

## تأثیر نسبت دفن‌شدگی پی‌های سطحی در پاسخ دینامیکی آنها به ارتعاش افقی ماشین‌آلات

فردین جعفرزاده<sup>۱\*</sup> و رامین قاسمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

<sup>۲</sup>کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

fardin@sharif.edu

**چکیده:** مهم‌ترین گام در روش‌های کنونی تحلیل دینامیکی پی ماشین‌آلات، تعیین توابع امیدانس دینامیکی است. در این روش‌ها فرض می‌شود که برهم کنش بین پی و خاک، یک رابطه خطی با جابجایی پی در کرنش‌های کوچک داشته باشد. این رابطه خطی بین برهم کنش پی و خاک با جابجایی پی توسط توابع امیدانس دینامیکی برقرار می‌شود. این توابع مختلط و وابسته به فرکانس بارگذاری هستند. در این مطالعه پاسخ دینامیکی پی‌های سطحی به کمک مدل‌سازی فیزیکی بررسی شده است. با استفاده از روش ریزش بارانی، ماسه بابلسر با چگالی یکنواخت درون یک محفظه فولادی ریخته شد که دیواره‌های داخلی و کف آن با یک لایه خاک اره پوشانده شده بود. هدف از استفاده از لایه خاک اره، جلوگیری از انعکاس امواج توسط جداره‌های جعبه و مدل‌سازی فضای نیمه بی‌نهایت است. سپس پی مربعی واقع در سطح خاک تحت ارتعاش اجباری قرار گرفت. بار دینامیکی وارده و پاسخ ارتعاشی آن از طریق ابزار سنجش روی پی‌ها اندازه‌گیری شد. ابزار سنجش روی پی‌ها شامل نیروسنج در محل اعمال بار به پی توسط مولد، یک شتاب‌سنج در جهت افقی و دو شتاب‌سنج در جهت قائم بود. در مرحله بعد با استفاده دوباره از روش ریزش بارانی ارتفاع خاک به نحوی افزایش یافت، که نسبت دفن‌شدگی پی به ۰/۵ رسید و آزمایش‌ها برای این حالت تکرار شد. در مرحله آخر با افزایش مجدد ارتفاع خاک، نسبت دفن‌شدگی پی به یک رسید و پاسخ پی در این حالت نیز بررسی شد. در انتها با بهره‌گیری از معادلات حرکت مناسب، پارامترهای هندسی و داده‌های ثبت‌شده، توابع دینامیکی امیدانس برای مود ارتعاشی افقی محاسبه گردید که به صورت نمودارهایی بر حسب فرکانس بی‌بعد ارائه شده است. مقایسه توابع امیدانس دینامیکی افقی برای نسبت‌های مختلف دفن‌شدگی، بیانگر افزایش توابع امیدانس دینامیکی در محدوده فرکانس بی‌بعد ۰ تا ۳/۵ است.

**کلمات کلیدی:** تابع امیدانس، پاسخ دینامیکی، نسبت دفن‌شدگی پی، مدل فیزیکی، پی ماشین‌آلات، بار هارمونیک افقی.

## The Effect of Foundation Embedment Ratio in Dynamic Response of Shallow Foundations to Horizontal Vibrations

F. Jaafarzadeh and R. Ghasemi

**Abstract:** In this research, horizontal dynamic response of foundation on homogeneous half-space was investigated using physical modeling. In order to carry out a comprehensive study on the effect of embedment depth ratio on horizontal impedance functions, 173 different tests in three series were conducted. In these tests, the embedment ratio of footing was increased from zero to 0.5 and finally reached to one by implementing the mentioned sand raining method. In each series of tests, the steady-state response of footing to horizontal vibrations was investigated. Using recorded data and related motion equations, foundation responses were analyzed. The obtained results were presented by graphs of horizontal impedance functions of square foundation on homogenous half-space against dimensionless frequency. Comparing horizontal impedance functions shows that an increase in embedment depth ratio resulting from amplifying impedance function coefficients up to dimensionless frequency of 3.5 Hz.

**Keywords:** Impedance Function, Dynamic response, Shallow Foundations, Physical Modeling, Machine Foundations, Horizontal Vibration.

**۱- مقدمه**

توابع امپدانس دینامیکی، برای توصیف رابطه خطی فرض شده بین نیروهای اندرکنشی و جابجایی‌های اندرکنشی، در مسائل اندرکنش خاک و سازه به کار می‌روند. این رابطه خطی فرض شده، تحلیل جابجایی دینامیکی را از حل معادلات دیفرانسیلی حرکت مقدور می‌سازد. توابع امپدانس دینامیکی معمولاً به صورت اعداد موهومی‌نمایش داده می‌شوند و قسمت‌های حقیقی و موهومی (به ترتیب سختی و میرایی دینامیکی) آن‌ها در مسائل ارتعاش پی‌ها وابسته به فرکانس نیروی محرک هستند. توابع امپدانس از روش‌های مختلف تئوری و عددی برای شرایط مختلف مانند نسبت‌های مختلف دفن‌شدگی پی، پروفیل‌های مختلف خاک (خاک نیم فضا یا خاک لایه‌ای)، محیط همگن یا ناهمگن ... به دست آمده است، جمع‌بندی این روش‌ها و نتایج در گزتاس (Gazetas) ۱۹۸۳ و نواک (Novak) ۱۹۸۷ موجود است.

از طرف دیگر، داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی در این مورد در ادبیات فنی بسیار نادر است و نتایج تجربی برای تایید روش‌های تئوری و کاربرد مطمئن آن‌ها در عمل ضروری است. پارامترهای مختلفی بر توابع امپدانس و در نتیجه پاسخ دینامیکی پی‌ها تأثیرگذارند. این پارامترها را می‌توان به پارامترهای مرتبط با شالوده (مانند ابعاد، شکل، صلیبیت، وزن، عمق دفن شالوده ...) و پارامترهای مرتبط با خصوصیات خاک (مثل سختی و ضخامت لایه و ...) و پارامترهای مرتبط با بار اعمالی به پی (مانند دامنه نیروی دینامیکی، فرکانس نیروی دینامیکی ...) تقسیم نمود. در این میان عمق دفن شالوده یا افزایش نسبت دفن‌شدگی پی‌های تحت ارتعاش همواره به عنوان راه حلی مد نظر مهندسیین بوده است، گرچه تعدادی تحقیق و مطالعه عددی و تحلیلی در رابطه با اثر این پارامتر بر پاسخ دینامیکی پی‌ها موجود است؛ نیاز به مطالعات تجربی و آزمایشگاهی در این زمینه کاملاً احساس می‌شود. از جمله تحقیقات تجربی در این زمینه می‌توان به مطالعات نی (Nii) ۱۹۸۷، اسدی‌نیک ۲۰۰۶ و قاسم زاده ۲۰۰۹ اشاره کرد، که همگی اثر عمق دفن شالوده را بر پاسخ دینامیکی پی‌ها در مود ارتعاشی عمودی بررسی نمودند. از این‌رو، با توجه به مطالعات قبلی صورت گرفته، در این مطالعه اثر نسبت دفن‌شدگی در پاسخ دینامیکی پی‌های سطحی به ارتعاش افقی به کمک مدل‌سازی فیزیکی بررسی شد.

**۲- ساخت مدل و مشخصات آن**

در این تحقیق که در دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف صورت گرفت، با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی پاسخ دینامیکی پی واقع بر نیم فضای همگن مورد بررسی شد. محیط خاکی در یک جعبه فلزی با طول و عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۸ متر، که وجوه داخلی آن با خاک اره (ماده‌ای با میرایی بالا) به ضخامت ۰/۱ متر پوشانده شده بود، ساخته شد. برای جلوگیری از انعکاس احتمالی امواج این پوشش خاک اره به ضخامت ۰/۲ متر در کف جعبه نیز ادامه داشت.

خاک مورد استفاده در این آزمایشات، ماسه بابلسر است که از سواحل بابلسر به محل آزمایشگاه حمل شد و پس از تمیز و خشک شدن برای آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این خاک طبق روش طبقه بندی متحد، ماسه بدانه بندی شده است. برای ساخت محیط خاکی از روش ریزش بارانی ماسه استفاده شد. در این روش با کنترل ارتفاع ریزش ماسه و شار ریزش آن از طریق شماره الک مورد استفاده، می‌توان به تراکم دلخواه ماسه رسید. نمونه مورد آزمایش با استفاده از الک با روزه‌های به قطر ۶ میلی-متر و ارتفاع ریزش ۰/۷ متر با تراکم نسبی  $54 \pm 5\%$  ساخته شد.

**۳- پیکربندی آزمایش و ابزار دقیق مورد استفاده****در آن**

پس ساخت نمونه خاکی سیستم، شامل پی و ستون روی آن، تحت ارتعاش افقی قرار می‌گیرد. نحوه انجام آزمایش به این صورت است که در ابتدا سیگنال بار هارمونیک (سینوسی) با دامنه و فرکانس مشخص توسط دستگاه B&K Signal Analyzer Unit 2035 تولید شده و به وسیله دستگاه B&K Power Amplifier تقویت شده و به مولد فرستاده می‌شود. مولد همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، بر روی فریمی که در بالای نمونه قرار دارد، نصب شده است و از طریق یک میله واسط که به بدنه ستون پیچ شده است، در جهت افقی به سیستم پی-ستون نیروی هارمونیک سینوسی وارد می‌کند. دامنه نیروی وارده، توسط نیروسنج موجود در محل اعمال بار از سوی مولد به ستون و حرکت پی در جهت افق توسط شتاب سنج نصب شده در جهت افق بر روی آن، ثبت می‌شود. این دو حسگر از نوع

شالوده بر روی دیسکت ذخیره شده و به رایانه منتقل می‌شود. داده‌های دو شتاب سنج قائم از طریق دستگاه جمع آوری داده‌ها مستقیماً به رایانه منتقل می‌شود. این پروسه برای ۵۶ فرکانس دیگر تا فرکانس ۸۶۸ هرتز نیز صورت می‌گیرد. با استفاده از کلیه داده‌های ذخیره شده و بهره‌گیری از کد MATLAB نوشته شده، تابع امپدانس محاسبه می‌شود.

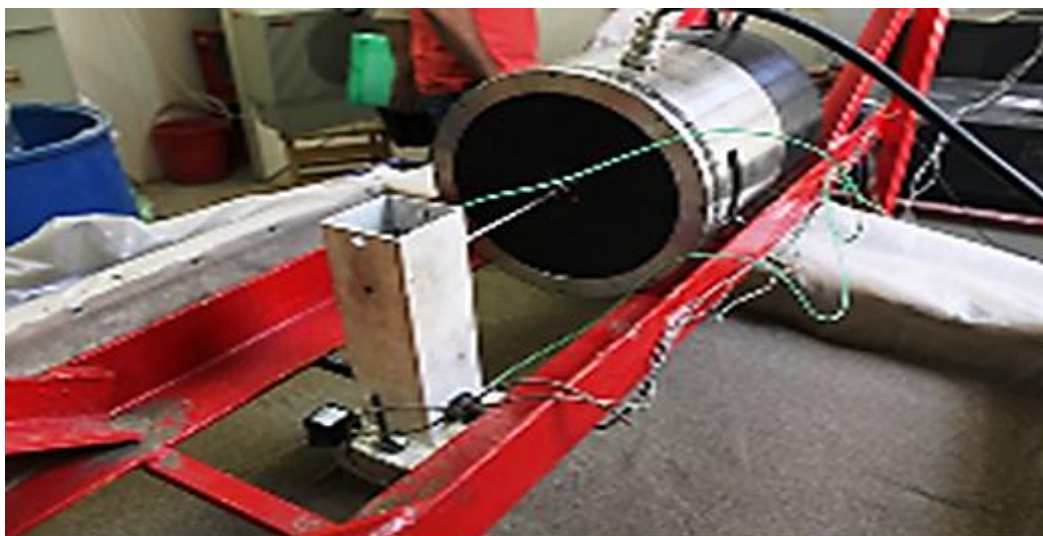
برای انجام سری آزمایش‌های ۳ فریم و مولد از روی محفظه کنار رفته و با استفاده از روش ریزش بارانی ماسه، ۲/۵ سانتی متر ماسه درون آن ریخته می‌شود. به این ترتیب عمق مدفون شالوده به ۲/۵ سانتی متر و نسبت دفن‌شدگی شالوده به ۰/۵ افزایش می‌یابد (شکل ۳). با برگرداندن فریم و مولد به روی محفظه، سری آزمایش‌های ۳ در ۵۸ فرکانس با تغییر فرکانس از ۴۳ هرتز تا ۸۹۸ هرتز صورت می‌گیرد.

برای انجام سری آزمایش‌های ۵ فریم و مولد از روی محفظه کنار رفته و با استفاده از روش ریزش بارانی ماسه، ۲/۵ سانتی متر ماسه درون آن ریخته می‌شود. به این ترتیب عمق مدفون شالوده به ۵ سانتی متر و نسبت دفن‌شدگی شالوده به ۱ افزایش می‌یابد (شکل ۴). با برگرداندن فریم و مولد به روی محفظه سری آزمایش ۵ در ۵۸ فرکانس با تغییر فرکانس از ۴۳ هرتز تا ۸۹۸ هرتز صورت می‌گیرد (شکل ۵).

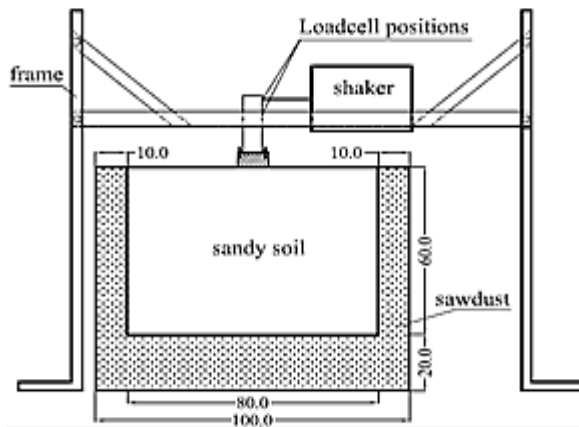
پیزوالکتریک هستند و به دستگاه Signal Analyzer Unit وصل می‌شوند.

در این تحقیق با انجام سه سری آزمایش (۱۷۳ آزمایش) اثر عمق مدفون شالوده بر روی پاسخ دینامیکی آن بررسی شد. در سری آزمایش ۱ پس ساخت محیط خاکی شالوده به همراه ستون پیچ شده به آن، در مرکز نمونه قرار گرفتند. در این حالت عمق مدفون شالوده و نسبت دفن‌شدگی صفر است (شکل ۱). سپس فریم به روی محفظه فلزی منتقل شد و مولد (که میله انتقال دهنده ارتعاش در درون حفره موجود در آن بسته شده بود) بر روی فریم در محل مناسب خود قرار گرفته و توسط قطعه اتصال به آن متصل شد. سپس نیروسنج به سر آزاد میله انتقال دهنده ارتعاش متصل شد و نیروسنج در محل سوراخ ایجاد شده در جدار ستون در ارتفاع ۱۹ سانتی‌متری به آن پیچ گردید (شکل ۲). با آماده شدن مدل، بار دینامیکی با فرکانس ۲۸ هرتز و یک ولتاژ مشخص (gain) در دستگاه تحلیل سیگنال ایجاد و پس از تقویت در دستگاه تقویت از طریق مولد به شالوده وارد شد. با مشاهده دامنه نیروی ایجاد شده در کانال ورودی نیروسنج در دستگاه تحلیل سیگنال، مقدار gain تغییر داده می‌شود. این روند تکرار می‌شود، تا بار با دامنه مورد

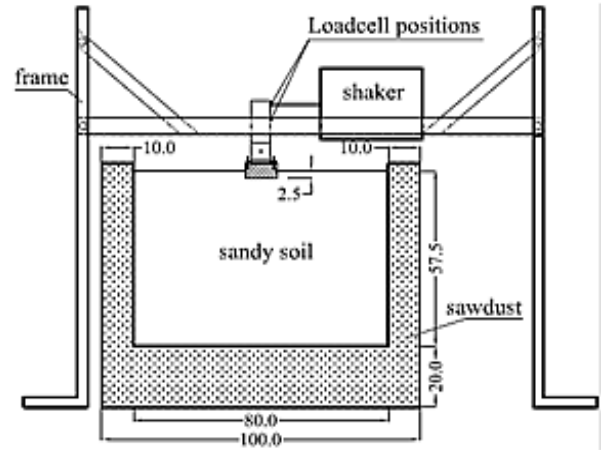
نظر (۱۰ نیوتن در این سری از آزمایش‌ها) اعمال شود. سپس داده‌های دو کانال ورودی دستگاه تحلیل داده‌ها یعنی شتاب شالوده در جهت افقی و نیروی افقی وارد بر



شکل ۱: مدل فیزیکی برای حالت پی بدون عمق دفن‌شدگی



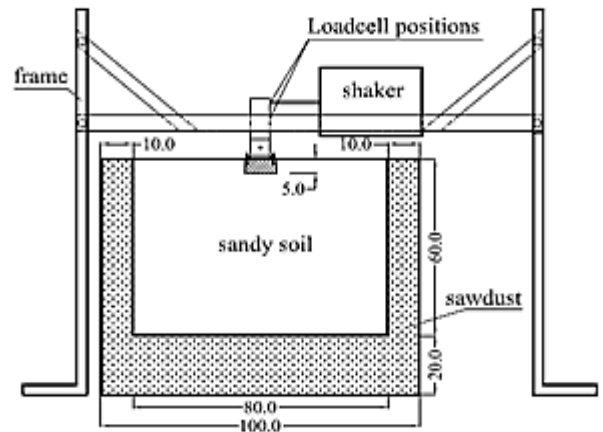
شکل ۲: نمای جانبی مدل فیزیکی برای حالت پی بدون عمق دفن‌شدگی (اندازه‌ها به سانتی متر هستند).



شکل ۳: نمای جانبی مدل فیزیکی برای حالت پی نیمه مدفون (اندازه‌ها به سانتی متر هستند).



شکل ۵: نمای جانبی مدل فیزیکی برای حالت پی کاملاً مدفون (اندازه‌ها به سانتیمتر هستند).



شکل ۴: نمای جانبی مدل فیزیکی برای حالت پی کاملاً مدفون (اندازه‌ها به سانتی متر هستند).

می‌رسد در فرکانس‌های بی‌بعد بالا (نزدیک ۵) این اثر از بین می‌رود.

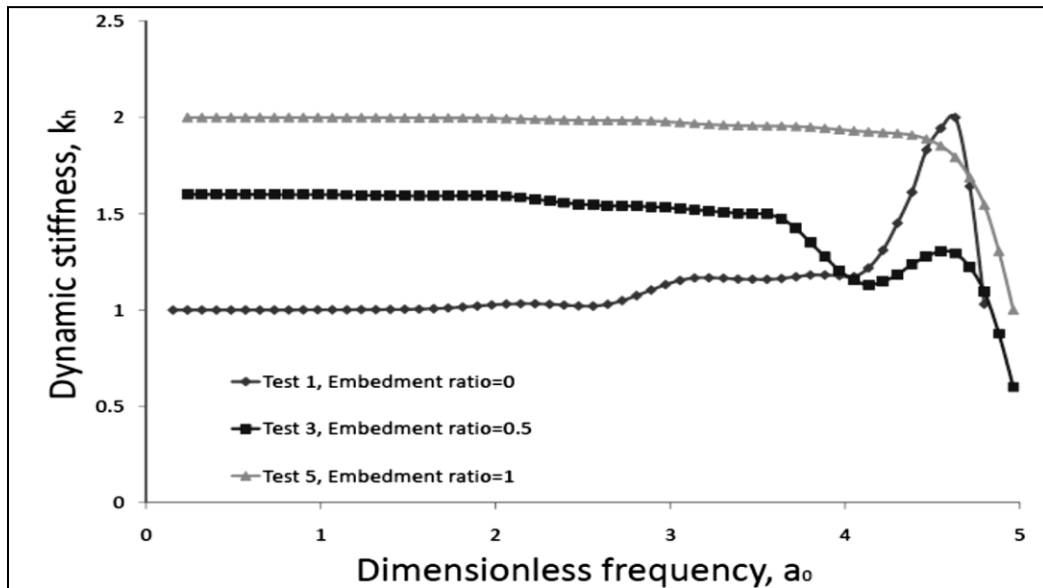
به طور مشابه در شکل ۷ قسمت موهومی (میرایی دینامیکی) توابع امپدانس افقی به دست آمده برای سه حالت پی واقع در سطح، نیمه مدفون و کاملاً مدفون ارائه شده است. با توجه به شکل ۷ می‌توان دید که افزایش عمق دفن‌شدگی، باعث افزایش مقدار میرایی دینامیکی در محدوده فرکانس بی‌بعد ۰ تا ۵ می‌شود.

مشاهده می‌شود که حداکثر تا فرکانس بی‌بعد ۲ می‌توان از ثابت بودن مقدار سختی و میرایی دینامیکی اطمینان حاصل کرد و غالباً در نسبت دفن‌شدگی‌های بالاتر ثابت ماندن مقدار آن‌ها تا فرکانس‌های بی‌بعد بیشتری ادامه دارد.

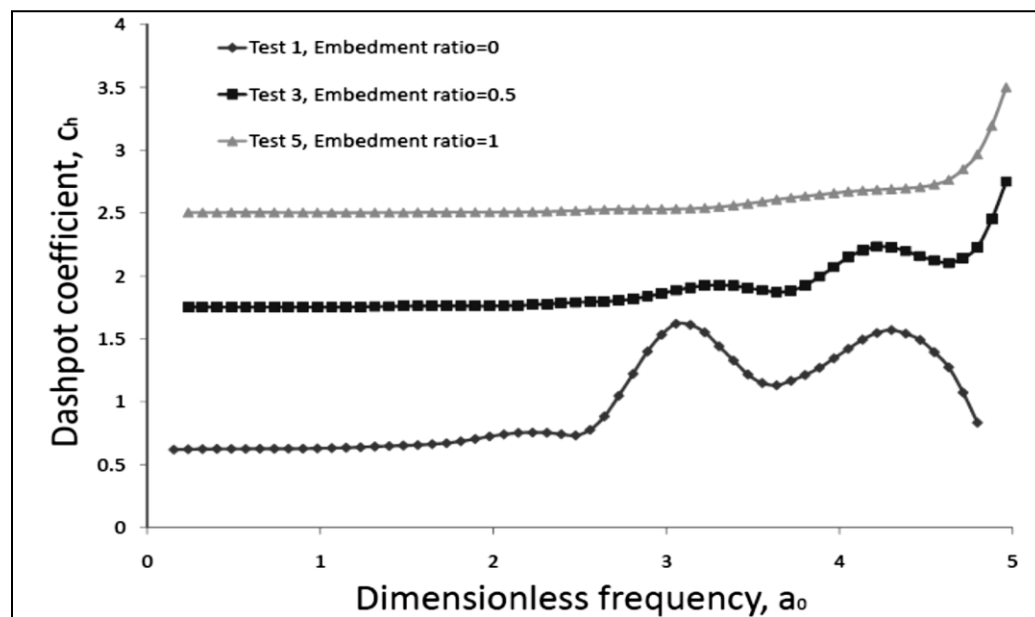
#### ۴- نتایج آزمایش‌ها و بحث بر روی آن‌ها

با استفاده از داده‌های ثبت شده و با بهره‌گیری از معادلات حرکت مناسب و پارامترهای هندسی، پاسخ پی تحلیل شد. با توجه به کاربرد فراوانی توابع امپدانس در روش‌های نوین تحلیل ارتعاش پی‌ها و طراحی پی ماشین‌آلات، نتایج به صورت نمودار تابع امپدانس افقی پی مربعی واقع بر نیم فضای بی‌نهایت همگن بر حسب فرکانس بی‌بعد ارائه شده است.

در شکل ۶ قسمت حقیقی (سختی دینامیکی) توابع امپدانس افقی به دست آمده برای سه حالت پی واقع در سطح، نیمه مدفون و کاملاً مدفون ارائه شده است. در مجموع با توجه به شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش عمق دفن‌شدگی باعث افزایش مقدار سختی دینامیکی در محدوده فرکانس بی‌بعد ۰ تا ۳/۵ می‌شود. از طرفی به نظر



شکل ۶: بررسی اثر نسبت دفن‌شدگی بر سختی دینامیکی



شکل ۷: بررسی اثر نسبت دفن‌شدگی بر میرایی دینامیکی

## ۵- نتیجه‌گیری

افزایش عمق دفن‌شدگی پی‌های تحت ارتعاش همواره به عنوان راه حلی مد نظر مهندسیین بوده است. گرچه تعدادی تحقیق و مطالعه عددی و تحلیلی در رابطه با اثر این پارامتر بر پاسخ دینامیکی پی‌ها موجود است؛ نیاز به مطالعات تجربی و آزمایشگاهی در این زمینه کاملاً احساس می‌شود؛ لذا در این تحقیق اثر افزایش عمق دفن‌شدگی و نسبت دفن‌شدگی پی بر روی پاسخ

دینامیکی آن در مود ارتعاشی افقی با استفاده از مدل سازی فیزیکی این مساله مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به کاربرد گستره توابع امپدانس در مسائل ارتعاش پی‌ها، نتایج به صورت گراف‌های توابع امپدانس افقی بر حسب فرکانس بی‌بعد ارائه شدند. توابع امپدانس به صورت نسبت نیرو اعمال شده به پی، به جابجایی ایجاد شده در پی، تعریف می‌شوند.

- [3] Gazetas, G. *Analysis of machine foundation vibration: State of the art*, Soil Dynamics & Earthquake Engineering, Vol.3, No. 1, pp. 2-42, **1986**.
- [4] Gazetas, G., Edited by H. Y. Fang, Van Nostrand Reinhold, *Foundation Vibrations*, Chapter 15 in *Foundation Engineering Handbook*, 2nd edition, New York, pp. 553-593, **1991a**.
- [5] Gazetas, G. *Formulas and charts for impedance of surface and embedded foundations*. Journal of Geotechnical Engineering, ACSE, Vol.117, No. 9, pp. 1363-1381, **1991b**.
- [6] Gazetas, G., & Stokoe, K. H., II. *Free vibration of embedded foundations: theory versus experiment*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. Vol.117, No. 9, pp. 1382-1401, **1991**.
- [7] Ghasemzadeh M., H. *Study of dynamic response of shallow foundations resting on sand to harmonic loading by physical model tests*, M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology, Iran, **2009**.
- [8] Ghassemi R. *Investigation of Dynamic Response of Shallow Foundations on Sandy Soil to Horizontal Harmonic Loading by Physical Model Tests*, M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology, Iran, **2011**.
- [9] Jafarzadeh F. & Ghassemi R. *Investigation of Dynamic Response of Shallow Foundations to Horizontal Vibrations*, International Conference on Geotechnics for Sustainable Development (GEOTEC), October, Hanoi, Vietnam, ISBN 978-604-82-000-8, **2011**.
- [10] Nii, Y., *Experimental half-space dynamic stiffness*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.113, No. 11, pp. 1359-1373, **1987**.

با توجه به مقادیر توابع امیدانس به دست آمده از آزمایش‌های مدل فیزیکی، اثر دینامیکی بر اجزای تابع امیدانس به شرح زیر است:

- افزایش عمق دینامیکی باعث افزایش مقدار سختی دینامیکی در محدوده فرکانس بی بعد ۰ تا ۳/۵ می‌شود.
- افزایش عمق دینامیکی باعث افزایش مقدار میرایی دینامیکی در محدوده فرکانس بی بعد ۰ تا ۵ می‌شود.
- در مجموع، افزایش عمق دینامیکی باعث افزایش توابع امیدانس دینامیکی در محدوده فرکانس بی بعد ۰ تا ۳/۵ می‌شود. از طرفی مشاهده می‌شود، که توابع امیدانس به دست آمده از سه سری آزمایش تا حدود فرکانس بی بعد ۲ مستقل از فرکانس هستند و در صورت استفاده از مقادیر سختی استاتیکی مناسب، می‌توان اثر عمق دینامیکی را به طور مناسب در این بازه فرکانسی در نظر گرفت.
- در کل، نتایج ارائه شده در این تحقیق می‌تواند در تایید مطالعات قبلی صورت گرفته در این زمینه و تحقیقات آتی به کار روند، با توجه به بازه وسیع توابع ارائه شده، این نتایج می‌توانند، برای توسعه مدل‌های عددی و پیشنهاد راه حل‌های تئوری این مسئله مورد استفاده قرار گیرند.

## مراجع

- [1] Asadi Nik, A. *Study of dynamic response of shallow foundations resting on sand by physical modeling*, M.Sc. Thesis, Sharif University of Technology, Iran, **2006**.
- [2] Dobry, R., Gazetas, G., and Stokoe, K. H., II. *Dynamic response of arbitrary shaped foundations: experimental verification*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.112, No. 2, pp. 136-154, **1986**.