.

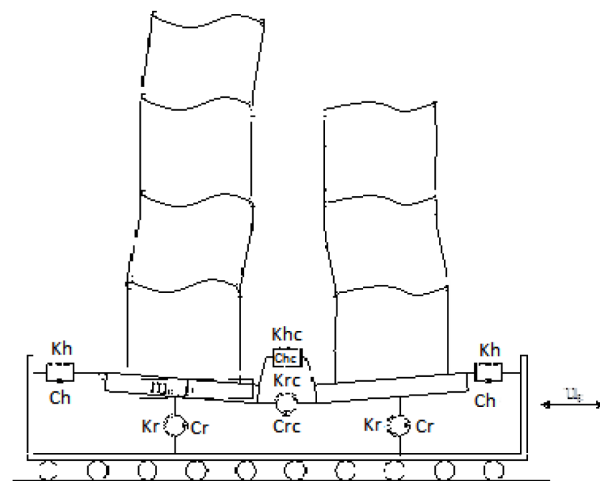
به منظور به دست آوردن معادله تعادل برای سازه‌های مجاوری که روی بستر انعطاف‌پذیر قرار دارند، دو سازه با  $n$  و  $m$  درجه آزاد مطابق شکل (۱) فرض شده است. معادلات تعادل برای هر سازه به صورت جداگانه نوشته شده و در نهایت روابط ترکیب خواهند شد. به منظور نوشتن معادله تعادل دو سازه مجاور، سه دسته معادلات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

**الف) تعادل افقی هر یک از طبقات:** با نوشتن رابطه تعادل در

تراز هر یک از طبقات، رابطه (۱) حاصل می‌شود:

$$\sum F_{x_i} = 0 \rightarrow m_i (\ddot{v}_g + \ddot{v}_f + \ddot{v}_i + h_i \ddot{\psi}_f) + c_i (\dot{v}_i - \dot{v}_{i-1}) - c_{i+1} (\dot{v}_{i+1} - \dot{v}_i) + k_i (v_i - v_{i-1}) - k_{i+1} (v_{i+1} - v_i) = 0 \quad (1)$$

رابطه (۱) برای سازه اول شامل  $n$  معادله تعادل است و برای سازه دوم  $m$  معادله تعادل را شامل می‌شود. در این رابطه  $\ddot{v}_g$ ،  $\ddot{v}_f$ ،  $\ddot{\psi}_f$  و  $v_i$  به ترتیب معرف شتاب زلزله، شتاب حرکت فنداسیون، شتاب دورانی



شکل (۱): سازه‌های  $n$  و  $m$  طبقه مجاور یکدیگر

سختی در رابطه (۶) تحت تأثیر پی‌های مجاور قرار نمی‌گیرد (به جز یک استثناء که در مورد حرکت دورانی وجود دارد).

(ج) نیروهای همبستگی در یک پی، مدتی بعد از جابه‌جایی در پی مجاورش به وجود می‌آید و این تأخیر زمانی، ارتباط مستقیمی با سرعت انتشار موج در محیط دارد.

توابع همبستگی برای پی‌های مجاور به فاصله بین پی‌ها و همچنین به اندازه پی نیز بستگی دارد. ضرایب همبستگی سختی و میرایی برای هر یک از درجات آزادی، در جدول (۱) مشخص شده است. این توابع همبسته از راه یک روند تکراری و با انتگرال‌گیری مستقیم به دست آمده‌اند. در این صورت، در یک سیستم متشکل از دو پی که تنها یکی از پی‌ها بارگذاری شده است، هر دو پی دارای واکنش بوده و این واکنش را می‌توان محاسبه نمود. عناصر غیرقطری ماتریس‌های سختی و میرایی (عبارات همبسته) طوری تنظیم شده‌اند که واکنش پی بارگذاری شده و پی مجاور تقریباً با حل دقیق یکی شوند. در جدول (۲) توابع همبسته سختی و میرایی برای دو پی خلاصه شده است.

در جدول‌های (۱) و (۲)،  $V$  ضریب پواسون،  $G$  مدول برشی و  $V_S$  سرعت انتشار موج برشی در خاک هستند. همچنین مؤلفه‌های  $a$  و  $d$  به ترتیب نصف بعد پی و فاصله دو سازه مجاور را مشخص می‌کنند. توابع همبستگی  $\psi$  و  $\Gamma$  نیز طبق روابط موجود در جدول (۲) به فاصله دو پی مجاور و ابعاد پی وابسته است.

#### ۴- معرفی سازه مورد بررسی: ساختمان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، اضافه‌شدن خاک به سیستم سبب

جدول (۱): ضرایب همبستگی برای اندرکنش پی-خاک-پی [۹]

میرایی	سختی	
$\psi_3 \times \frac{G a^2}{V_S (1-V)}$	$\Gamma_3 \times \frac{G a}{1-V}$	حرکت عمودی
$\psi_1 \times \frac{G a^2}{V_S (2-V)}$	$\Gamma_1 \times \frac{G a}{1-V}$	حرکت افقی
$\psi_{\phi_2} \times \frac{G a^4}{V_S (1-V)}$	$\Gamma_{\phi_2} \times \frac{G a^3}{1-V}$	حرکت چرخشی
$\psi_{\phi_3} \times \frac{G a^4}{V_S}$	$\Gamma_{\phi_3} \times G a^3$	حرکت پیچشی

جدول (۲): توابع همبستگی برای اندرکنش پی-خاک-پی [۹]

میرایی ( $\psi$ )	سختی ( $\Gamma$ )	
۸/۵۰۴	$۱/۶۱۴ \times ۱۰^{-۱/۱۶۷۲۵}(a/a_0)$	حرکت عمودی
۱۳/۲۸۷۵	$۳/۷۵۶ \times ۱۰^{-۱/۱۸۹۹۵}(a/a_0)$	حرکت افقی
$۷/۳۸۲۳ - ۶/۷۷۵ \times \log(d/a)$	$- (۰/۰۴۲۳۴ - ۰/۲۳۹۶ \times \log(d/a))$	حرکت چرخشی
$۴/۴۴۲۹ - ۲/۹۱۲۵ \times \log(d/a)$	۰/۰۵۹۳۱	حرکت پیچشی

$$\begin{Bmatrix} P_{f_1} \\ M_{f_1} \\ P_{f_2} \\ M_{f_2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{XX_1} & 0 & K_{X_{c(1,2)}} & 0 \\ 0 & K_{\psi\psi_1} & 0 & K_{\psi_{c(1,2)}} \\ K_{X_{c(1,2)}} & 0 & K_{XX_2} & 0 \\ 0 & K_{\psi_{c(2,1)}} & 0 & K_{\psi\psi_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{f_1} \\ \psi_{f_1} \\ V_{f_2} \\ \psi_{f_2} \end{Bmatrix} \quad (۶)$$

$$+ \begin{bmatrix} C_{XX_1} & 0 & C_{X_{c(1,2)}} & 0 \\ 0 & C_{\psi\psi_1} & 0 & C_{\psi_{c(1,2)}} \\ C_{X_{c(1,2)}} & 0 & C_{XX_2} & 0 \\ 0 & C_{\psi_{c(2,1)}} & 0 & C_{\psi\psi_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{V}_{f_1} \\ \dot{\psi}_{f_1} \\ \dot{V}_{f_2} \\ \dot{\psi}_{f_2} \end{Bmatrix}$$

در رابطه فوق  $K_{XX_i}$  سختی افقی،  $K_{\psi\psi_i}$  سختی دورانی،  $C_{XX_i}$  میرایی افقی و  $C_{\psi\psi_i}$  میرایی دورانی برای سازه  $i$ ام است. همچنین سختی و میرایی همبسته که نشان‌دهنده اثر متقابل دو سازه مجاور است با مؤلفه‌های  $C_{X_{c(1,2)}}$ ،  $K_{\psi_{c(1,2)}}$ ،  $K_{X_{c(1,2)}}$  و  $C_{\psi_{c(1,2)}}$  نشان داده شده که به ترتیب مربوط به سختی و میرایی در جهات افقی و دورانی است. از بسط رابطه (۶)، رابطه (۷) نتیجه‌گیری می‌شود:

$$\begin{aligned} P_{f_1} &= K_{XX_1} V_{f_1} + K_{X_{c(1,2)}} V_{f_2} + C_{XX_1} \dot{V}_{f_1} + C_{X_{c(1,2)}} \dot{V}_{f_2} \\ M_{f_1} &= K_{\psi\psi_1} \psi_{f_1} + K_{\psi_{c(1,2)}} \psi_{f_2} + C_{\psi\psi_1} \dot{\psi}_{f_1} + C_{\psi_{c(1,2)}} \dot{\psi}_{f_2} \\ P_{f_2} &= K_{XX_2} V_{f_2} + K_{X_{c(1,2)}} V_{f_1} + C_{XX_2} \dot{V}_{f_2} + C_{X_{c(2,1)}} \dot{V}_{f_1} \\ M_{f_2} &= K_{\psi_{c(2,1)}} \psi_{f_1} + K_{\psi\psi_2} \psi_{f_2} + C_{\psi_{c(2,1)}} \dot{\psi}_{f_1} + C_{\psi\psi_2} \dot{\psi}_{f_2} \end{aligned} \quad (۷)$$

اگر این چهار رابطه را در دستگاه معادلات موجود جایگذاری کنیم، دستگاهی قابل حل حاصل می‌شود که از حل آن مجهولات یعنی  $V_i$ ها (به تعداد  $n+m$  عدد) و  $V_{f_2}$ ،  $\psi_{f_1}$ ،  $\psi_{f_2}$  و  $V_{f_1}$  به دست خواهد آمد.

#### ۳- مدل‌سازی اندرکنش متقابل

پاسخ یک پی در هر زمان از تحلیل، نتیجه کاربرد دو نیرو است که یکی نیروهای اندرکنشی خاک-سازه و دیگری نیروهای همبستگی بین پی‌ها (پاسخ پی‌های مجاور) است. همبستگی پی‌ها از طریق انتشار امواج توسط یک روش تقریبی بررسی می‌گردد [۹]. در این روش، توابع همبسته غیروابسته به فرکانس برای هر درجه آزادی معرفی شده است و در نهایت، فنرها و میراگرهایی که درجات آزادی مختلف پی‌ها را به هم ربط می‌دهند، نتیجه می‌شوند.

در مورد این مدل همبسته سه فرض ساده‌کننده در نظر گرفته می‌شود:

(الف) همبستگی پی‌ها برای هر حالت ارتعاشی، مستقل از سایر درجات آزادی است؛ یعنی حرکات عمودی در یک پی، تنها می‌تواند پاسخ‌های عمودی در پی‌های مجاور را تولید کند و یا این‌که ورودی دورانی فقط قادر است تا پاسخ دورانی را ایجاد نماید.

(ب) سختی استاتیکی مستقیم هر پی (جملات قطری ماتریس

### ۵-۱-۲- تحلیل سه بعدی

به منظور تحلیل دینامیکی سه بعدی ساختمان، فرضیات زیر مورد استفاده قرار گرفت:

- از اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است.
- اتصال پای ستون‌ها به پی صلب است.
- کف طبقات صلب فرض شده است.
- جرم‌ها در مرکز هندسی طبقات متمرکز شده‌اند.
- تحلیل قاب به صورت سه بعدی و با فرض رفتار خطی مصالح انجام شده است.

مقدار میرایی در این حالت برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده و در نتیجه این تحلیل، مشخصات دینامیکی ساختمان تا حالت چهارم استخراج گردیده است [۱۱].

### ۵-۱-۳- تحلیل اندرکنش

در این قسمت طبق برنامه رایانه‌ای نوشته شده بر مبنای رابطه‌های (۱) تا (۷) علاوه بر تحلیل پی صلب، تحلیل برای دو تپ خاک (نوع II و III) با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک-سازه نیز انجام گرفته است. شکل استاندارد مسئله مقدار ویژه  $(HY=\lambda Y)$  در حل مسائل مهندسی متنوعی به کار می‌رود و به همین دلیل مورد توجه محققین زیادی بوده و برنامه‌های رایانه‌ای زیادی برای حل عددی آن وجود دارد. اگر مسئله مقدار ویژه دینامیک سازه به شکل استاندارد تبدیل شود، در این صورت می‌توان از برنامه‌های رایانه‌ای موجود برای حل آن استفاده نمود. با استفاده از معادلات تعادل دینامیکی سازه‌های مجاور، معادله مشخصه یک سیستم به صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود:

$$[M]\{\ddot{V}\} + [C]\{\dot{V}\} + [K]\{V\} = 0 \quad (8)$$

در حالات متداول از وجود میرایی در رابطه فوق صرف نظر شده و معادله مشخصه استاندارد حاصل می‌گردد. تأثیر میرایی در مسئله اندرکنش سازه و خاک بیشتر بوده و برای دقت بیشتر نباید از آن صرف نظر نمود. در این صورت، رابطه فوق را می‌توان در فضای حالت و به شکل بدیهی رابطه (۹) بیان نمود:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [-K] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{V} \\ \dot{V} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [K] \\ [K] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{V} \\ V \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (9)$$

به منظور سادگی، از ماتریس‌های  $[A]$  و  $[B]$  استفاده می‌شود و به صورت رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) تعریف می‌شوند:

$$[A] = \begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & -[K] \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} [C] & [K] \\ [K] & [0] \end{bmatrix} \quad (11)$$

بردار واکنش نیز به صورت رابطه (۱۲) نوشته می‌شود:

ایجاد تغییرات مهمی در خصوصیات دینامیکی سازه‌ها می‌شود. ساختمان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بنا شده در تهران به منظور دست‌یافتن به یک نتیجه عددی مورد بررسی قرار گرفته است. علت انتخاب این ساختمان آن است که مشخصات دینامیکی آن از قبل با آزمایش به دست آمده و می‌تواند با مدلسازی اندرکنشی کنترل شود [۱۱]. ساختمان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در سال ۱۳۷۸ در همسایگی ساختمان قدیمی قبلی آن در ۶ طبقه احداث شده است. طول این ساختمان در جهت شرقی-غربی ۲۳ متر و در جهت شمالی-جنوبی ۲۲/۶۵ متر است. ستون‌ها در جهت شرقی-غربی از یک‌دیگر ۵/۷۵ متر فاصله دارند و همچنین فاصله ستون‌ها در جهت شمالی-جنوبی ۳/۷۷۵ و ۷/۵۵ متر است [۱۱]. سازه از نوع فلزی بوده و در هر دو جهت دارای بادبند است. بارهای عمودی در ساختمان توسط قاب‌های فولادی و نیروهای جانبی توسط بادبندها تحمل می‌شوند. ستون‌های مورد استفاده در ساختمان از نوع مقاطع قوطی‌شکل هستند که از ورق‌های با ضخامت متفاوت ساخته شده‌اند. با افزایش ارتفاع از ضخامت ورق‌ها کاسته می‌شود. تیرها به شکل I و با استفاده از ورق ساخته شده‌اند و برای ساخت بادبندی‌ها از مقطع ناودانی به صورت دوتایی استفاده شده است. اتصال تیرها به ستون‌ها و همچنین اتصال بادبندها به تیرها و ستون‌ها، با استفاده از جوش اجرا شده و دیافراگم کف از نوع مرکب است. در این دیافراگم بر روی تیرهای فرعی قطعات برشگیر جوش داده شده و سپس بر روی این تیرهای فرعی، دال بتن آرمه به ضخامت ۷ سانتی‌متر اجرا شده است. وزن کلی هر طبقه به طور متوسط ۳۳۰ تن بوده که شامل وزن کف طبقه، دیوارها و ۲۰ درصد سربار کف طبقات می‌شود.

این ساختمان در راستای شرقی-غربی و متشکل از دو نیمه مشابه است که با درز انقطاع از یک‌دیگر جدا شده‌اند.

### ۵- تحلیل‌های عددی

#### ۵-۱- روش‌های به کار گرفته شده

ساختمان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله علاوه بر این که با برنامه رایانه‌ای تهیه شده در این تحقیق تحلیل شده، قبلاً تحت آزمایش ارتعاش اجباری و تحلیل سه بعدی اجزای محدود نیز قرار گرفته است [۱۱]. اطلاعات مربوط به آزمایش و تحلیل، استخراج شده و به منظور مقایسه با روش تحلیل رایانه‌ای بکار گرفته شده در این تحقیق گفته شده است.

#### ۵-۱-۱- آزمایش ارتعاش اجباری

دستگاه لرزاننده به منظور انجام آزمایش ارتعاش اجباری در بالاترین نقطه ساختمان، یعنی پشت بام، نصب شد. این نکته باعث می‌شود تا تغییر مکان‌ها محسوس‌تر و نقاط قله نیز واضح‌تر باشد. در نتیجه این آزمایش، مشخصات دینامیکی سازه تا حالت سوم تعیین شد [۱۱].

۵-۲- نتایج تحلیل‌های عددی

تحلیل در دو قسمت مجزا انجام می‌شود. به این صورت که یک بار هر یک از سازه‌ها به تنهایی و برای دو حالت (واقع بر پی صلب و واقع بر پی انعطاف‌پذیر) تحلیل شده و اثر اندرکنش خاک-سازه بر روی هر یک از مؤلفه‌های دینامیکی بحث می‌شود. در قسمت دوم تحلیل با فرض این‌که ساختمان فوق در مجاورت ساختمان دیگری مشابه با خود قرار داشته باشد، تکرار شده و تأثیر مجاورت بر مشخصات دینامیکی سازه تعیین می‌شود. برای تعیین ماتریس  $[H]$  (در رابطه (۱۹))، سختی نسبی هر طبقه محاسبه شده و در ماتریس  $[K]$  قرار داده می‌شود. همچنین آن بخش از ماتریس  $[C]$  که مربوط به درجات آزادی سازه است، از نوع میرایی ریلی فرض می‌شود [۱۲]. دو نوع خاک برای تکیه‌گاه ساختمان، یک بار خاک نوع II با سرعت موج برشی ۶۰۰ متر بر ثانیه و دیگری

جدول (۳): مقایسه فرکانس‌های به دست آمده از روش‌های مختلف در جهت شرقی-غربی در حالت ساختمان منفرد (رادیان بر ثانیه)

شماره مود آزمایش	تحلیل سه بعدی (رابطه (۱۸))	پی انعطاف‌پذیر (رابطه (۱۸))	
		خاک نوع II	خاک نوع III
۱	۱۴/۵۱	۱۴/۲۷	۱۵/۵۷
۲	۳۳/۸۷	۴۳/۶۴	۴۳/۷۱
۳	۶۵/۴۷	۶۸/۲۳	۶۸/۲۳
۴	-	۸۹/۰۰	۸۹/۹۰
۵	-	۱۱۱	۱۱۱/۲۴
۶	-	۱۳۰	۱۳۰/۷۵
انتقال پی	-	-	۱۱/۷۳
دوران پی	-	-	۰/۸۷

جدول (۴): مقایسه فرکانس‌های به دست آمده از روش‌های مختلف در جهت شمالی-جنوبی در حالت ساختمان منفرد (رادیان بر ثانیه)

شماره مود آزمایش	تحلیل سه بعدی (رابطه (۱۸))	پی انعطاف‌پذیر (رابطه (۱۸))	
		خاک نوع II	خاک نوع III
۱	۱۲/۳۸	۱۳/۷۲	۱۵/۱۰
۲	۳۱/۸۶	۳۷/۶۶	۳۷/۷۶
۳	۴۲/۶۶	۵۹/۱۵	۵۹/۱۶
۴	-	۸۰/۷۷	۸۰/۷۲
۵	-	۱۰۱	۱۰۱/۰۹
۶	-	۱۱۵	۱۱۵/۷۳
انتقال پی	-	-	۱۱/۶۲
دوران پی	-	-	۰/۸۷

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} \dot{V} \\ V \end{Bmatrix} \quad (12)$$

با جایگذاری رابطه‌های (۱۰) تا (۱۲) در رابطه (۹)، رابطه (۱۳) حاصل خواهد شد:

$$[A]\{y\} + [B]\{y\} = \{0\} \quad (13)$$

برای رابطه فوق، می‌توان پاسخی به شکل رابطه (۱۴) در نظر گرفت:

$$\{y\} = e^{\mu t} \{Y\} \quad (14)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۱۴)، رابطه (۱۵) حاصل می‌شود:

$$\{\dot{y}\} = \mu e^{\mu t} \{Y\} = \mu \{y\} \quad (15)$$

با جایگذاری رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) در رابطه (۱۳) خواهیم داشت:

$$\mu[A]\{y\} + [B]\{y\} = \{0\} \quad (16)$$

با تعریف ماتریس  $[H]$  طبق رابطه (۱۷) و جایگذاری آن در رابطه

(۱۶)، رابطه (۱۸) حاصل خواهد شد:

$$-[A]^{-1}[B] = [H] \quad (17)$$

$$\mu \{y\} = [H] \{y\} \quad (18)$$

رابطه (۱۸) شکل استاندارد معادله مشخصه برای مسئله سازه-

خاک-سازه است. مقدار ماتریس  $[H]$  به صورت رابطه (۱۹) محاسبه شده است:

$$[H] = -[A]^{-1}[B] = -\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & -[K] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [C] & [K] \\ [K] & [0] \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} [M]^{-1} & [0] \\ [0] & -[K]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [C] & [K] \\ [K] & [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[M]^{-1}[C] & -[M]^{-1}[K] \\ [I] & [0] \end{bmatrix} \quad (19)$$

ماتریس  $[H]$  نشان داده شده در رابطه (۱۹) یک ماتریس مثبت

معین نیست. بنابراین مقادیر و بردارهای ویژه آن اعداد مختلطی هستند که دو به دو مزدوج یکدیگرند.

مقدار ویژه مختلط طبق رابطه (۲۰) به اجزای حقیقی و موهومی آن

تجزیه می‌شود:

$$\mu = \text{Re}(\mu) + i \text{Im}(\mu) \quad (20)$$

که در آن،  $\text{Re}(\mu)$  و  $\text{Im}(\mu)$  به ترتیب اجزا حقیقی و موهومی عدد مختلط را نشان می‌دهند. سپس با توجه به رابطه (۱۴) می‌توان نوشت:

$$\omega_j = |\text{Im}(\mu_j)| \quad (21)$$

$$\xi_j = \frac{|\text{Re}(\mu_j)|}{\sqrt{\text{Re}^2(\mu_j) + \text{Im}^2(\mu_j)}}$$

که  $\mu_j$  در آن،  $\zeta_j$  امین ریشه رابطه (۱۸) است.

از آزمایش، از مقادیر به دست آمده از تحلیل بیشتر بوده و این نشانگر آن است که سختی واقعی سازه بیشتر از سختی مدل رایانه‌ای بوده و این مسئله به بیشتر بودن سختی دیوارها در این راستا مربوط می‌شود. از آنجایی که در ماشین‌های لرزاننده، نیروی وارده به سازه با مجذور فرکانس متناسب است، بنابراین نیروی وارده به سازه در فرکانس‌های پایین، کم و احتمال خطا بیشتر است.

اعداد دو ستون آخر در جدول‌های (۳) و (۴) نشان‌دهنده تأثیر اندک اندرکنش سازه با خاک بر فرکانس‌های طبیعی غیراندرکنشی است. از سویی دیگر، با در نظر گرفتن اندرکنش، دو حالت ارتعاشی به سیستم اضافه می‌شود که هر دو در محدوده فرکانس‌های پایین بوده و جایگزین حالت‌های اول و دوم سازه با پای صلب می‌شوند. از مقایسه فرکانس‌های حاصله با نتایج ستون آزمایش، می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که خاک محل به خاک نوع II نزدیکتر است.

مقادیر به دست آمده برای میرایی در جدول‌های (۵) و (۶) با هم مقایسه شده‌اند.

از مقایسه مقادیر میرایی، ملاحظه می‌شود که میرایی سازه در هر حالت نسبت به حالت‌های دیگر و در هر جهت نسبت به جهت دیگر متغیر است و همان‌گونه که انتظار نیز می‌رفت، سهم میرایی خاک در انتقال توأم سازه و پی بیش از میرایی سازه‌ای است. بررسی جدول‌ها نشان می‌دهد که با عوض شدن نوع خاک، تنها میرایی حالت اول سازه و میرایی ناشی از انتقال پی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و نوع خاک بر میرایی سایر حالت‌ها اثری ندارد.

### ۵-۲-۲- تحلیل سازه‌های مجاور

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، دو سازه مجاور از طریق خاک زیرشان با یکدیگر در ارتباط بوده و با ضرایب سختی و میرایی به یکدیگر وابسته هستند. این ضرایب همبستگی که به اندازه پی و فاصله بین پی‌های مجاور بستگی دارند، با استفاده از روابط موجود در جدول‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند. در بخش (۵-۲-۱) و پس از تحلیل سازه روی دو نوع خاک با سختی مختلف، نتیجه‌گیری شد که خاک زیر سازه به خاک نوع II نزدیکتر است. به همین دلیل ضرایب همبستگی سختی و میرایی برای خاک نوع II و برای دو نسبت فاصله  $d/a=2$  و  $d/a=5$  محاسبه شده و سپس با فرض این‌که سازه در جهت شرقی-غربی در مجاورت یک سازه مشابه خود واقع است، تحلیل برای سیستم همبسته انجام می‌شود. همچنین برای مشاهده تأثیر فاصله بسیار نزدیک بر روی مشخصات سازه، مراحل فوق برای نسبت فاصله  $d/a=0.25$  نیز تکرار شده است. در جدول‌های (۷) و (۸) نتایج حاصل از تحلیل سیستم همبسته با نتایج تحلیل پی صلب و تحلیل سیستم خاک-سازه مقایسه شده است.

اعداد جدول‌های (۷) و (۸) نشان‌دهنده تأثیر ناچیز مجاورت بر فرکانس‌های طبیعی و نسبت‌های میرایی سیستم به جز مقادیر مربوط به درجه آزادی انتقالی پی، حداقل با مدلسازی استفاده‌شده در این تحقیق

خاک نوع III با سرعت موج برشی ۳۰۰ متر بر ثانیه فرض می‌گردد. چگالی خاک ۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است.

### ۵-۲-۱- تحلیل سازه‌های منفرد

در این حالت یک بار سازه‌ای منفرد متکی بر پی صلب و بار دیگر در اندرکنش با خاک در نظر گرفته می‌شود. در جداول‌های (۳) و (۴) مقادیر به دست آمده برای فرکانس‌های طبیعی ساختمان پژوهشگاه (در حالت منفرد) حاصل از تحلیل اندرکنش و دو حالت دیگر (آزمایش و تحلیل سه بعدی) خلاصه شده است.

در جهت شرقی-غربی مقادیر حاصل از آزمایش، تحلیل سه بعدی و رابطه (۱۸) دارای تطابق خوبی هستند. مقایسه فرکانس‌های طبیعی در جهت شمالی-جنوبی نشان می‌دهد که مقادیر فرکانس‌های به دست آمده

جدول (۵): مقایسه نسبت میرایی حاصل از روش‌های مختلف در جهت شرقی-غربی در حالت ساختمان منفرد (درصد)

شماره مود	آزمایش	تحلیل سه بعدی	پی انعطاف‌پذیر (رابطه ۱۸)	
			پی صلب (رابطه ۱۸)	خاک نوع II
۱	۴/۱	۵	۵	۴/۹
۲	۴/۹	۵	۳/۲	۳/۲
۳	۵/۱	۵	۳/۶	۳/۶
۴	-	۵	۴/۳	۴/۳
۵	-	۵	۵	۵
۶	-	۵	۵/۷	۵/۷
انتقال پی	-	-	-	۶/۱
دوران پی	-	-	-	۱/۵

جدول (۶): مقایسه نسبت میرایی حاصل از روش‌های مختلف در جهت شمالی-جنوبی در حالت ساختمان منفرد (درصد)

شماره مود	آزمایش	تحلیل سه بعدی	پی انعطاف‌پذیر (رابطه ۱۸)	
			پی صلب (رابطه ۱۸)	خاک نوع II
۱	۳	۵	۵	۴/۹
۲	۳/۱	۵	۳/۲	۳/۳
۳	۳/۱	۵	۳/۶	۳/۶
۴	-	۵	۴/۳	۴/۳
۵	-	۵	۵	۵
۶	-	۵	۵/۶	۵/۶
انتقال پی	-	-	-	۶/۱
دوران پی	-	-	-	۱/۵

است. در قسمت دوم تحلیل با فرض این‌که ساختمان فوق در راستای شرقی-غربی و در مجاورت ساختمان دیگری مشابه با خود قرار داشته باشد، تکرار شده و تأثیر مجاورت بر مشخصات دینامیکی سازه‌ها تعیین گردیده است.

این تحلیل‌ها تأیید می‌نماید که وجود خاک انعطاف‌پذیر در زیر سازه باعث می‌شود تا فرکانس حالت اصلی سازه کاهش یابد. در همه موارد مشاهده می‌شود که تأثیر اندرکنش بر فرکانس در حالت اول بیشتر مشهود است و با بالا رفتن شماره حالت تأثیر انعطاف‌پذیری خاک بر فرکانس سازه کم می‌شود. در ارتباط با مقادیر فرکانس دو سازه مجاور نیز مشاهده می‌شود که مجاورت دو سازه تنها بر فرکانس طبیعی مربوط به درجه آزادی انتقالی پی تأثیر ملموسی دارد.

بررسی جدول‌ها نشان داد که با عوض شدن نوع خاک، تنها میرایی حالت اول سازه و میرایی ناشی از حرکت افقی پی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و نوع خاک بر میرایی سایر حالت‌ها اثر چندانی ندارد.

#### ۷- مراجع

- [1] Rahman, A. M.; Carr, A. J. and Moss, P. J.; "Seismic Pounding of a Case of Adjacent Multiple-Storey Buildings of Differing Total Heights Considering Soil Flexibility Effects," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 40-59, 2001.
- [2] Yahyai, M.; Mirtaheri, M.; Mahoutian, M.; Saeidi Daryan, A. and Assareh, M. A.; "Soil Structure Interaction between two Adjacent Buildings under Earthquake Load," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 1, No. 2, pp. 121-125, 2008.
- [3] Cole, G.; Chow, N. and Dhakal, R.; "Building and Bridge Pounding Damage Observed in the 2011 Christchurch Earthquake," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 44, No. 4, pp. 334-341, 2011.
- [4] Whitman, R. V.; "Soil-Structure Interaction," *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, The M.I.T. Press, Cambridge, 1970.
- [5] Maccalden, P. B. and Matthiesen, R. B.; "Coupled Response of two Foundations," *5<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Rome, Italy, 1973.
- [6] Warburton, G. B.; "Soil-Structure Interaction for Tower Structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, pp. 535-556, 1978.
- [7] Guan, F. and Novak, M.; "Transient Response of a Group of Rigid Strip Surface Foundations," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,

(استفاده از فنرهای متمرکز) است. در همه موارد، درجه آزادی انتقالی پی باعث تغییر حالت دوم سیستم شده است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، از توابع همبستگی مربوط به فنرها و میراگرها برای محاسبه اندرکنش دینامیکی پی‌های سطحی (که روی محیط همگن، ایزوتروپیک و الاستیک خطی قرار دارند) استفاده شده است. سپس یک ساختمان نمونه با برنامه رایانه‌ای تهیه‌شده در این تحقیق به صورت یک ساختمان برشی تحلیل شده و نتایج آن با آزمایش ارتعاش اجباری و تحلیل دقیق اجزای محدود مقایسه گردیده است. یک بار سازه به تنهایی و برای دو حالت پی صلب و پی انعطاف‌پذیر تحلیل شده و اثر اندرکنش خاک-سازه بر روی هر یک از مؤلفه‌های دینامیکی بحث شده

جدول (۷): مقادیر فرکانس برای جهت شرقی-غربی ساختمان پژوهشگاه (رادیان بر ثانیه)

شماره مود	رابطه (۱۸) (پی صلب)	سیستم سازه-خاک-سازه (رابطه (۱۸))		
		$d/a=5$	$d/a=2$	$d/a=0.25$
۱	۱۴/۲۷	۱۴/۱۳	۱۴/۱۳	۱۴/۰۴
۲	۴۳/۶۴	۴۳/۶۹	۴۳/۶۹	۴۳/۷۵
۳	۶۸/۲۳	۶۸/۲۲	۶۸/۲۲	۶۸/۲۳
۴	۸۹	۸۹/۹۰	۸۹/۸۹	۸۹/۹۰
۵	۱۱۱	۱۱۱/۲۴	۱۱۱/۲۴	۱۱۱/۲۴
۶	۱۳۰	۱۳۰/۷۵	۱۳۰/۷۵	۱۳۰/۷۵
انتقال پی	-	۲۱/۵۳	۲۰/۱۱	۲۵/۵۱
دوران پی	-	۱/۷۳	۱/۷۳	۱/۷۳

جدول (۸): مقادیر نسبت میرایی برای جهت شرقی-غربی ساختمان پژوهشگاه (درصد)

شماره مود	پی صلب (رابطه (۱۸))	سیستم سازه-خاک-سازه (رابطه (۱۸))		
		$d/a=5$	$d/a=2$	$d/a=0.25$
۱	۵	۴/۸	۵	۴/۹
۲	۳/۲	۳/۲	۳/۲	۳/۲
۳	۳/۶	۳/۷	۳/۷	۳/۶
۴	۴/۳	۴/۳	۴/۳	۴/۳
۵	۵	۵	۵	۵
۶	۵/۷	۵/۷	۵/۷	۵/۷
انتقال پی	-	۶/۵	۶/۷	۵/۹
دوران پی	-	۲	۱/۸	۱/۵



- H.; "Earthquake Induced Pounding between Adjacent Buildings Considering Soil-Structure Interaction," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 11, Issue 3, pp. 343–358, 2012.
- [11] Tio, M. and Sayyari, A.; "Forced Vibration Experiment on the New Structure," *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, 1998 (in Persian).
- [12] Chopra, A. K.; "Dynamics of Structures: A Primer," *Earthquake Engineering Research Institute*, 1980.
- Vol. 23, pp. 671–685, 1994.
- [8] Qian, J. and Beskos, D. E.; "Dynamic Interaction between 3D Rigid Surface Foundations and Comparison with the ATC-3 Provisions," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 24, pp. 419–437, 1995.
- [9] Mulliken, S. and Karabalis, L.; "Discrete Model for Dynamic Through the Soil Coupling of 3D Foundations and Structures," *EESD*, Vol. 27, pp. 687–710, 1998.
- [10] Naserkhaki, S.; Abdul Aziz, F. and Pourmohammad,