

پاسخ لرزه ای سازه های برشی متکی بر جداینده های R-LRB-P-F و FBI با درنظر گرفتن اثرات اندر کنش خاک و سازه

فرهاد عباس گندمکار، مریم دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز*

محمد مهدی سعاد پور، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان**

*تلفن: ۰۶۱۱-۳۳۴۲۲۶۲، نامبر: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۷۰۰، پست الکترونیکی: farhadgandomkar@hotmail.com

**تلفن: ۰۳۱۱-۳۹۱۳۸۰۹، نامبر: ۰۳۱۱-۳۹۱۲۷۰۰، پست الکترونیکی: mmehdi@cc.iut.ac.ir

چکیده

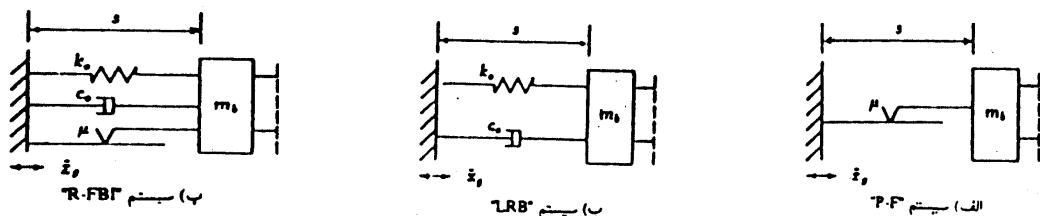
هدف از این تحقیق، مطالعه رفتار سازه های برشی ایزوله شده با درنظر گرفتن اثرات اندر کنش خاک و سازه، در مقابل بار زلزله می باشد. با توجه به مدل انتخابی خاک، سیستم جدا یشگر و سازه اصلی نوع برشی، معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر مدل مورد نظر در دو فاز لغزشی و غیر لغزشی توسعه داده شده است. این معادلات در حوزه زمان به سمتک روش عددی نیومارک حل شده و در مطالعه ای گستردگی تأثیر پارامترهای مختلف در رفتار سازه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحقیق که برای سه ساختمان یک، پنج و ده طبقه بدست آمده، مؤید این است که جداسازی لرزه ای ساختمانها نه تنها باعث کاهش شتاب طبقات و برش پایه می شود، بلکه پدیده اندر کنش خاک و سازه نیز اثرگذار بر این کاهش است. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده، این اثرگذاری برای جدا یشگرهای مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است.

کلید واژه ها: پاسخ لرزه ای، سازه برشی، جدا یشگر، اندر کنش خاک و سازه، جداسازی لرزه ای، سازه لغزشی.

۱- مقدمه

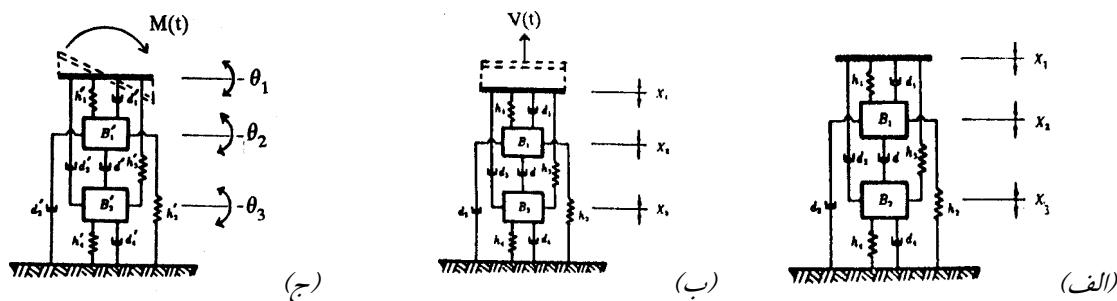
یکی از دستاوردهای نوین مهندسی زلزله، توانائی کاهش نیروی زلزله القائی از زمین به ساختمان، توسط جدا کردن ساختمان از پی آن است که تحت عنوان «جداسازی لرزه ای» مطرح می گردد. در دو دهه اخیر، تحقیقات وسیعی در خصوص بررسی رفتار وابداع انواع سیستمهای جدا یشگر و از جمله رفتار سازه های لغزشی که نوع خاصی از سیستم جدا یشگر است، توسط محققین مختلف انجام پذیرفته است [۱-۵]. سیستمهای جدا یشگر ارتعاشی عموماً از اجزاء اصطکاکی، الاستیکی و میراکننده تشکیل می شوند. با ترکیب مناسب این اجزاء شش نوع جدا یشگر با علامت اختصاری R-LRB، P-F، R-FBI، EDF، NZ و S-RF بوجود می آید که مطالعه حاضر بر روی سیستمهای LRB، P-F و FBI متمرکز شده است. مدل ریاضی جدا یشگرهای مذکور در شکل (۱) نمایش داده شده است [۳].

در سالهای اخیر مطالعه و تحقیق بر روی پاسخ سازه در مقابل زلزله با درنظر گرفتن اثرات اندر کنش خاک و سازه به طور گسترده توسط محققین انجام شده است. تحقیقات مزبوریانگراین واقعیت است که رفتار سازه در مقابل زلزله با در نظر گرفتن اثرات اندر کنش سازه و خاک، بارفتار سازه متکی بر خاک صلب متفاوت است [۶].



شکل ۱: مدل ریاضی جدایشگرهای مورد مطالعه [۳]

یکی از مدل‌های گسته خاک جهت بررسی تحلیلی پدیده اندر کنش خاک و سازه، در نظر گرفتن آن به صورت ترکیبی از جرم، فنر و میراکننده معادل در پی سازه (به صورت مستقل از تواتر خاک) می‌باشد. تاکنون مدل‌های مختلفی از این نوع پیشنهاد شده است. از جمله پن زین در سال ۱۹۹۰ ترکیب خاصی از دو جرم، چهار فنر و پنج میراکننده را جهت مدل کردن رفتار خاک ارائه نمود که در این تحقیق از مدل مذبور استفاده می‌شود (شکل ۲-الف). انتخاب چنین مدلی از خاک حل معادلات حاکم بر سیستم مورد مطالعه را در حوزه زمان امکان پذیر می‌سازد. مدل مذکور می‌تواند در چهار مود عمودی، افقی، دورانی و پیچشی حرکت خاک را نشان دهد [۷]. در این تحقیق فقط دو مود دارتعاش افقی و دورانی موردنظر است. شکل (۲-ب و ۲-ج) مدل پن زین را تحت اثر نیروهای وارد شده از طرف سازه یعنی برش پایه ($V(t)$) و لنگر پایه ($M(t)$) نمایش می‌دهد.

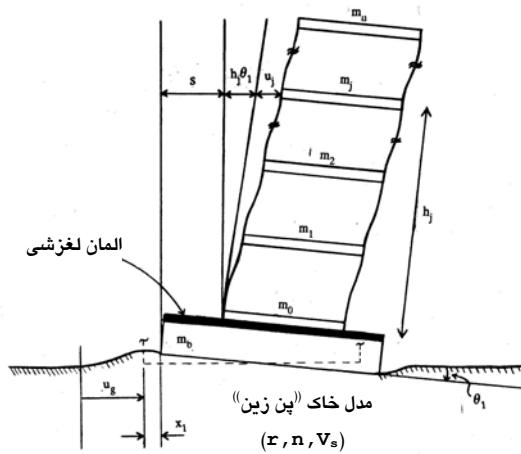


شکل ۲: مدل گسته خاک پیشنهادی توسط پن زین [۷]

در این تحقیق سیستم سازه مورد مطالعه از نوع برشی انتخاب شده است. در این مرحله با شناخت پارامترهای مدل خاک، سازه و جدایشگر، توسعه معادلات حاکم بر سیستم مورد نظر امکان پذیر است.

۲ - معادلات حاکم بر سیستم مورد مطالعه

سیستم لغزشی مورد مطالعه در این تحقیق در شکل (۳) نمایش داده شده است. در ادامه معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر سیستم در دوفاز لغزشی و غیرلغزشی نوشته شده و سپس شرایط تبدیل فاز آنها به یکدیگر بیان می‌شود.



شکل ۳: سازه بر پایه جدایش شده متکی بر بستر نرم

۱-۲- معادلات تعادل دینامیکی در فاز لغزشی

بادرنظر گرفتن شکل (۳) معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر سازه به صورت زیر بیان می شود

$$[m]\{\ddot{u}\} + [m]\{r\}\ddot{s} + [m]\{r\}\ddot{x}_1 + [m]\{h\}\ddot{\theta}_1 + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = -[m]\{r\}\ddot{u}_g \quad (1)$$

در رابطه فوق $[c]$ ، $[k]$ و $[m]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، استهلاک و سختی سازه و نیز $\{u\}$ و $\{\ddot{u}\}$ به ترتیب بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب سازه است. همچنین $\{r\}$ بردار شعاع و $\{h\}$ بردار ارتفاع طبقات بوده و x_1 تغییر مکان افقی پایه، θ_1 دوران پایه، s تغییر مکان لغزشی و u_g تغییر مکان افقی زمین است.

معادلات دینامیکی حاکم بر خاک در دو مود ارتعاش افقی و دورانی به ترتیب چنین است

$$[m_{sh}]\{\ddot{x}_s\} + [c_{sh}]\{\dot{x}_s\} + [k_{sh}]\{x_s\} = \{p_{sh}\} \quad (2)$$

$$[m_{sr}]\{\ddot{\theta}_s\} + [c_{sr}]\{\dot{\theta}_s\} + [k_{sr}]\{\theta_s\} = \{p_{sr}\} \quad (3)$$

که در آن $[m_s]$ ، $[c_s]$ و $[k_s]$ به ترتیب ماتریس جرم، استهلاک و سختی خاک، اندیس h بیان کننده مود ارتعاش افقی و اندیس s بیان کننده مود ارتعاش دورانی خاک است. همچنین بردارهای زیر تعریف می شوند

$$\{x_s\} = \{x_1 \ x_2 \ x_3\}^T \quad \text{و} \quad \{\theta_s\} = \{\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3\}^T \quad (4)$$

$$\{P_{sh}\} = \{V(t) \ 0 \ 0\}^T \quad \text{و} \quad \{P_{sr}\} = \{M(t) \ 0 \ 0\}^T \quad (5)$$

$\{x_s\}$ و $\{\theta_s\}$ به ترتیب بردار درجهات آزادی خاک در مود ارتعاش افقی و دورانی بوده و $V(t)$ و $M(t)$ بامعادلات

$$V(t) = V'(t) - m_b \ddot{u}_b = -\{r^T\}[m]\{\ddot{u}\} - m_t \ddot{s} - (m_t + m_b) \ddot{x}_1 - L_0^r \ddot{\theta}_1 - (m_t + m_b) \ddot{u}_g \quad (6)$$

$$M(t) = M'(t) - I_{fb} \ddot{\theta}_1 = -\{h^T\}[m]\{\ddot{u}\} - L_0^r \ddot{s} - L_0^r \ddot{x}_1 - (I_b + I_{fb}) \ddot{\theta}_1 - L_0^r \ddot{u}_g \quad (7)$$

به عنوان برش ولنگر اعمال شده بر سطح زیرین پی است که در آن $V'(t)$ و $M'(t)$ برش و ولنگر اعمال شده بر سطح بالائی پی می باشد. علاوه بر این علامتهای زیر معرفی می شوند

$$u_b = u_g + x_1 \quad \text{و} \quad I_{fb} = \frac{m_b r_b^2}{4} \quad \text{و} \quad L_0^r = \sum_{j=1}^n m_j h_j \quad \text{و} \quad I_b = I_t + \sum_{j=1}^n m_j h_j^2 \quad (8)$$

در فاز لغزشی معادله تعادل برش پایه به صورت ذیل نوشه می شود

$$\{r^T\}[m]\{\ddot{u}\} + m_t \ddot{s} + m_t \ddot{x}_1 + L_0^r \ddot{\theta}_1 + c_0 \dot{s} + k_0 s = -\mu g m_t \frac{\dot{s}}{|\dot{s}|} - m_t \ddot{u}_g \quad (9)$$

که در این روابط، m_t ضریب اصطکاک، k_0 سختی، c_0 استهلاک جدایشگر و m_t جرم کل سازه است.

اگر معادلات (۱)، (۲) و (۳) را به صورت همزمان حل نماییم، مجھولات موجود در سیستم در فاز لغزشی بدست می آیند. شایان ذکر است که روابط ارائه شده در این بخش جهت سیستم جدایشگر FBI-R می باشد. جهت استخراج روابط جدایشگر P-F، کافی است در این روابط c_0 و k_0 را برابر صفر قرار دهیم. همچنین برای جدایشگر LRB، لازم است m_t مساوی صفر قرار گیرد.

۲-۲ - معادلات تعادل دینامیکی در فاز غیرلغزشی

در فاز غیرلغزشی $\dot{s} = 0$ است، لذا اگر در روابط (۱)، (۲) و (۳) شتاب لغزشی را صفر قرار دهیم، معادلات تعادل دینامیکی حاکم بر سیستم مورد مطالعه در فاز غیرلغزشی حاصل می شود.

۲-۳- شرایط وجود فازهای لغزشی و غیرلغزشی در سیستم

شرط وجود فاز غیرلغزشی در سیستم عبارت است از

$$\mu g > \left| \ddot{u}_g + \sum_{j=1}^n \alpha_j \ddot{u}_j + \ddot{x}_1 + h_0^r \ddot{\theta}_1 + \omega_0^2 s \right| \quad (10)$$

همچنین شرط وجود فاز لغزشی در سیستم به قرار ذیل است

$$\mu g \leq \left| \ddot{u}_g + \sum_{j=1}^n \alpha_j \ddot{u}_j + \ddot{x}_1 + h_0^r \ddot{\theta}_1 + \omega_0^2 s \right| \quad (11)$$

در این روابط h_0^r فرکانس ارتعاشی جدایشگر بوده و a_j و h_0^r مطابق زیر

$$h_0^r = \frac{L_0^r}{m_t} \quad \text{و} \quad a_j = \frac{m_j}{m_t} \quad (12)$$

تعریف می شود

۳- ارائه روش حل معادلات تعادل دینامیکی سیستم

تحریک اعمال شده بر سیستم مورد مطالعه، مؤلفه شمالی - جنوبی زلزله ال ستترو (۱۹۴۰م) می باشد. با توجه به اینکه تابع تحریک اعمالی بر سیستم یک تابع اختیاری و پیچیده از زمان می باشد، لذا برای حل معادلات می توان از روشهای عددی گام به گام زمانی استفاده نمود.

۴- بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار سازه مورد مطالعه

همانگونه که بیان شد در مطالعه حاضر تاثیر پارامترهای مختلف بر رفتار سه سازه جداسده یک، پنج و ده طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مقادیر مبنایی برای اجزای سازه ها، جدایشگر و

خاک در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به توضیح است که در ارائه نتایج ابتدا نتایج جدایشگر R-FBI که دارای سه جزء اصطکاکی، الاستیکی و میراکننده است ارائه شده و سپس مقایسه پاسخ سازه با جدایشگرهای مختلف انجام شده است.

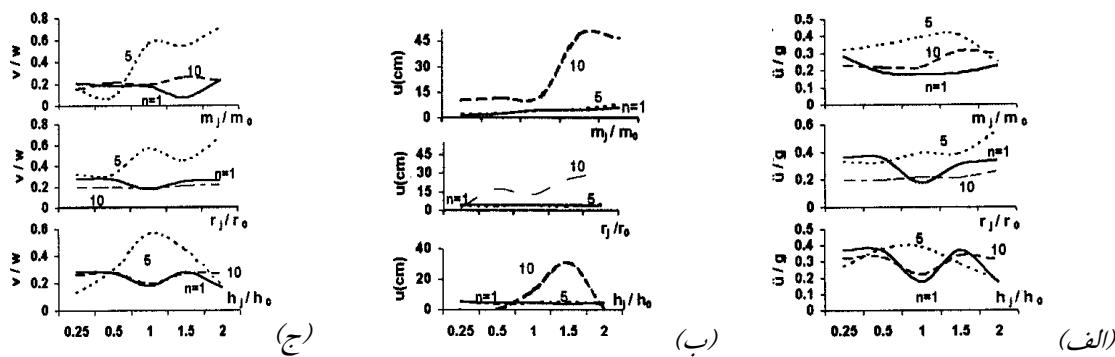
جدول ۱: مقادیر مبنای سیستم مورد مطالعه

مقادیر مبنای سازه های مورد مطالعه	سازه					خاک			R-FBI		
	m_0 (Ton)	h_0 (m)	r_0 (m)	k_0 (N/m)	γ_0 (%)	V_{s0} (m/s)	ρ_0 (kg/m³)	v_0	μ_0	T'_0 (sec)	γ'_0 (%)
$n = 1, 5, 10$	۱۰۰	۳	۵	$1/3 \times 10^4$	۵	۷۵	۱۷۰۰	۰/۳۷۵	۰/۰۵	۴	۵

در جدول فوق m_0 ، h_0 ، k_0 و γ_0 به ترتیب جرم متوسط، ارتفاع متوسط، شعاع، سختی و درصد استهلاک مینا در سازه است. علاوه بر این V_{s0} و ρ_0 به ترتیب سرعت موج برشی، جرم مخصوص و نسبت پواسون مینا در خاک بوده و بالاخره μ_0 ، T'_0 و γ'_0 به ترتیب ضریب اصطکاکی، پریود ارتعاشی و درصد استهلاک مینا در جدایشگر است.

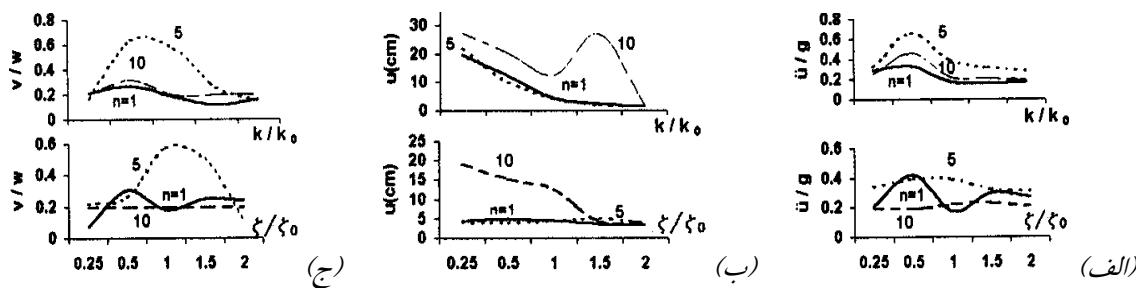
۴-۱- بررسی تاثیر خواص سازه بر رفتار سازه مورد مطالعه
لازم به ذکر است که در شکلهای ذیل منظور از شتاب نرمال شده و تغییر مکان، مقادیر آنها در طبقه فوقانی ساختمنهای مورد مطالعه می باشد.

همانگونه که در شکل (۴) دیده می شود جرم، شعاع، ارتفاع و درصد استهلاک سازه بر شتاب و برش پایه تاثیرات نامنظمی دارند. شعاع و ارتفاع سازه بر تغییر مکان سازه تاثیرات نامنظمی دارد ولی با کاهش جرم سازه، کاهش تغییر مکان سازه هامشاهده می شود.



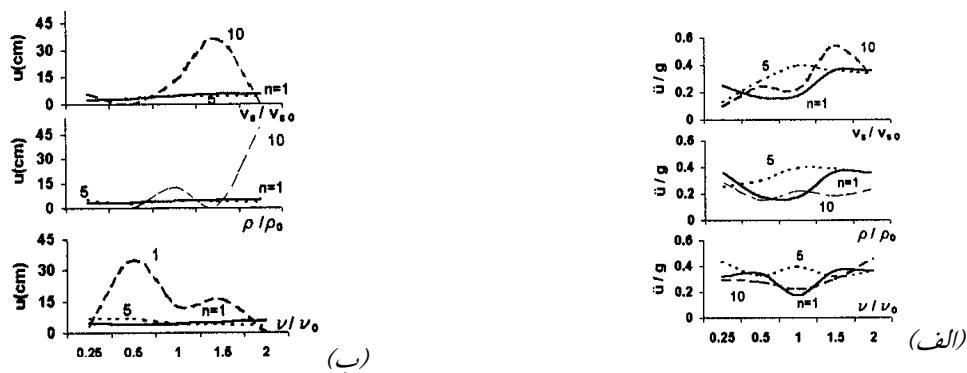
شکل ۴: اثر جرم، شعاع و ارتفاع سازه بر، (الف) شتاب نرمال شده، (ب) تغییر مکان، (ج) برش نرمال شده

در شکل(۵) ملاحظه می شود که با افزایش سختی سازه، کاهش نسبی شتاب و برش پایه و کاهش تغییر مکان سازه مشاهده می گردد. با افزایش استهلاک سازه در ساختمانهای یک و ده طبقه، کاهش تغییر مکان ملاحظه می شود، در صورتی که در ساختمان پنج طبقه تغییرات محسوسی در تغییر مکان مشاهده نمی شود.

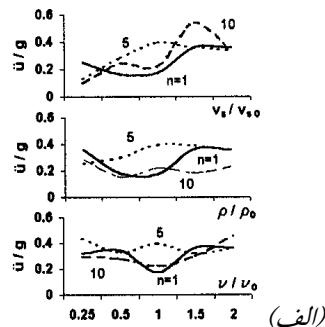


شکل ۵: اثر سختی و استهلاک سازه بر، (الف) شتاب نرمال شده، (ب) تغییر مکان، (ج) برش نرمال شده

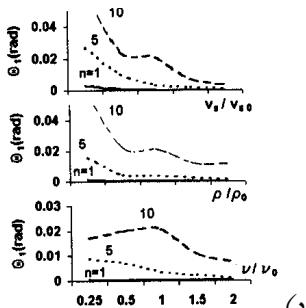
۴-۲- بروزی تاثیر اندرکنش خاک و سازه و خواص خاک بر رفتار سازه مورد مطالعه همانگونه که در شکل(۶) ملاحظه می شود با افزایش سرعت موج برشی در خاک و یا به عبارت دیگر با افزایش سختی خاک، شتاب نیز افزایش می یابد. جرم مخصوص خاک و نسبت پواسون آن تاثیرات نامنظمی بر پاسخ سازه دارند، این در صورتی است که با افزایش جرم مخصوص و سرعت موج برشی در خاک، کاهش تغییر مکان افقی و دوران خاک مشاهده می شود. نسبت پواسون خاک تاثیرات نامنظمی در تغییر مکان افقی و دوران خاک دارد.



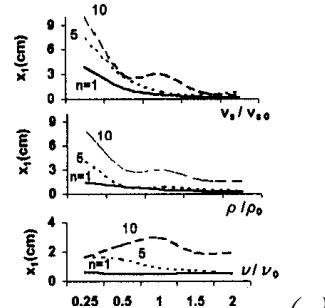
(ب)



(الف)



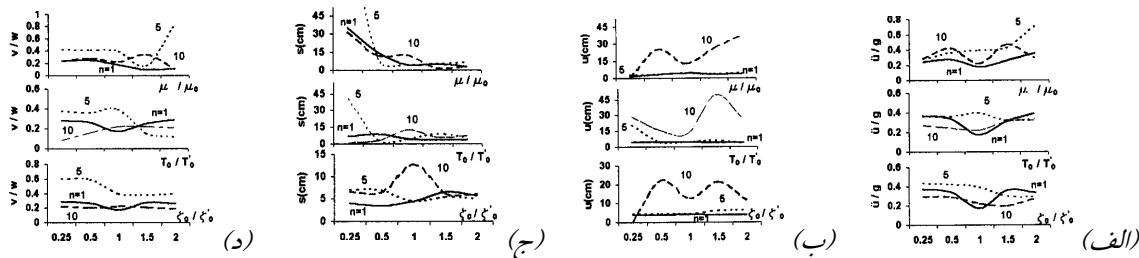
(د)



(ج)

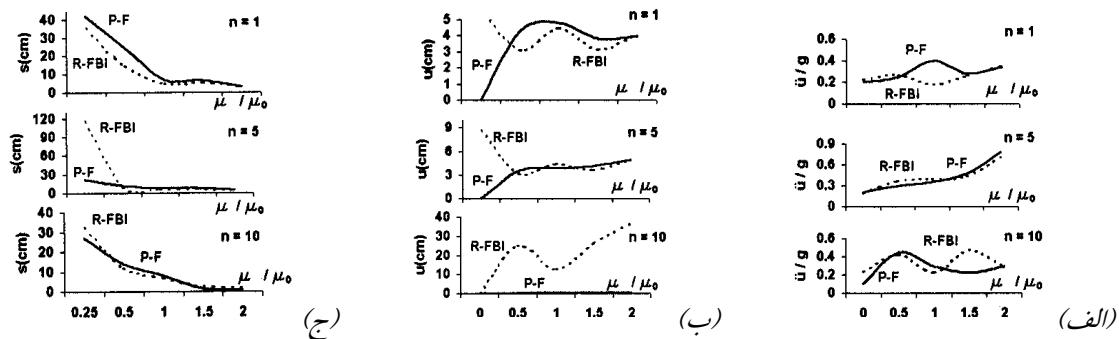
شکل ۶: اثر سرعت موج بر شی در خاک، جرم مخصوص و نسبت پواسون خاک بر
الف) شتاب نرمال شده، ب) تغییر مکان افقی خاک، ج) دوران خاک

۴-۳- بررسی تأثیر جداسازی و خواص جدايشگر بر رفتار سازه مورد مطالعه در شکل (۷) دیده می شود که تأثیر ضریب اصطکاک جدايشگر بر شتاب و برش پایه و تغییر مکان نامنظم است. همچنین با افزایش این ضریب، کاهش تغییر مکان لغزشی اتفاق می افتد.

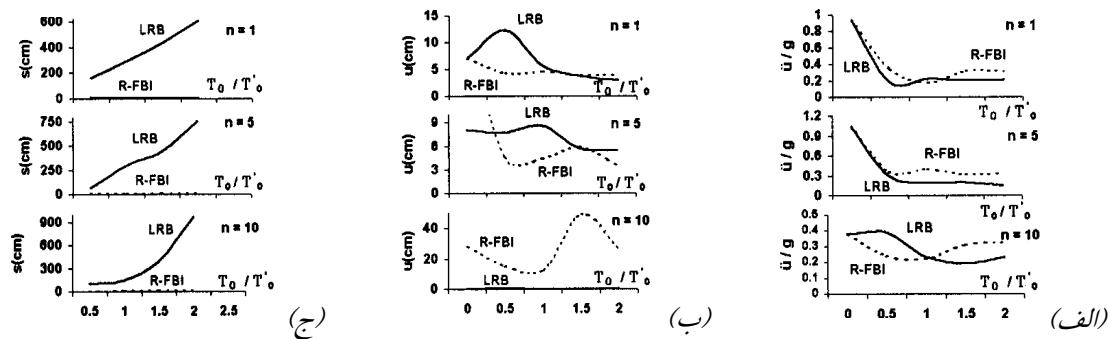


شکل ۷: اثر ضریب اصطکاک، پریود ارعاشی و استهلاک جدايشگر بر
الف) شتاب نرمال شده، ب) تغییر مکان لغزشی، ج) برش نرمال شده

۴- بررسی تاثیر جدایشگرهای مختلف بر رفتار سازه مورد مطالعه در شکل‌های (۸) و (۹) تاثیر جداینده‌های R-FBI، P-F و LRB بر پاسخ سازه بررسی شده است.



شکل ۸: مقایسه جدایشگرهای P-F و R-FBI و تاثیر آن بر (الف) شتاب نرمال شده، (ب) تغییر مکان لغزشی



شکل ۹: مقایسه جدایشگرهای LRB و R-FBI و تاثیر آن بر (الف) شتاب نرمال شده، (ب) تغییر مکان لغزشی

۵- بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که کمترین تاثیر در تغییر شتاب طبقه در سازه‌های یک، پنج و ده طبقه به ترتیب مربوط به پارامتر جرم سازه، نسبت پواسون خاک و درصد استهلاک سازه و در مورد تغییر مکان طبقه به ترتیب مربوط به پارامتر پریود ارتعاشی جدایشگر، شعاع طبقه و درصد استهلاک سازه می‌باشد. علاوه بر این، بیشترین تاثیر در تغییر شتاب طبقه در سازه‌های مذکور به ترتیب مربوط به پارامتر درصد استهلاک سازه، ضریب اصطکاک جدایشگر و سرعت موج برشی در خاک و در مورد تغییر مکان طبقه مربوط به پارامتر سختی خاک برای ساختمنهای یک و پنج طبقه و جرم سازه برای ساختمندانه طبقه است.

باتوجه به کاهش محسوس دیده شده در پاسخ سازه‌های جدایشده نسبت به جدانشده برای تمام ساختمنهای مورد بررسی، اهمیت استفاده از سیستم‌های جدایشگر جهت داشتن سازه‌ای ایمن و اقتصادی واضح و آشکار است. این در حالی است که تاثیر جداسازی در کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌های کوتاه تر،

بیشتر نمایان است. از طرفی نتایج بدست آمده حاکی از این است که کارائی جدایشگر R-FBI به دلیل داشتن هر سه المان مبنای، بیش از جدایشگرهای LRB و P-F می باشد. اختلاف دیده شده در پاسخ سازه های متکی بر بستر نرم و سخت جهت سه سازه مورد بررسی (در تمام موارد پاسخ ، بجز تغییر مکان ساختمان ده طبقه، اختلاف مذکور در جهت کوچکتر بودن پاسخ سازه متکی بر بستر نرم نسبت به پاسخ سازه متکی بر بستر سخت می باشد)، مؤید لزوم درنظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه در تعیین پاسخ دینامیکی سازه ها است به گونه ای که بدون در نظر گرفتن این اثرات، پاسخ صحیحی از سازه مورد مطالعه حاصل نمی گردد.

۶- مراجع

- [1] Mostaghel, N., and Khodaverdian, M., “Dynamics of Resiliant – Friction Base Isolation (R-FBI),” *Earthqu. Eng. and Str. Dyn.*, V.15, 1987, pp. 379- 390.
- [2] Mostaghel, N., and Khodaverdian, M., “Seismic Response of Structures Supported on R-FBI System,” *Earthqu. Eng. and Str. Dyn.*, V.16, 1988, PP. 839-854.
- [3] Fan, F.-G., and Ahmadi, G., and Mostaghel, N., and Tadjbakhsh, I.-G., “Performance Analyses of Aseismic Base Isolation Systems for a Multi –Storey Building,” *Soil Dyn. and Earthqu. Eng.*, V.10, No. 3, 1991, PP. 152-171.
- [4] Constantinou, M.-C., “A Simplified Analysis procedure for Base-Isolated Structures of Flexible Foundation,” *Earthqu. Eng. and Str. Dyn.*, V.15, 1987, PP. 963-983.
- [5] Mayes, R.-L. and Buckle, I.-G. and Jones, L.-R., “Seismic Isolation - A Solution to the Earthquake Problems of the Precast Concrete Industry,” *Pci Journal*, May-June 1988, pp. 34-57.
- [6] سازمان برنامه و بودجه، معاونت فنی دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، ”مهندسی زلزله و تحلیل سازه ها در برابر زلزله،“ انتشارات سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۶۹.
- [7] Jean, W.-Y. and Lin, T.-W. and penzien, J., “System Parameters of Soil Foundation for Time Domain Dynamic Analysis ,” *Earthqu. Eng . and Str. Dyn.*, vol 19, PP.541-553,1990 .