

## پاسخ دینامیکی شمع تک با باربری نوک تحت اثر ارتعاش جانبی

سارا دربندی<sup>۱\*</sup>، امین کشاورز<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر، sara68\_d@yahoo.com

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، amin\_keshavarz@yahoo.com

### چکیده

با توجه به افزایش ساخت سازه‌های بلندمرتبه در سال‌های اخیر و با نظر به اینکه در این سازه‌ها به شالوده‌های با ظرفیت باربری بالا به همراه نشست مجاز مورد نیاز است، استفاده از سیستم شمع در این سازه‌ها بسیار رایج شده است. استفاده از شالوده‌های شمع یکی از روش‌های کاهش تنش‌های داخلی و لنگرهای اعمالی بر شالوده‌های سطحی می‌باشد. تعداد زیادی از مطالعات گذشته به پاسخ جانبی شمع‌های تک اختصاص دارد. شمع‌هایی تحت اثر نیروهای جانبی هستند که حاصل بارگذاری روی سازه‌هایی مانند ساختمان‌ها، پل‌ها، دودکش‌ها، راکتورهای هسته‌ای، دیوار اسکله‌ها و سازه‌های دریایی هستند که اغلب تحت تاثیر تحریک‌های دینامیکی ناشی از فعالیت‌های لرزه‌ای، باد، حرکت ماشین‌های سنگین و امواج در محیط‌های ساحلی می‌باشند. بنابراین به دست آوردن پاسخ دینامیکی شمع‌های تحت تاثیر نیروی دینامیکی جانبی در طراحی سازه‌ها اهمیت زیادی دارد. در این مقاله، با استفاده از نرم افزار اجزا محدود *COMSOL Multiphysics*، پاسخ دینامیکی شمع تک با باربری نوک تحت اثر ارتعاش جانبی به دست آمده است. در این تحلیل، خاک به صورت همگن و با رفتار الاستیک خطی فرض شده و میرایی ویسکوز در محاسبات به کار رفته است. مدلسازی به صورت سه بعدی و در دامنه فرکانس انجام گرفته و اندرکنش شمع و خاک به صورت کاملاً متصل به هم فرض شده است. از مقایسه نتایج به دست آمده از این تحلیل با داده‌های موجود، صحت این تحلیل به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: شمع تک، ارتعاش جانبی، همگن، الاستیک

### ۱- مقدمه

از آنجایی که مزایای استفاده از فونداسیون شمع برای مهندسی ژئوتکنیک و سازه بسیار واضح شده است، بسیاری از محققین رشته‌های مختلف مهندسی توجه زیادی به روش‌های مختلف طراحی فونداسیون‌های شمع نموده‌اند. در این بخش مروری بر تحلیل‌های انجام شده بر روی پاسخ شمع تحت اثر بار جانبی صورت گرفته است.

تاجیمی [۱] یک مدل ویسکوالاستیک خطی برای خاک در نظر گرفت و روشی برای پاسخ ارتعاش جانبی شمع ارائه داد و پاسخ عمودی را نادیده گرفت. این مدل تنها برای تحلیل دینامیکی شمع تک که روی سنگ بستر صلب قرار گرفته به کار رفته است. در محاسبات، میرایی ویسکوز خاک در نظر گرفته شده است.

داس و سرگند [۲] یک روش تحلیلی برای تعیین پاسخ دینامیکی شمع تک استوانه‌ای با مقطع دایره تحت بار جانبی ارائه دادند. در این تحقیق برای به دست آوردن معادلات حاکم بر سیستم فونداسیون شمع، با استفاده از متغیرهای اصلی با شرایط مرزی مناسب، انرژی‌های پتانسیل و جنبشی سیستم فونداسیون شمع، به حداقل رسانیده شده‌اند. یک پارامتر بی‌بعد، وابسته

به مشخصه‌های شمع، فونداسیون و بارگذاری نیز به کار گرفته شده است که این پارامتر می‌تواند با استفاده از روش سعی و خطا تعیین شود. روش تفاضل محدود کلاسیک برای حل معادلات حاکم بر سیستم شمع- فونداسیون استفاده شده است. اعتبار مدل پیشنهاد شده با به کار گرفته شدن در آزمایش‌های مختلف نشان داده شده است. معادلات پارامتری با توجه به پاسخ در دامنه فرکانس نوک شمع و فرکانس تشدید شده سیستم فونداسیون- شمع ارائه شده است. در این تحقیق از روش همپلتون برای به دست آوردن توابع حاکم بر سیستم شمع و خاک استفاده شده است. در مدل ارائه شده، صحت سنجی با شمع تحت بار استاتیکی انجام شده است و سپس روی یک شمع تحت بار دینامیکی اعمال شده است.

ال نگار و نواک [۳] یک تحلیل برای پاسخ جانبی شمع به بار دینامیکی گذرا و بار هارمونیک با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی برای خاک، شرایط ناپویوستگی در اتصال شمع- خاک و زوال انرژی در اثر انواع مختلف دمپینگ ارائه دادند. بنابراین تاثیر همسایگی شمع‌ها برای گروه شمع‌ها در محاسبات به کار رفته است. این روش صحت سنجی شده است و نتایج آن با آزمایش های میدانی و حل‌های بسیار دقیق‌تری مطابقت دارد. پارامترهای دمپینگ و سختی خطی معادل برای شمع‌های تک و فاکتورهای عکس اندرکنش برای تحلیل غیرخطی تقریبی ارائه شده است.

مهندیراتا و همکاران [۴] برای مطالعه تاثیر ابعاد شمع و خصوصیات خاک بر پاسخ دینامیکی غیرخطی شمع که تحت تاثیر نیروی جانبی سیسنوسی در نوک شمع است، یک تحلیل پارامتریک انجام دادند. مطالعه روی مدل خاک- شمع به عمل آمده - است و با اعمال تغییر در قطر شمع، طول شمع و مدل خاک، نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. سیستم خاک- شمع با استفاده از روش اجزا محدود مدل شده است. برنامه‌نویسی با *matlab* انجام شده است. اثر اندکنش خاک- شمع برای حرکت دینامیکی شمع نیز در نظر گرفته شده است.

بی هومیک و همکاران [۵] رفتار غیرخطی را برای شمع تک توخالی در خاک لایه‌بندی شده که تحت مقادیر مختلف نیروی دینامیکی جانبی است، در نظر گرفتند. این مدل یک مدل اجزا محدود است که در آن برای شبیه‌سازی رفتار پلاستیک خاک، از مدل پلاستیک موهر- کلمب استفاده شده است، در حالیکه شمع با رفتار الاستیک فرض شده است. نتایج عددی با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی اعتبار یافته‌اند. دو مدل حرکت افقی و خمشی مطالعه شده‌اند و تاثیر پارامترهای موثر متفاوت، مانند خمش، طول و قطر شمع روی پاسخ دینامیکی غیرخطی شمع‌ها بررسی شده‌اند که جدایی شمع از خاک اطراف اثرات قابل ملاحظه‌ای بر فرکانس تشدید و دامنه جابجایی فونداسیون‌های شمع داشته است.

نوگامی و نواک [۶] مقاومت لایه خاک در برابر ارتعاش جانبی پایدار شمع الاستیک را به صورت تئوری در نظر گرفتند. شمع به صورت قائم و با سطح مقطع دایره‌ای فرض شده است. خاک به صورت یک لایه ویسکوالاستیک با میرایی هیستریک مدلسازی شده است. یک حل به صورت فرم بسته برای مقاوت لایه خاک در برابر ارتعاش به دست آمده است. این مقاوت وابسته به مدول برشی خاک، فرکانس، لاغری شمع، میرایی مصالح و ضریب پواسون است. این مطالعه شامل بررسی تاثیر این پارامترها می‌باشد. مقاوت لایه خاک در یک فرم بیان شده که می‌تواند به طور مستقیم در حل مسائل اندرکنش خاک-شمع مورد استفاده قرار گیرد.

نوگامی و نواک [۷] اندرکنش بین خاک و یک شمع الاستیک که تحت ارتعاش جانبی قرار گرفته را به طور تئوری مورد بررسی قرار دادند. در مدل آن‌ها خاک به صورت ویسکوالاستیک خطی و بر روی سنگ بستر صلب فرض شد و شمع نیز به صورت قائم و با باربری نوک در نظر گرفته شد. یک حل مستقیم که حاصل فرمول‌های فرم بسته است برای جابجایی شمع، میرایی و سختی ارائه داده شده است. تحلیل آن‌ها شامل یک مطالعه پارامتریک است که در آن تاثیر پارامترهای درگیر، اندرکنش بین خاک و شمع و تاثیر سختی و میرایی سیستم خاک-شمع بر پارامترهای حاکم شرح داده شده است.

در این تحقیق نیز پاسخ دینامیکی شمع تک با باربری نوک در خاک همگن با رفتار الاستیک خطی تحت اثر ارتعاش جانبی در دامنه فرکانس به دست آمده است و صحت این پاسخ با مقایسه و تطابق با حل‌های موجود به دست آمده است.

## ۲- پارامترهای بررسی شده در مدلسازی شمع تک تحت اثر بار جانبی

در این مدل شمع تک در حالت ته بسته تحت اثر بار جانبی در خاک همگن با رفتار الاستیک خطی فرض شده است. متغیرهای فرکانس ( $a_0$ ) و سختی جانبی ( $K_s$ ) برای نتیجه گیری استفاده شده‌اند و مقدار آن‌ها به صورت روابط (۱) و (۲) تعریف شده است:

$$a_0 = \frac{\omega r_0}{V_s} \quad (1)$$

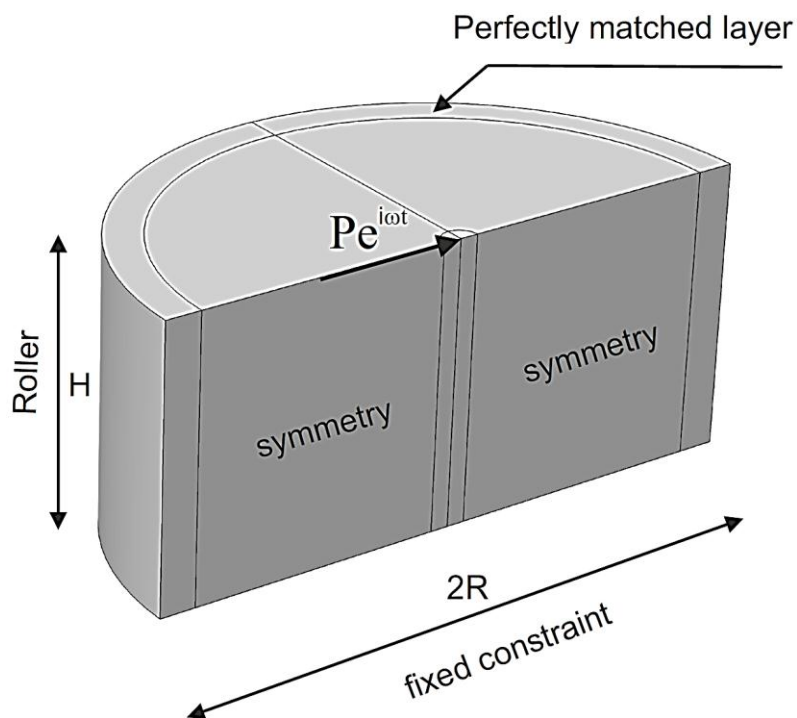
$$K_s = P/u \quad (2)$$

در این متغیرها  $\omega$  فرکانس ناشی از نیروی اعمال شده،  $r_0$  شعاع شمع،  $V_s$  سرعت انتشار موج برشی در خاک،  $K_s$  سختی خاک و می‌باشند.  $V_s$  از رابطه  $v_s = \sqrt{\frac{G_s}{\rho_s}}$  به دست می‌آید که در این رابطه  $G_s$  مدول برشی خاک و  $\rho_s$  چگالی خاک می‌-

باشند. در این تحلیل  $v_s = 0.4$  و  $\frac{H}{r_0} = 15$  و  $\frac{\rho}{\rho_p} = 0.6$  و  $\frac{E}{E_s} = 1000$  فرض شده‌اند.

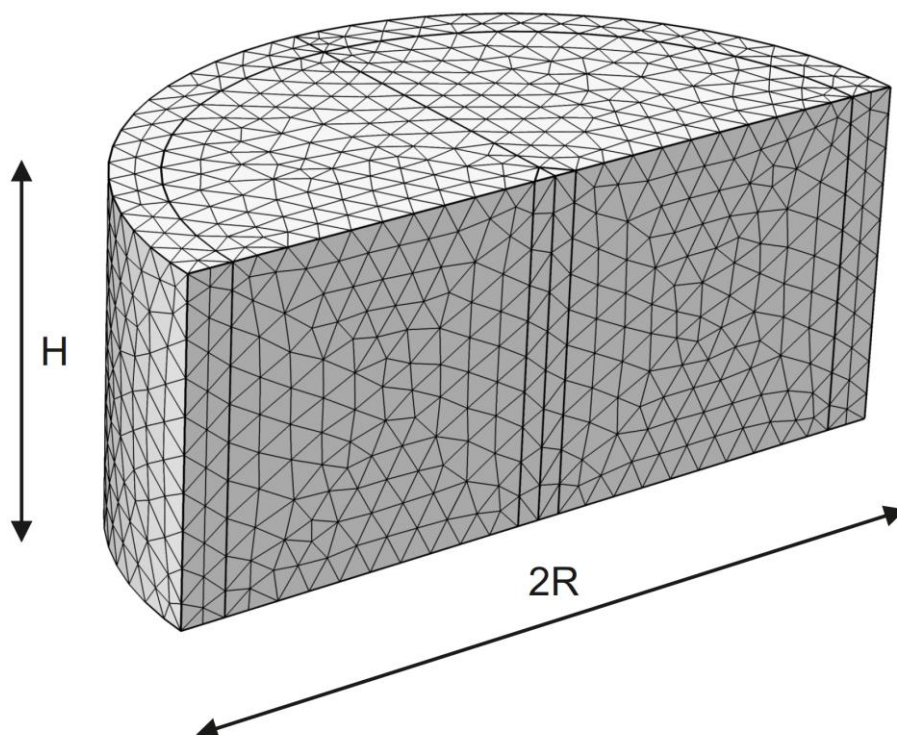
## ۳- مدلسازی شمع تک تحت بار جانبی

شکل هندسی و شرایط مرزی در تحلیل شمع تحت اثر بار جانبی در شکل ۱ نشان داده شده است. مدلسازی به صورت سه بعدی و متقارن انجام شده است. لایه *perfectly matched layer* اطراف خاک مدل شده است، این لایه، جاذب انرژی است و در واقع امواج منتشر شده در اثر برخورد به این لایه، جذب آن می‌شوند و این امر مانع از انعکاس امواج به داخل سیستم خاک و شمع می‌شود. مرز خارجی این لایه *Roller* تعریف شده است، از آنجایی که مرز *Roller* تنها امکان جابجایی عمودی را دارد، بنابراین مانع از جابجایی افقی خاک در اثر اعمال بار جانبی می‌شود و این امر باعث می‌شود که پاسخ دینامیکی قابل قبول به دست آید. مرزی که برای ته مدل در نظر گرفته شده *fixed constraint* است، چون شمع به صورت ته بسته فرض شده و این مرز به عنوان سنگ بستر صلب رفتار می‌کند.



شکل ۱ مرزبندی شمع تک با باربری نوک تحت بار جانبی

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مش‌بندی مدل تحلیل شده به ریزترین حالت ممکن تحت اثر بار جانبی در نظر گرفته شده است. به نحوی که اگر المان‌های مش بندی از آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است، کوچکتر در نظر گرفته شوند تأثیری در نتیجه حاصل از نرم افزار ندارد و پاسخ‌ها تغییری نمی‌کنند.

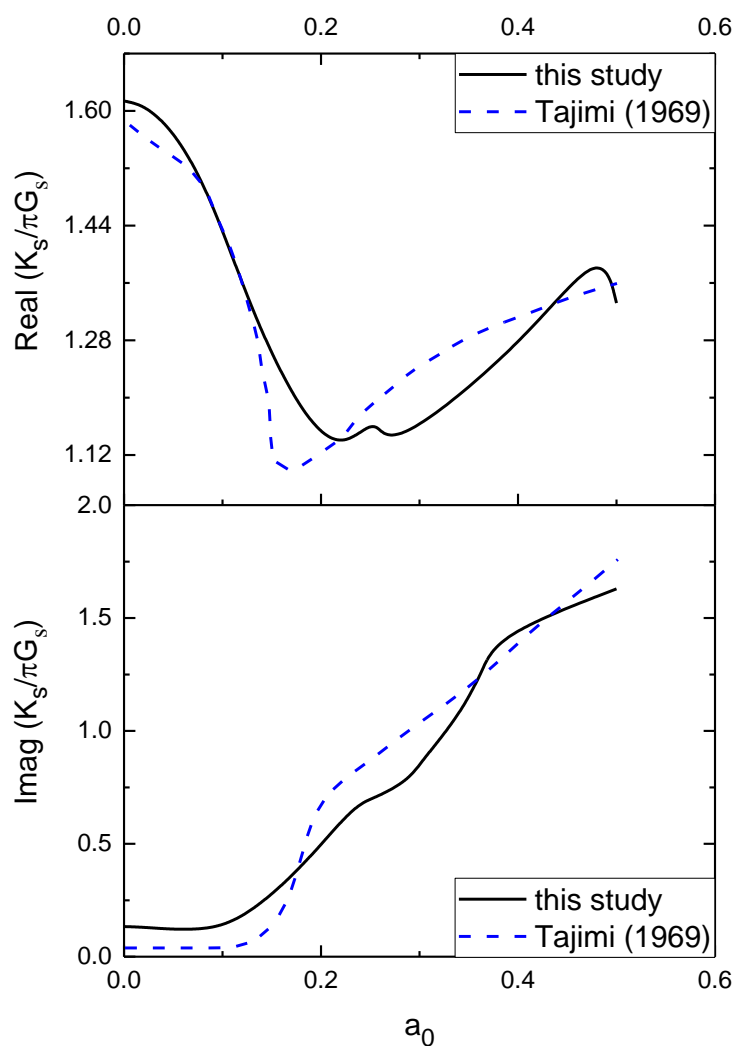


شکل ۲ مش بندی شمع تک با باربری نوک تحت بار جانبی

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- شمع تک با باربری نوک تحت بار جانبی

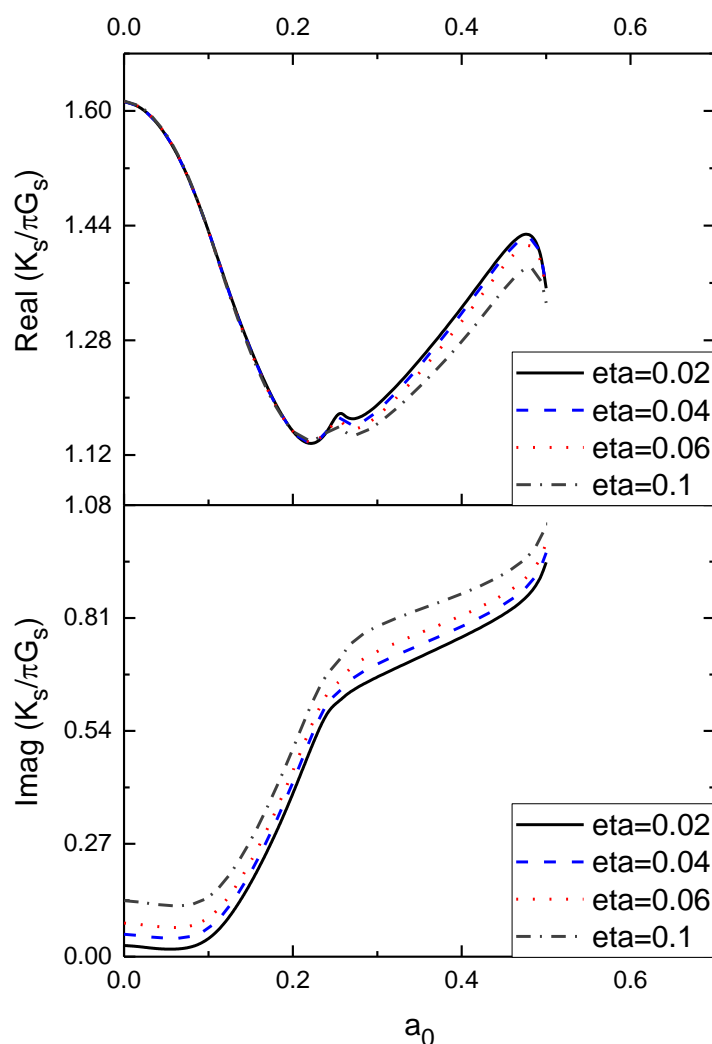
در این قسمت، شمع با باربری نوک در نظر گرفته شده است و پاسخ آن تحت اثر ارتعاش جانبی به دست آمده است. شکل ۳ مقایسه بین حل اجزا محدود و مدل تاجیمی را نشان می‌دهد. با استفاده از نرم افزار، قسمت حقیقی و موهومی سختی جانبی ( $K_s$ ) بر حسب فرکانس بی‌بعد ( $a_0$ ) با فرض میرایی ۰,۱ به دست آمده است. در شکل تغییرات قسمت حقیقی و موهومی سختی جانبی با فرکانس نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، قسمت حقیقی سختی دینامیکی تا فرکانس ۰,۲ کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد اما قسمت موهومی سختی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. نتایج به حل تاجیمی نزدیک است و اختلافی که در برخی نقاط مشاهده می‌شود به این دلیل است که به دلیل محدودیت، امکان ریزتر در نظر گرفتن مش از یک حد مجاز وجود نداشت.



شکل ۳ مقایسه نتیجه این تحلیل با مدل تاجیمی [۱] برای قسمت حقیقی و موهومی  $K_s$  در خاک همگن با فرض میرایی ۰٫۱

#### ۲-۴- تاثیر ضریب میرایی خاک

سختی شمع در میرایی‌های مختلف در نظر گرفته شده برای خاک، با استفاده از نرم‌افزار به دست آمده است و نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش میرایی، قسمت حقیقی سختی جانبی کاهش می‌یابد. این در حالی است که قسمت موهومی سختی جانبی، با افزایش میرایی افزایش می‌یابد.



شکل ۴ نمودارهای به دست آمده از نرم افزار برای میرایی‌های ۰٫۰۲، ۰٫۰۴، ۰٫۰۶ و ۰٫۱ برای قسمت موهومی و حقیقی سختی جانبی  $K_s$

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، پاسخ دینامیکی تک شمع با باربری نوک در خاک الاستیک همگن، در اثر ارتعاش جانبی، بررسی شده است و نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

۱. پاسخ دینامیکی شمع با مدل تاجیمی [۱] مقایسه شده است. نتایج به حل تاجیمی نزدیک است و اختلافی که در برخی نقاط مشاهده می‌شود به این دلیل است که به دلیل محدودیت امکان ریزتر در نظر گرفتن مش از یک حد مجاز وجود نداشت.
۲. افزایش میرایی، باعث کاهش قسمت حقیقی سختی جانبی و افزایش قسمت موهومی آن می‌شود.

## مراجع

- [1] Tajimi, H. (1969) Dynamic analysis of a structure embedded in an elastic stratum, In Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Chile.





- [2] Das, Y., and Sargand, S. (1999) *Forced vibrations of laterally loaded piles*, *International journal of solids and structures* 36, 4975-4989.
- [3] El Naggar, M., and Novak, M. (1996) *Nonlinear analysis for dynamic lateral pile response*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 15, 233-244
- [4] Mehndiratta, S., Sawant, V., and Samadhiya, N. (2014) *Nonlinear dynamic analysis of laterally loaded pile*, *Structural Engineering and Mechanics* 49, 479-489.
- [5] Bhowmik, D., Baidya, D., and Dasgupta, S. (2013) *A numerical and experimental study of hollow steel pile in layered soil subjected to lateral dynamic loading*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 53, 119-129.
- [6] Nogami, T., and Novak, M. (1977) *Resistance of soil to a horizontally vibrating pile*, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 5, 249-261.
- [7] Novak, M., and Nogami, T. (1977) *Soil-pile interaction in horizontal vibration*, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 5, 263-281.