

# بررسی تاثیر مسلح سازی خاک در کاهش ارتعاشات پی چکش های صنعتی

دکتر نادر هاتف<sup>۱</sup>، محمد مهدی حیدری<sup>۲</sup>

۱- استاد بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه شیراز

۲- دانشجوی دکتری، بخش راه و ساختمان، دانشگاه شیراز

mmhc790@gmail.com

## خلاصه

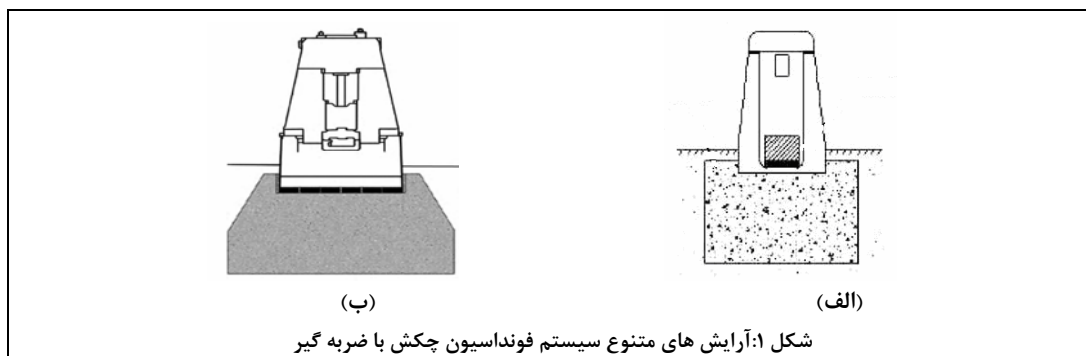
پی یک دستگاه ضربه زننده مانند چکش های صنعتی را میتوان بصورت سیستم جرم-فنر-میرا گر با دو درجه آزادی در نظر گرفت. در طراحی اینگونه پی ها میبایست ارتعاشات وهمچنین نیروی انتقالی را تا حد ممکن کاهش داد. با دقت در معادلات چنین مدلهایی میتوان نقش سه عامل مهم را جهت قرار گرفتن دامنه ارتعاشات در محدوده ی مجاز دید. این عوامل عبارتند از: (۱) جرم فونداسیون (۲) سختی و میرایی فونداسیون (۳) سختی و میرایی ضربه گیر (Pad).

در این مقاله اثر مسلح سازی خاک زیر فونداسیون بر دامنه ارتعاش و نیروی انتقالی بررسی شده است. بررسی ها بیا نگر آنست که با مسلح سازی خاک زیر فونداسیون دامنه ارتعاش فونداسیون کاهش چشمگیری دارد. اثر مسلح سازی خاک بر نیروی انتقالی به سختی و میرایی نسبی فونداسیون و ضربه گیر در حالت بدون مسلح سازی بستگی دارد. لذا در طراحی پی ماشین آلات صنعتی میبایست با در نظر گرفتن میزان اثر گذاری هر یک از عوامل یاد شده ترکیبی بهینه از آنها را مورد استفاده قرار داد تا با صرف کمترین هزینه بتوان ارتعاشات مورد نظر را در محدوده ی مجاز قرار داد. این مقاله به کمک نمودارها ی راهنما راهکاری عملی برای تخمین سیستمی بهینه برای پی ماشین آلات صنعتی را عرضه میکند.

کلمات کلیدی: پی چکش های صنعتی، سختی و میرایی فونداسیون، ضربه گیر، دامنه ارتعاش.

## مقدمه

امروزه چکش های صنعتی به عنوان ابزاری رایج و کارا در زمینه شکل دهی فلز و صنعت ساخت مطرح می باشد. در هنگام عملکرد معمول تجهیزات نگهدارنده، پی اینگونه چکش ها تحت تأثیر بار ضربه ای شدید با دوره زمانی کوتاه قرار دارد. لذا، هدف اساسی در طراحی پی کاهش دامنه ارتعاش و نیروی وارده به خاک تا رسیدن به حد پایداری و سرویس دهی تجهیزات می باشد بطوریکه مزاحمت برای محوطه اطراف و ساختمانهای کناری به حداقل برسد. برای دستیابی به این اهداف، اغلب از سیستمهای ضربه گیر در کنار تجهیزات ضربه زننده استفاده می شود. دو نوع آرایش نصب سیستمهای چکش صنعتی با ضربه گیر در شکل (۱) نشان داده شده است.



<sup>۱</sup> استاد بخش مهندسی راه و ساختمان

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری ژئوتکتیک

تحلیل این سیستم مانند مدل جرم-فنر-میرا گر با دو درجه آزادی در راستای قائم (با در نظر گرفتن بار مرکزی) در نظر گرفته می شود. برای حصول اطمینان از عملکرد ایمن دستگاه، سیستم ضربه گیر و فونداسیون باید به نحوی طراحی شود که دامنه ارتعاشات در محدوده مجاز جدول (۱) [7] قرار گیرد. محققان بسیاری بر روی اثر پارامترهای مؤثر بر نیروی ضربه ای وارده بر خاک مطالعه کرده اند و مدل‌های دینامیکی با یک جرم و دو جرم فونداسیون با فنر و میراکننده ارائه کرده‌اند [2,3,7,4,6]. اخیراً [2]، کارایی جداساز ضربه‌ای با آرایش‌های مختلف فونداسیون مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه پارامتری جامعی برای نشان دادن اثر سختی و میرایی سیستم ضربه گیر بر ارتعاش ماشین و سندان با آرایش‌های مختلف انجام پذیرفته است. همچنین حل فرم بسته پاسخ سیستم یک جرم فونداسیون به بار ضربه ای مستطیلی، نیم سینوسی و مثلثی با دوره زمانی متفاوت ارائه شده است [3].

جدول ۱: حداکثر دامنه ارتعاش مجاز فونداسیون چکش صنعتی

حداکثر دامنه ارتعاش		وزن چکش سر (تن)
بلوک فونداسیون	سندان	
<i>mm</i>	<i>mm</i>	
۱/۲	۱	< ۱
۱/۲	۲	۲
۱/۲	۴	> ۳

با آنکه سیستم‌های ضربه گیر برای بهبود کارکرد فونداسیون تجهیزات ضربه زننده استفاده می شوند، اثر آنها همیشه مطلوب نبوده و بستگی زیادی به خصوصیات دینامیکی فونداسیون دارد. در عین حال ثابت سختی و میرایی ضربه گیر، معمولاً مقادیر مشخصی دارد. لذا می توان راهکار جدیدی را با تغییر پارامترهای فیزیکی و دینامیکی فونداسیون به وسیله مسلح سازی خاک زیر فونداسیون ارائه کرد. هدف این مقاله بررسی اثر مسلح سازی خاک زیر فونداسیون بر پاسخ دینامیکی فونداسیون و تأمین نمودارهای راهنما برای طراحی مناسب و بهینه فونداسیون با مسلح سازی خاک و سیستم ضربه گیر می باشد.

### دینامیک سیستم فونداسیون

عملکرد دینامیکی سیستم فونداسیون تحت بار ضربه را به روش ریاضی می توان مدل کرده و با رویکردی تحلیلی یا عددی محاسبه نمود. با توجه به آرایش دستگاه از سیستمی با دو جرم برای مدل کردن سیستم فونداسیون استفاده می شود. وضعیت خاک، مقدار، شکل و دوره نیروی ضربه، اندازه و جرم بلوک فونداسیون، سندان و خصوصیات دینامیکی ضربه گیر پارامترهای کلیدی هستند که در تعیین پاسخ دینامیکی سیستم مؤثر می باشند.

### بار ضربه

تاریخچه زمانی بار ضربه  $P(t)$  ناشی از برخورد چکش با سندان یا بلوک فونداسیون را نمی توان به راحتی تعیین کرد. با این حال، ضربه های آبی مستطیلی شکل (مورد استفاده در تحلیل حاضر) و یا شکل‌های نیمه سینوسی و مثلثی تقریبهای مناسبی از این بار می باشند. در صورتیکه مدت زمان ضربه یا برخورد در مقایسه با دوره تناوب سیستم بسیار کوچک باشد، پاسخ سیستم به شکل ضربه بستگی ندارد. لذا پاسخ را می توان از تحلیل ارتعاش آزاد با شرط اولیه سرعت برای سندان محاسبه نمود [7]. چنانچه مدت زمان ضربه از یک دهم دوره تناوب سیستم بزرگتر باشد، پاسخ سیستم متأثر از مشخصه های بار وارده خواهد شد [3].

### سیستم دو جرم فونداسیون

فونداسیون چکش ها با سیستم ضربه گیر را می توان با مدل دو جرم فنر و میراگر مطابق شکل (2) مدل کرد. معادله تعادل برای این سیستم عبارتست از:

$$m_a \ddot{v}_a + C_a (\dot{v}_a - \dot{v}_b) + k_b (v_a - v_b) = P(t) \quad (1)$$

$$m_b \ddot{v}_b - C_a (\dot{v}_a - \dot{v}_b) - k_b (v_a - v_b) + C_b \dot{v}_b + v_b k_b = 0 \quad (2)$$

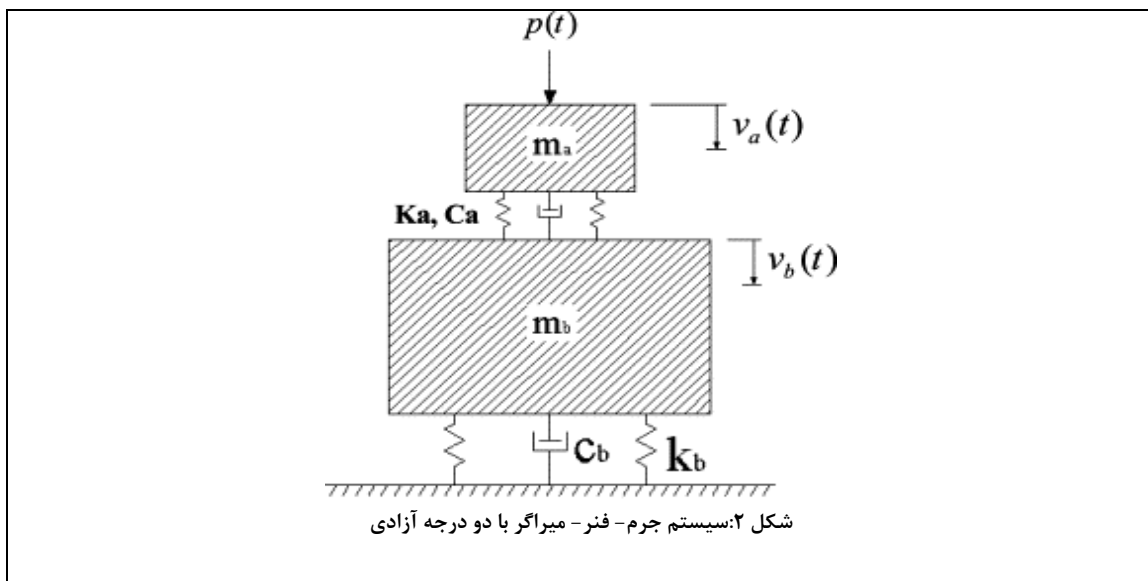
که بصورت ماتریسی می توان نوشت:

$$m = \begin{bmatrix} m_a & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c_a & -c_a \\ -c_a & c_a + c_b \end{bmatrix} \quad k = \begin{bmatrix} k_a & -k_a \\ -k_a & k_a + k_b \end{bmatrix} \quad (۳)$$

که در آن:

$$\{v\} = \begin{Bmatrix} v_a \\ v_b \end{Bmatrix} \quad P_{(t)} = \begin{Bmatrix} P_{(t)} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (۴)$$

جائیکه  $m_a$  جرم سندان (شکل ۱-الف)، جرم ماشین و سندان (شکل ۱-ب) بوده و  $m_b$  جرم بلوک فونداسیون و کلیه منصوبات به آن (شکل ۱-الف)، یا جرم بلوک فونداسیون (شکل ۱-ب) می باشد.  $k_a$  و  $c_a$  به ترتیب سختی و میرایی ضربه گیر،  $k_b$  و  $c_b$  سختی و میرایی فونداسیون می باشند.  $X_b(t)$  و  $X_a(t)$  نیز متناظرا " پاسخ سندان (یا ماشین) و بلوک فونداسیون به بار ضربه ای  $P(t)$  در نظر گرفته می شود.



معادلات فوق با دو روش تحلیل و عددی قابل حل می باشند. روش تحلیل با رویکرد حل مستقیم با استفاده از قانون کرامر به جوابی دقیق می انجامد. با این حال با رویکرد آنالیز مودال بسیار آسانتر می توان معادلات را حل نموده و فرکانسهای طبیعی، مود شکل ها و دامنه های سیستم را بدست آورد، اگر چه در سیستمهای با میرایی بالا این روش از دقت کافی برخوردار نیست [6]. علاوه بر این، معادلات دیفرانسیل را می توان به کمک روشهای عددی با رویکردهای مختلف حل نمود. در این مقاله با استفاده از رویکرد اجزای محدود central difference برنامه کامپیوتری در نرم افزار matlab کد نویسی شده و حل معادلات انجام پذیرفته است. شرایط اولیه حل عددی معادلات بدین صورت انتخاب شده است:

$$\begin{Bmatrix} x_a \\ x_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{Bmatrix} = 0 \quad (۵)$$

حل معادلات دیفرانسیل، تاریخچه زمانی جابجایی و سرعت را بدست می دهد. لذا می توان بار وارده انتقالی از طریق سیستم ضربه گیر را محاسبه نمود:

$$f_{a(t)} = k_a(x_a - x_b) + c_a(\dot{x}_a - \dot{x}_b) \quad (۶)$$

و همچنین بار وارد بر خاک بر بدست آورد:

$$f_{a(t)} = k_b x_b + c_b \dot{x}_b \quad (۷)$$

سختی و میرایی سیستم های مهارکننده و ضربه گیر

سیستمهای ضربه گیر می توانند ضربه گیرهایی با مواد ویسکوالاستیک و یا مجموعه ای از فنرها و میراگرهایی که بصورت موازی (شکل 2) مرتب شده اند باشند. در صورت استفاده از ضربه گیر (*pad*) ویژگیهای دینامیکی آن با دانستن ابعاد و خصوصیات مواد سازنده بدست می آید:

$$k_a = \frac{E_p \cdot A_p}{d}, \quad c_a = \frac{k_a}{w_0} \quad (A)$$

جائیکه  $E_p$  مدول الاستیک ماده ضربه گیر،  $A_p$  و  $d$  به ترتیب مساحت سطح مقطع و ضخامت ضربه گیر، نسبت میرایی ضربه گیر و  $w_0$  فرکانس طبیعی سندان بر حسب رادیان بر ثانیه ( $rad/s$ ) می باشد.

### سختی و میرایی فونداسیون

معمولاً بلوک فونداسیون چکش ضربه زننده را در زمین دفن می کنند تا با استفاده از اثر خاک مجاورکناره های فونداسیون، میرایی افزایش یابد. همچنین بلوک فونداسیون را می توان به طور مستقیم بر روی سطح خاک قرار داد. برای فونداسیونهای مدفون در محیط همگن عمیق (نیمه بی نهایت)، ضرایب سختی و میرایی را می توان به صورت زیر بدست آورد [1].

$$K_b = Gr_0 \left( C_{v1} + \frac{G_s}{G} \frac{\ell}{r_0} S_{v1} \right) \quad (9)$$

$$C_b = r_0^2 \sqrt{\rho G} \left( \bar{C}_{r1} + \bar{S}_{v2} \frac{\ell}{r_0} \sqrt{\frac{\rho_s G_s}{\rho G}} \right) \quad (10)$$

جائیکه  $G$  مدول برشی خاک،  $r_0$  شعاع پی برای پی دایره ای و شعاع معادل  $\left(\sqrt{\frac{A}{\pi}}\right)$  برای پی های غیر دایره ای،  $\rho$  چگالی خاک،  $\ell$  عمق دفن و  $G_s$  و  $\rho_s$  مدول برشی و چگالی لایه های کناری می باشد.  $C_{v1}$ ،  $C_{v2}$ ،  $S_{v1}$  و  $S_{v2}$  پارامترهای بی بعد سختی و میرایی خاک زیر بلوک فونداسیون و لایه های کناری می باشند. مقادیر  $C_{v1}$ ،  $C_{v2}$ ،  $S_{v1}$  و  $S_{v2}$  برای انواع معمول فونداسیونها در جدول (2) موجود می باشد [1]. در این مقاله از دسته اول پارامترها استفاده شده است.

جدول 2: پارامترهای کاربردی سختی و میرایی پی چکش های صنعتی

خاک	فضای نیمه بی نهایت (عمیق)		لایه کناری	
	$C_{v1}$	$C_{v2}$	$S_{v1}$	$S_{v2}$
چسبنده	۷/۵	۶/۸	۲/۷	۶/۷
دانه ای	۵/۲	۵/۰		

آزمایشهای انجام شده بیانگر آنست که بسته به تعداد لایه ها و جنس مسلح کننده می توان سختی خاک راتا چندین برابر افزایش داد [5].

### مطالعه پارامتری

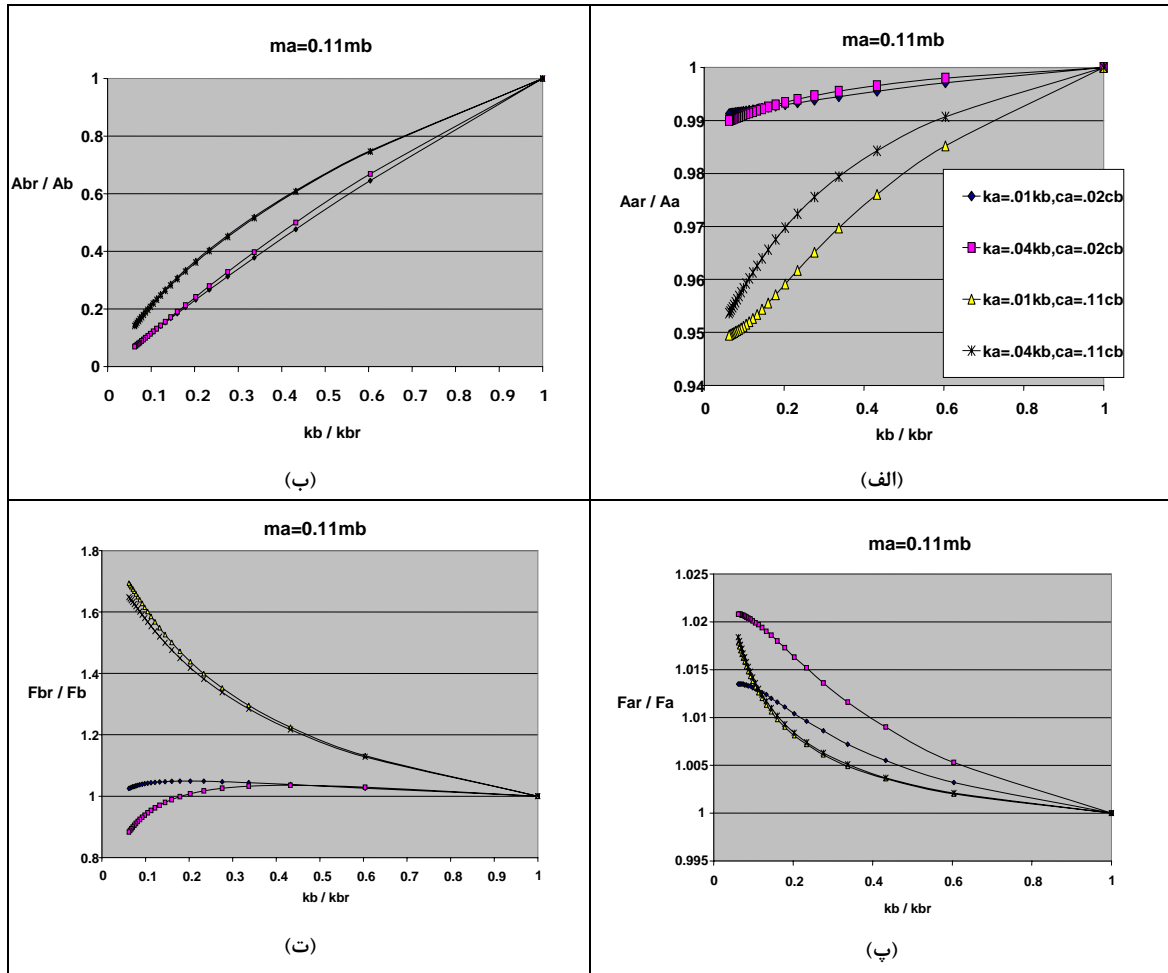
برای بررسی اثر مسلح سازی خاک زیر فونداسیون بر پاسخ فونداسیون و نیرویی که به محیط اطراف منتقل می شود، یک مطالعه جامع پارامتری انجام شده است. نتایج این مطالعه پارامتری جهت ارائه نمودارها، مورد استفاده قرار گرفته که می تواند در طراحی بهینه سیستم فونداسیون روی خاک مسلح با ضربه گیر به کار رود. بدین منظور نتایج به صورت بی بعد نشان داده شده است. سختی فونداسیون بدون مسلح سازی ( $K_b$ ) با سختی فونداسیون با مسلح سازی ( $K_{br}$ ) بی بعد شده است. دامنه ارتعاش و نیروی وارد بر سندان با مسلح سازی ( $F_{ar}$ ،  $A_{ar}$ ) و دامنه ارتعاش و نیروی وارد بر بلوک فونداسیون با مسلح سازی ( $F_{br}$ ،  $A_{br}$ ) به ترتیب با مقادیر متناظر در حالت بدون مسلح سازی ( $F_a$ ،  $A_a$ ) و ( $F_b$ ،  $A_b$ ) بی بعد شده است. برای چکش های صنعتی که سندان بر روی ضربه گیر قرار می گیرد نسبت جرم ( $m_a$ ) در محدوده ۰/۱۱ تا ۰/۳۳ قرار دارد. در این حالت استفاده از ضربه گیر با  $m_b$

سختی نسبی کمتر از  $K_a = 0.04K_b$  مناسب می باشد [2]. معمولاً نسبت میرایی ضربه گیر به فونداسیون بدون مسلح سازی  $\left(\frac{C_a}{C_b}\right)$  محدوده

(0.02 ~ 0.1) قرار می گیرد.

## بحث و بررسی نتایج

شکل (۳الف) و (۳الف) اثر مسلح سازی خاک زیر فونداسیون را در کاهش دامنه ارتعاش سندان برای نسبت جرم های مختلف نشان می دهد. همچنین نمودارها نمایانگر اثر نسبت سختی  $\left(\frac{K_a}{K_b}\right)$  و میرایی  $\frac{C_a}{C_b}$  می باشند. هر چه نسبت سختی اولیه از ۰/۰۴ کمتر باشد از کاهنده مسلح سازی کمتر است. نسبت میرایی کمتر در محدوده مورد نظر، اثر کمتری در کاهش دامنه ارتعاش سندان دارد. در شکلهای (۳ب) و (۳ب) می توان اثر قابل ملاحظه مسلح سازی را بر کاهش دامنه ارتعاش بلوک فونداسیون دارد.



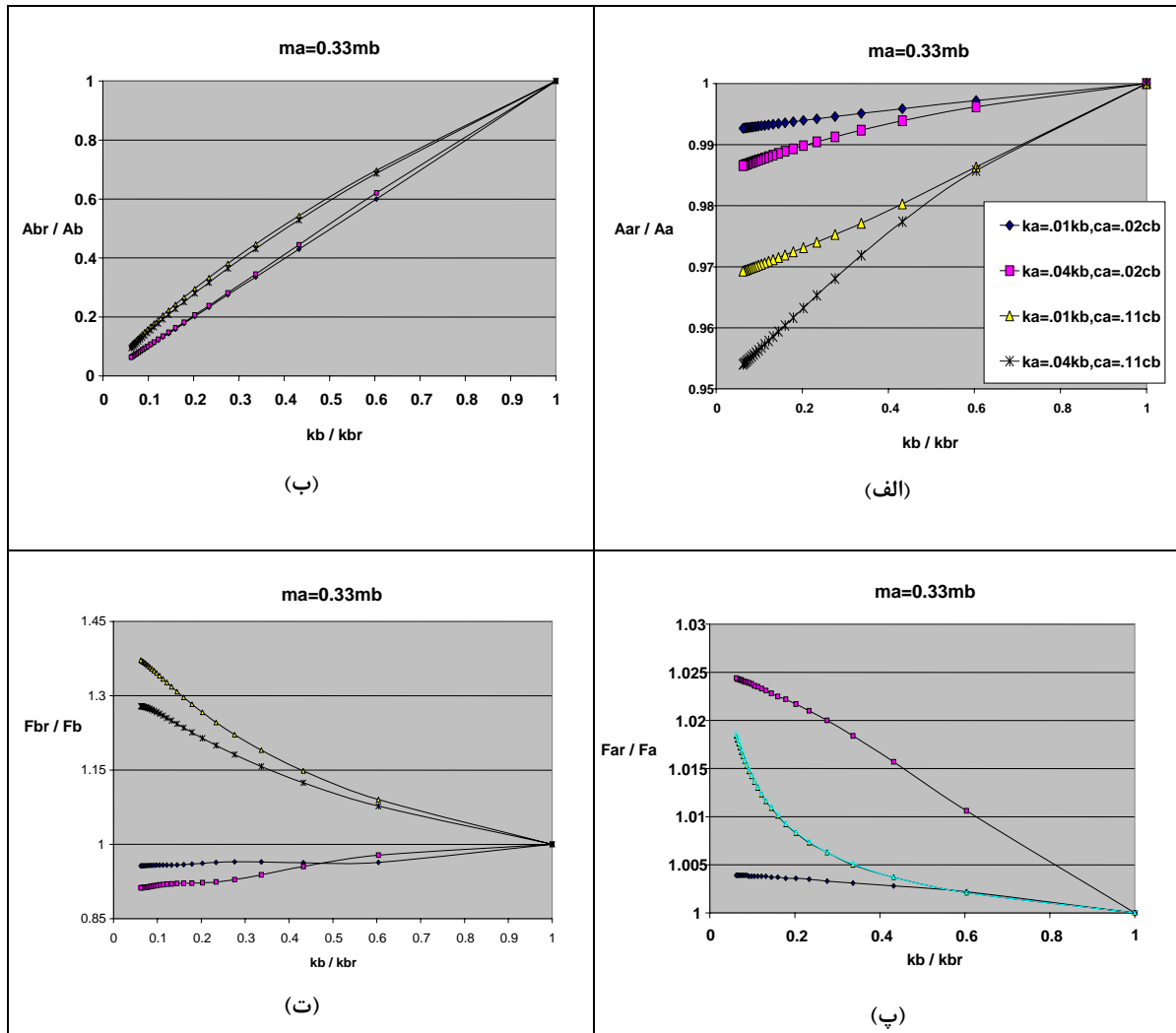
شکل ۳: پاسخ سیستم فونداسیون بر خاک مسلح و نیروی وارده بر آن برای نسبت جرم ۰/۱۱

اگرچه نسبت میرایی اولیه کمتر، دارای اثر کاهندگی بیشتری می باشد با این حال دامنه ارتعاش بلوک فونداسیون حساسیت چندانی را به ازای تغییرات نسبت سختی و میرایی اولیه نشان نمی دهد.

در شکلهای (۳پ) و (۳پ) اثر مسلح سازی افزایش بسیار ناچیز ( $< 2.5\%$ ) را برای نیروی وارد بر سندان نشان می دهد. در همه شکلهای یاد شده اثر افزایش نسبت جرم نامحسوس بوده حال آنکه در شکلهای (۳ت) و (۳ت) تغییر این پارامتر بسیار اثر گذار می باشد. شکل های (۳ت) و (۳ت) نشان دهنده اثر مسلح سازی بر نیروی وارد به خاک زیر فونداسیون است که در طراحی حائز اهمیت می باشد. در شکل (۳ت) و (۳ت) مقدار نیرو به تغییر نسبت سختی اولیه بستگی چندانی ندارد. نسبت میرایی اولیه بیشتر، می تواند اثر نامطلوب افزایش نیروی وارد بر خاک را بسیار کاهش دهد تا آنجا که نسبت جرمهای بالا این اثر را به اثری کاهنده تبدیل می نماید.

## نتیجه گیری

استفاده از مسلح سازی خاک زیر فونداسیون در صورتی که با سیستم ضربه گیر مناسب همراه باشد اثر کاملاً مطلوبی دارد. این عمل باعث کاهش چشمگیر دامنه ارتعاش بلوک فونداسیون و کاهش دامنه ارتعاش سندان می شود. با تعیین آرایش سیستم به نحوی که نسبت جرم بالایی را فراهم کند می توان اثر افزایش نیروی وارد بر خاک زیر فونداسیون را تا حد زیادی کاهش داد. بطوریکه حتی این اثر را کاهش داد. اثر افزایش نیروی وارد بر سندان بسیار ناچیز می باشد.



شکل ۴: پاسخ سیستم فونداسیون بر خاک مسلح و نیروی وارده بر آن برای نسبت جرم ۰/۳۳

مراجع

- 1- Braja, M.D. (1992) Principle of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company, Boston, MA
- 2- Chehab, A., Naggar, M.H.El. (2003) Design of efficient base isolation for hammers -and presses. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 23 No.2, pp.127-41
- 3- Chehab, A., El Naggar, M.H. (2004) Response of block foundations to impact loads. Journal of Sound and Vibration, Vol. 276 pp.293-310.
- 4- El Hifnawy L, Novak M. Response of hammer foundations to pulse loading. Soil Dyn Earthquake Engng 1984; 3(3):124-32.
- 6- Novak M, El Hifnawy L. Vibration of hammer foundations. Soil Dyn Earthquake Engng 1983;2(1):43-53.
- 7- Novak M. Foundations for shock-producing machines. Can Geotech J 1983;20(1):141-58.

