

جدول (۶) جایابی توأم خازن و راکتور شنت و ULTC در شبکه ۱۱۸ شینه IEEE.

ظرفیت خازن (pu) جهت بهترین اندیس توأم	ظرفیت (pu) جهت بهترین اندیس پروفیل	ظرفیت (pu) جهت بهترین اندیس پایداری	شین های انتخابی
۰/۱۰	-۰/۱	-۰/۱۵	۲۰
۰/۳	-۰/۱۶	-۰/۳	۲۱
۰/۳	۰/۲	-۰/۴	۲۲
۰	-۰/۲	۰/۱۰	۳۳
-۰/۱۶	-۰/۳	-۰/۱۶	۴۳
-۰/۱۵	-۰/۱	-۰/۴	۴۴
۰	۰/۲	-۰/۱	۴۵
۰/۳	-۰/۲	-۰/۱۵	۵۲
۰/۴	-۰/۱۵	-۰/۱۵	۵۳
۰/۱۰	-۰/۴	-۰/۱۵	۵۷
۰/۱۰	-۰/۴	-۰/۱۵	۵۸
-۰/۱۶	-۰/۴	-۰/۱۶	۸۲
-۰/۱۶	-۰/۱	-۰/۱۶	۸۳
-۰/۴	۰/۲	-۰/۳	۸۴
-۰/۱۶	-۰/۲	-۰/۱۶	۸۶
-۰/۱۵	-۰/۲	-۰/۱۶	۸۸
-۰/۱۶	-۰/۳	-۰/۱۶	۹۵
-۰/۴	۰/۱۰	-۰/۱۶	۱۰۱
۰/۴	-۰/۲	۰/۱۰	۱۱۷
-۰/۱۵	-۰/۴	-۰/۱۵	۱۱۸
نصب تجهیزات ULTC جهت بهترین اندیس توأم	نصب تجهیزات ULTC جهت بهترین اندیس پروفیل	نصب تجهیزات ULTC جهت بهترین اندیس پایداری	خطوط مجاز
خیر	بلی	بلی	۱۰
خیر	بلی	بلی	۲۹
خیر	بلی	خیر	۲۲
۵۱/۸۴	۴۷/۷۹	۵۲/۷۳	اندیس پایداری
۰/۱۱۶۲	۰/۰۲۸۲	۰/۱۵۸۲۳	اندیس پروفیل
۱۵۲۱۰	۲۲۱۵۶	۲۰۲۶۱	اندیس هزینه

- [1] B.M. Weedy, B.B. Cox, "Voltage Stability of Radial Power Links", Proc. IEE, Vol. 115, pp.528-536, 1968.
- [2] V. Ajjarapu, B. Lee, "Bibliography on Voltage Stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, pp. 112-123, 1998.
- [3] NERC Interconnection Dynamic Task Force, "Survey of Voltage Collapse Phenomena", North American Reliability Council, 1991.
- [4] IEEE Working Group on Voltage Stability "Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis", 1993.
- [5] CIGRE Task Force 38.02.12 "Criteria and Countermeasure for Voltage Collapse", April 1994.
- [6] C.W. Taylor, "Power System Voltage Stability", NY, McGrawHill, 1994.
- [7] P. Kundur, "Power System Stability and Control", NY, McGrawHill, 1994.
- [8] K.N. Miu, G. Darling, "Capacitor Placement, Replacement and Control In Large - scale Distribution Systems by a GA - Based Two - stage Algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 3, pp 1160-1166, Aug 1997.
- [9] H.D. Chiang, G. Darling, "Optimal Capacitor Placement, Replacement and Control in Large-scale Unbalanced Distribution Systems.: System Modelling and a New Formulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 10, No. 1, pp. 356-362, Feb 1995.
- [10] V. Ajjarapu, P. Lau, S. Battula, "An Optimal Reactive Power Planning Strategy Against Voltage Collapse", IEEE Trans.on Power Systems, Vol.9, No. 2, pp. 906-917, May 1994.
- [11] A;M. Chebbo, M.J.H. Sterling "Reactive Power Dispatch Incorporating Voltage Stability", IEE Proceeding C [generation, transmission and distribution], Vol 139, No.3, pp. 253-260, May 1992.
- [12] K. Iba, "Reactive Power Optimization By Genetic Algorithm", IEEE Trans.on Power Systems, Vol,9, No. 2, pp. 685-692, May 1994.
- [13] N. Flatabo. R. Ogdal, T. Carlsen, "Voltage Stability Condition in Power Transmission System Calculated by Sensitivity Methods", IEEE Trans.on Power System, Vol.5, No.4, pp. 1286-1293, Nov. 1990.
- [14] S.S. Rao, "Optimization Techniques (Theory And Applications)", 1980.
- [15] D.E. Goldberg, "Genetic Algorithms In Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [16] M.M. Begovic, A.G. Phadke, "Control of Voltage Stability Using Sensitivity Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No.1, pp. 114-123, Feb 1992.
- [17] V. Ajjarapu, C. Christy, "The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 416-423, Fed 1992.

بررسی خط لوله مدفون در اثر ارتعاش دینامیکی

حسین رجایی
استادیار

علیرضا میرزاگل تبار روشن
دانشجوی دکتری سازه

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

به منظور ارزیابی پارامترهای استاتیکی و دینامیکی رفتار بین خاک اطراف و لوله مانند سختی استاتیکی، سختی دینامیکی، میرایی و جرم افزوده سهم خاک که در رفتار دینامیکی با جرم لوله مشارکت می کند، مدل تحلیل عددی پیشنهاد شده و بر مبنای آن مدل آزمایشگاهی طراحی و تدارک دیده شده است. مدل عددی و فرمولاسیون پیشنهادی این مقاله بر مبنای بسط اصول تئوری دینامیک سازه ای و ارتعاشات مکانیکی و در فضای زمان و فرکانس و به کمک تبدیلات فوریه شکل گرفته است. در طراحی و تدارک مدل آزمایشگاهی از سیستم مولد استاتیکی و دینامیکی نام دستگاه Servo-Hydraulic که خود حاوی Actuator و Loadcell و سیستم های کامپیوتری دریافت اطلاعات است استفاده گردیده است. همچنین سیستم جعبه و خاک و لوله مدفون، سیستم دمپینگ کاهش بازتاب امواج، سیستم مدل های نیرویی و جابجایی، سیستم اندازه گیری های دقیق (Sensors) جابجایی محوری لوله ها، سیستم های کامپیوتری ضبط و نمایش، طراحی و ساخته شده و در مجاورت یکدیگر آرایش یافته است. مقایسات بعمل آمده نشان از نائید نتایج مرکب از فرمولاسیون پیشنهادی و مدل آزمایشگاهی دارد. می توان با استفاده از این مدل و روش، پارامترهای سختی های استاتیکی و دینامیکی و جرم افزوده سهم خاک را تحت هر شرایطی یافت. بررسی ها نشان می دهند عواملی از قبیل عمق دفن لوله، قطر لوله، جنس لوله، تراکم خاک، درصد رطوبت و میزان دامنه و فرکانس تحریک موج هارمونیک در تغییر پارامترهای سختی استاتیکی و دینامیکی بین خاک و لوله مؤثرند.

کلمات کلیدی

خط لوله، مدفون، محوری، دینامیک، ارتعاش، شریان حیاتی

Investigation of Buried Pipeline Due to Dynamic Vibration

A. M. G. Roshan
Ph. D Student

H. Rajaei
Associate Professor

Civil Engineering Department ,
Amirkabir University of Technology

Abstract

A numerical model based on the laboratory testing method for buried pipeline is presented to study the effect the effect of some parameters such as static & dynamic stiffness, damping and added mass for pipe and surrounding material. The model set up is based on the theory of structural dynamic and mechanical vibration with application of the extension of Fourier transfer in time and frequency domain.

The loading system through the Servo-hydraulic, actuator and load cell which all are connected to the computer provide the control of laborator testing procedure.

The pipe and surrounding material is modelled by box with a suitable scale and is equipped with some measuring system for controlling the effect of damping and relative longitudinal displacement for different section of the pipe.

Comparison of the laboratory results with the other references confirms the testing procedure. However, the investigation shows that some parameters such as static and dynamic stiffness, added mass for different conditions can be estimated for different buried depth and diameter of pipeline. The effect of pipe materials, soil compactness, soil water content, frequency and amplitude of the harmoniuc loading are studied in this paper.

Keyword

Pipeline, buried, Axial, Dynamic, Vibration, pipeline

مدل کابلی که هر کدام از مدل‌ها به دو روش کلی سیستم پیوسته (Continuous) و یا سیستم مجزا (Discrete) قابل شبیه‌سازی هستند. هر کدام از روش‌ها و مدل‌های مذکور دارای مزایا و معایبی مخصوص به خودند که با توجه به فاکتور دقت و سهولت ارزیابی می‌شوند.

از پارامترهای مهم در تحلیل این نوع سازه‌ها، موضوع رفتار لوله‌ها با خاک اطراف در مدل‌سازی تیر بر بستر ارتجاعی است که توسط محققان مختلف، روابطی به صورت پیشنهادی ارائه شده است و غالباً از تعدد برخوردار بوده و بعضاً تناقضی را نسبت به همدیگر نشان می‌دهد. مطابق اصول جهت یافتن مقادیر واقعی باید با ساخت مدل و شبیه‌سازی‌های مناسب با توجه به شرایط موجود، به آزمایش متوسل شد که در این مقاله یک روش فرمولاسیون و مدل آزمایشگاهی پیشنهاد و ارائه می‌شود تا بتوان رفتار لوله مدفون را ناشی از ارتعاش محوری مورد بررسی و ارزیابی قرار داد.

فرمولاسیون پیشنهادی

در عمل خط لوله در عمقی زیر خاک مدفون است و از ناحیه خاک فشارهای محیطی به لوله می‌رسد که این فشار طبق تئوری مارستون (Mareston) و یا German [7] تابعی از خواص خاک و لوله است. معمولاً یک خط لوله در داخل خاک تراشه‌ای قرار داده شده و سپس مدفون می‌گردد. معادله تعادل دینامیکی ارتعاش محوری یک المان از خط لوله مدفون با صرفنظر از تأثیر جرم سهم خاک که در تولید ارتعاش مشارکت می‌کند به فرم زیر در می‌آید [8].

$$\rho_p A_p \frac{d^2 u(x,t)}{dt^2} - E_p A_p \frac{d^2 u(x,t)}{dx^2} + C_a \frac{du(x,t)}{dt} + k_a u(x,t) = k_a u_g(x,t) \quad (1)$$

رابطه (۱) معادله حاکم یک سیستم پیوسته را نشان می‌دهد که با اعمال شرایط اولیه و مرزی و حل معادله دیفرانسیل مذکور می‌توان تابع تغییر مکان $u(x,t)$ را برحسب مقادیر ثابت $\rho_p, A_p, E_p, C_a, K_a$ بدست آورد. اگر المان به طول L از لوله به دو نقطه گره‌ای (۱ و ۲) در سیستم مجزا مدل گردد، دارای درجات آزادی دوگانه شکل (۱) خواهد بود: در حالت استاتیکی می‌توان سیستم خاک و لوله را به شکل (۲) شبیه‌سازی نمود که فنرهای اطراف مربوط به عامل رفتار لوله با خاک اطراف در مدل وینکلر (Winkler) می‌باشد. وجود

اثر انتشار امواج ناشی از زلزله، عامل مهمی جهت ایجاد خسارت بر سیستم‌های خطوط لوله می‌باشد. هنگامیکه امواج زلزله از منبع خود منتشر می‌شوند، باعث ایجاد تکان‌هایی در زمین می‌گردند که یکی از مشخصه‌های مهم تکان‌های زمین، حرکات ناهماهنگ آن می‌باشد که اگر یک خط لوله در طول این دو نقطه قرار داشته باشد، در اثر اختلاف فاز، کرنش‌ها و انحنای در طول آن به وجود می‌آید [1].

لو (C. H. Loh) و ونگ [2] پاسخ یک خط لوله تحت امواج مختلف را به روش تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. آنها در مدلسازی از سیستم مدل جرم و فنر استفاده کردند و از سهم میرایی به علت کوچکی صرفنظر کردند. هدف از بررسی، تأثیر میزان جابجایی زمین بر روی خط لوله مدفون بوده است که تحقیقات آنها نشان می‌دهد جابجایی زمین شدیداً بر لوله‌ها اثر می‌گذارد.

چنگ و جر (F. Y. Cheng & J. F. Ger) [3] تحلیل سازه خطوط لوله در حالت سه بعدی و با شش مؤلفه آزادی در هر گره را در حالت دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. معادله حاکم بر مسئله بصورت یک رابطه تعادل دینامیکی با احتساب اثرات میرایی و اینرسی در نظر گرفته شد. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد درحالت شبکه‌ای، رفتار خمشی بسیار مهم می‌شود و لازم است مسئله سه بعدی مورد بررسی قرار گیرد. بررسی مشابه توسط ونگ و و چنگ [4] و تاکادا (S. Takada) [5] انجام گرفت با این تفاوت که از اثرات سهم اینرسی و میرایی به علت کوچکی صرفنظر نمودند و از یک تحلیل استاتیکی کوشی استفاده کردند.

گودینک (E. C. Gooding) [6] در آنالیز لوله‌های مدفون تحت اثر امواج زمین، پارامترهای مدول عکس العمل لایه زیری و اصطکاک در میان سطح خاک و لوله را در مدل‌سازی و حل معادلات، محاسبه نیروها و لنگرها مهم می‌داند و معتقد است تعیین آنها براحتی امکان‌پذیر نیست و نباید به هر مقداری اعتماد کرد.

در حالت کلی مدل مشخص که قادر به پیش‌بینی رفتار لوله‌های مدفون در برابر کلیه شرایط مختلف سازه‌ای باشد ارائه نشده است. با این وجود جهت بررسی رفتار این نوع سازه‌ها روش‌های متعددی با مدل‌های مختلفی ارائه گردیده است که هر یک مبتنی بر فرضیاتی متناسب با دانش عصر خویش بوده و نتایجی را به همراه داشته‌اند. مدل‌های تحلیلی که تا کنون ارائه شده‌اند عبارتند از: مدل تیر روی بستر الاستیک با یکسری فنر و دمپر (مدل وینکلر)، مدل نیم فضای الاستیک، مدل کرنش مسطح، مدل پوسته‌های استوانه‌ای و

$f(t)$ در زمان با نیرو در فضای فرکانسی $F(\omega)$ با تبدیلات فوریه نسبت به هم رابطه دارند.

از لحاظ تئوری دینامیک سازه‌ای، $k_d(t)$ (سختی دینامیکی در محدوده زمان) همان جواب مسئله به ازای واحدایمپالس است که با تبدیل فوریه از آن، پاسخ فرکانسی سیستم یا همان سختی دینامیکی در محدوده فرکانس بدست می‌آید.

در حالت استاتیکی، سختی دینامیکی معادل سختی استاتیکی K و برابر است با:

$$K_d(\omega) = K \quad (7)$$

در حالت دو درجه آزادی تابع امپدانس یا ماتریس سختی دینامیکی به شکل زیر بدست می‌آید:

$$H_{11}(\omega) = (M_P + M_{add})(-\omega^2) + C(i\omega) + k_{11} \quad (8)$$

$$H_{21}(\omega) = k_{21} \quad (9)$$

$$H_{12}(\omega) = k_{12} \quad (10)$$

$$H_{22}(\omega) = (M_P + M_{add})(-\omega^2) + C(i\omega) + k_{22} \quad (11)$$

روابط فوق را می‌توان به فرم ماتریسی زیر آرایش داد:

$$\begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & H_{12}(\omega) \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) \end{bmatrix} = -\omega^2 \begin{bmatrix} M_P + M_{add} & 0 \\ 0 & M_P + M_{add} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \quad (12)$$

رابطه (۱۲) همان تعمیم یافته رابطه (۵) می‌باشد، که عناصر ماتریس سختی دینامیکی را بر حسب عناصر ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی استاتیکی نشان می‌دهد. می‌توان با استفاده از روابط مذکور و نیز با انجام آزمایش‌های دینامیکی (ارتعاش محوری) در نقاط گره‌ای و به ازای فرکانس‌های مختلف و دادن ورودی‌ها و اخذ خروجی‌ها، اعضاء ماتریس سختی دینامیکی را تحت شرایط مختلف یافت. سختی بین خاک و لوله k در جهت محوری به روش فرمولاسیون ذیل و نیز با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست می‌آید که بزرگی و تغییرات آن با توجه به رفتار بین خاک و لوله تعیین می‌گردد.

با توجه به اصل تعادل بر روی یک المان می‌توان نوشت:

سختی بین لوله با خاک‌های اطراف سبب می‌گردد، سختی معادل گره در نقاط ۱ و ۲ به مقدار $E_p \cdot A_p/L$ صادق نباشد بلکه سختی K_p در آن اثر می‌گذارد.

معادله تعادل دینامیکی را در جهت محوری و در سیستم مجزا و با احتساب جرم افزوده سهم خاک (M_{add}) به فرم معادله (۲) می‌توان بیان نمود:

$$\begin{bmatrix} M_P + M_{add} & 0 \\ 0 & M_P + M_{add} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

معادله (۲) را می‌توان به فرم ساده‌تر ذیل بیان نمود:

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \{f(t)\} \quad (3)$$

بررسی تاریخچه‌ای نشان می‌دهد مقدار M_{add} چندان قابل توجه نیست و به علت اثرات ناچیز آن می‌توان از آن صرف نظر نمود که در این مقاله M_{add} تأثیر داده می‌شود.

معادله (۳) را می‌توان برای تعداد درجات آزادی بالاتر از دو درجه نیز تعمیم داد.

در صورت ارائه رابطه (۳) به فرم رابطه (۴)، K_d را سختی دینامیکی یا تابع امپدانس نامند:

$$[K_d] \{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (4)$$

در حالت یک درجه آزادی تابع امپدانس در محدوده فرکانس به فرم معادله (۵) نشان داده می‌شود

$$K_d(\omega) = -\omega^2 M + K + i\omega c \quad (5)$$

پارامترهای $k_d(\omega)$ با $k_d(t)$ تبدیل فوریه یکدیگر هستند و لذا فضای فرکانسی را به فضای زمانی و یا بالعکس تبدیل می‌سازند و در روابط ذیل نیز صدق می‌کنند:

$$k_d(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} k_d(t) e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

$$k_d(t) = \int_{-\infty}^{\infty} k_d(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

مشابه رابطه $k_d(t)$ با $K_d(\omega)$ ، تغییر مکان $x(t)$ در فضای زمان با تغییر مکان در فضای فرکانسی $X(\omega)$ و نیز نیرو

$$F_0 - F_1 = \Delta F_1 \quad (13)$$

$$\Delta F_1 = P \cdot L_1 \cdot \tau_1 \quad (14)$$

قابل ذکر است در این فرمولاسیون، تغییرات اصطکاکی بین دو گره یکسان فرض شده است. مقدار تنش برشی در هر المان به صورت ذیل قابل بیان است:

$$\tau_1 = \frac{\Delta F_1}{P \cdot L_1} = \frac{F_0 - F_1}{P \cdot L_1} \quad (15)$$

برای المان i ($i=1, \dots, 6$) روابط (13) تا (15) را به صورت زیر می توان بیان نمود:

$$\Delta F_i = F_{i-1} - F_i \quad (16)$$

$$\Delta F_i = P \cdot L_1 \cdot \tau_i \quad (17)$$

$$\tau_i = \frac{(F_{i-1} - F_i)}{P \cdot L_1} \quad (18)$$

از طرفی مقدار F_1 را چنین می توان نوشت:

$$F_1 = \sigma_1 \cdot A_p = E_p \cdot \varepsilon_1 \cdot A_p \quad (19)$$

که با فرض کرنش یکسان در طول المان، می توان آنرا برحسب تغییر مکان های دو گره بیان نمود:

$$\varepsilon_1 = \frac{u_2 - u_1}{L_1} \quad (20)$$

در نتیجه F_1 برابر خواهد شد با:

$$F_1 = E_p \cdot A_p \left(\frac{u_2 - u_1}{L_1} \right) \quad (21)$$

نظیر به اینکه E_p ، A_p و L_1 در طول لوله یکسان است می توان نیروهای اصطکاکی هر المان را به تغییر مکان نسبی طولی آن المان نسبت داد. در نتیجه نیروی خارجی وارده به تناسب تغییر مکان نسبی بین دو گره یک المان، به هر المان داده می شود. پس از یافتن نیروهای اصطکاکی هر المان به ازای یک نیروی خارجی، عمل مذکور برای نیروی دیگر خارجی F_0 می توان تکرار نمود. از روش متوسط گیری جهت یافتن سختی استفاده می شود. سختی دینامیکی بین خاک و لوله و میزان میرایی و سهمی از جرم خاک از جمله پارامترهای

دینامیکی اند که با استفاده از روابط دینامیک سازه ای و آزمایشات بعمل آمده تعیین می گردند. سختی دینامیکی K_d یا تابع امپدانس در رابطه (۴) صدق می کند، که در حالت یک درجه آزادی و در محدوده فرکانس، سختی دینامیکی طبق رابطه (۵) بدست می آید.

از لحاظ دینامیک سازه ای جواب تغییر مکان دینامیکی به صورت زیر بیان می شود:

$$u(t) = \frac{u_0}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin \left(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t \right) \quad (22)$$

رابطه بین ضریب میرایی ξ و مقدار C چنین بدست می آید:

$$C = 2\xi m \omega_n = 2\xi m \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (23)$$

m برابر است با جرم لوله و جرمی از سهم خاک که با جرم لوله مشارکت می کند. همانطوریکه از روابط ملاحظه می گردد، سختی دینامیکی k_d و ضریب میرایی (ξ) و نیروی میرایی واحد سرعت (C) وابسته به جرم سیستم خاک هستند که به روش تکرار می توان آنها را یافت.

طبق رابطه (۵) در صورتی که جرم m شامل جرم سهم لوله (M_p) و جرم افزوده سهم خاک (M_{add}) در نظر گرفته شود، داریم:

$$K_d(\omega) = -\omega^2 (M_p + M_{add}) + K_A + i\omega C \quad (24)$$

رابطه (۲۴) در فضای مختلط و فرکانسی می باشد. در این رابطه مقدار M_p با اندازه گیری در آزمایشگاه و مقدار C با استفاده از رابطه میرایی بدست می آید که مقدار ξ و k از آزمایشات جداگانه به ترتیب میرایی و استاتیکی بدست می آیند. با استفاده از آزمایشات دینامیکی و اندازه گیری نیرو و تغییر مکان تابعی از زمان، می توان سختی دینامیکی تابعی از زمان را یافت و پس از انجام تبدیلات لازم فوریه، از رابطه (۲۴) می توان M_{add} را پیدا کرد.

با توجه به اینکه مقدار عبارت سمت چپ با عبارت سمت راست رابطه (۲۴) به صورت اتحاد تساوی داده می شوند، می توان علاوه بر M_{add} مقدار C را مجدداً بدست آورد. در نتیجه مجهولات وابسته به هم را به روش تکرار و یکی پس از دیگری می توان یافت.

در سمت راست رابطه (۲۴) تنها M_{add} مجهول است و در سمت چپ رابطه مذکور پارامتر سختی دینامیکی در فضای فرکانسی است. از طرفی سختی دینامیکی در فضای فرکانسی طبق تعریف ذیل می باشد:

طبق رابطه (۲۹) اگر ضریب میرایی برابر صفر باشد اختلاف فاز بین منحنی موج نیروی دینامیکی و منحنی موج تغییر مکان دینامیکی معادل صفر می‌گردد. در نتیجه حداکثر نیرو با حداکثر جابجایی در موقعیت زمانی یکسان روی همدیگر قرار می‌گیرند.

جهت یافتن مقدار سختی دینامیکی در فضای فرکانسی رابطه (۲۵) لازم است مقادیر $F(\omega)$ و $X(\omega)$ را که به ترتیب تبدیل فوریه تابع نیروی دینامیکی و تابع تغییر مکان دینامیکی است بدست آیند:

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (30)$$

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u(t) e^{-i\omega t} dt \quad (31)$$

با توجه به اینکه نسبت $F(\omega)$ به $X(\omega)$ مورد نظر است لذا ضریب انتگرال در محاسبه سختی دینامیکی رابطه (۲۵) بی‌تأثیر می‌گردد. با عنایت به اینکه $t \geq 0$ و تابع هارمونیک دارای دوره تناوب T است لذا می‌توان نوشت:

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi (1-e^{-i\omega T})} \int_0^T f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (32)$$

با طی روند مشابه، مقدار $X(\omega)$ به صورت ذیل بدست خواهد آمد:

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi (1-e^{-i\omega T})} \int_0^T u(t) e^{-i\omega t} dt \quad (33)$$

در نتیجه مقدار $K_d(\omega)$ از رابطه (۲۵) برابر خواهد بود با:

$$K_d(\omega) = \frac{\int_0^T f(t) e^{-i\omega t} dt = R_a}{\int_0^T u(t) e^{-i\omega t} dt = R_b} \quad (34)$$

با توجه به اینکه نیروی دینامیکی و تغییر مکان دینامیکی در محدوده زمان به ترتیب برابر با روابط (۲۶) و (۲۷) است در نتیجه سختی دینامیکی در فضای فرکانسی رابطه (۳۴) برابر خواهد بود با:

$$K_d(\omega) = \frac{R_a}{R_b} = \frac{F_0 (A - iB) (A' + iB')}{u_0 (A' - iB') (A' + iB')} \\ = \left(\frac{F_0}{u_0} \right) \frac{(AA' + BB' + i(AB' - A'B))}{A'^2 + B'^2} \quad (35)$$

$$K_d(\omega) = \frac{F(\omega)}{X(\omega)} \quad (25)$$

قابل ذکر است تحریک سیستم به صورت هارمونیک و از نوع سینوسی است و تابع تغییر مکان با یک اختلاف فاز به صورت هارمونیک و از همان نوع سینوسی است. تابع تحریک سیستم به صورت ذیل در نظر گرفته می‌شود:

$$f(t) = F_0 \sin \omega t \quad (26)$$

تابع جابجایی نقاط پس از گذشت زمانی به صورت ذیل در می‌آید:

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (27)$$

که دارای اختلاف فاز ϕ نسبت به موج تحریک نیرویی است.

در آزمایشگاه مقدار F_0 به ازای فرکانس‌ها و دامنه‌های تحریک از روی صفحه مونیتوری دستگاه Servo-Hydraulic که توسط Loadcell اندازه‌گیری می‌شود قرائت می‌گردد. جهت ایجاد یک تحریک دینامیکی، دامنه ارتعاش و فرکانس‌های تحریک به عنوان ورودی به دستگاه داده می‌شود آنگاه مقدار حداکثر نیروی دینامیکی (F_0) قرائت می‌گردد. مقدار حداکثر دامنه تغییر مکان در جهت محوری توسط sensor اندازه‌گیر دقیق تغییر مکان اندازه‌گیری و ثبت و ضبط می‌گردد. فرکانس تحریک سیستم با فرکانس ارتعاش جابجایی با هم یکسان هستند ولی دو موج نیروی دینامیکی $F(t)$ با تغییر مکان $u(t)$ دارای اختلاف فاز ϕ هستند که ناشی از اثر میرایی سیستم بوجود می‌آید. دامنه نوسان و اختلاف فاز تغییر مکان نسبت به نیروی تحریک به فرم رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$u_0 = \frac{F_0/K}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (28)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (29)$$

در صورتیکه $\omega = \omega_n$ گردد و $\xi = 0$ باشد حالت تشدید (رزونانس) بوجود می‌آید که با افزایش میرایی، میزان ارتعاش در نقطه $\omega = \omega_n$ کاهش می‌یابد.

که در رابطه مذکور:

$$A = 0, B = T/2, A' = -\sin \phi \cdot \frac{T}{2}, B' = \cos \phi \cdot \frac{T}{2}$$

با جایگزینی در رابطه (۳۵) مقدار سختی دینامیکی برابر می شود با:

$$K_d(\omega) = \left(\frac{F_0}{u_0} \right) \frac{0 + \cos \phi \cdot \left(\frac{T}{2} \right)^2 + i \sin \phi \cdot \left(\frac{T}{2} \right)^2}{(-\sin \phi \cdot T/2)^2 + (\cos \phi \cdot T/2)^2} \quad (۳۶)$$

در نتیجه سختی دینامیکی چنین بدست می آید:

$$K_d(\omega) = \frac{F_0}{u_0} (\cos \phi + i \sin \phi) \quad (۳۷)$$

با توجه به میزان دامنه ورودی و فرکانس تحریک، میزان دامنه نیرو (F_0) و میزان دامنه جابجایی (u_0) از آزمایشگاه بدست می آید، زاویه اختلاف فاز (ϕ) با توجه به میزان فرکانس تحریک و فرکانس طبیعی و ضریب میرایی از رابطه (۲۹) بدست می آید. در حالت خاص که $\xi=0$ یا $\omega=0$ باشد زاویه اختلاف فاز صفر می شود. در نتیجه سختی دینامیکی از فضای مختلط به فضای حقیقی تنها تبدیل می شود. رابطه (۳۷) سختی دینامیکی را در فضای مختلط توصیف می کند که تابعی از مقادیر حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی است که اگر با رابطه سختی دینامیکی یا تابع امپدانس (۲۴) اتحاد قرار داده شود می توان مقدار M_{add} و حتی مجدداً مقدار C را یافت با مساوی قرار دادن قسمت حقیقی و موهومی دو رابطه (۳۷) و (۲۴) خواهیم داشت:

$$K - \frac{F_0}{u_0} \cos \phi = M_{add} \omega^2 - M_P \quad (۳۸)$$

$$C = \frac{F_0}{\omega u_0} \sin \phi \quad (۳۹)$$

در حالت استاتیک، مقدار ϕ برابر صفر است. در نتیجه رابطه (۳۹) مقدار C را معادل صفر بدست می دهد و در رابطه (۳۸) مقدار K برابر (F_0/u_0) مربوط به حالت استاتیک می گردد. با عنایت به اینکه میزان فرکانس اندازه گیری شده در واحد هرتز (f) است، میزان فرکانس زاویه ای از رابطه $\omega=2\pi f$ بدست می آید.

مدل آزمایشگاهی

پارامترهایی از قبیل سختی استاتیکی، سختی دینامیکی، میرایی و جرم افزوده سهم خاک که در رفتار دینامیکی سوی محوری با لوله مشارکت می کند، لازم است با استفاده از فرمولاسیون و ساخت مدل آزمایشگاهی تعیین گردند و تأثیر پذیری این پارامترها نسبت به تغییر قطر لوله و جنس لوله و عمق دفن لوله و نوع خاک و میزان رطوبت و میزان کوبیدگی خاک و تأثیر رفتار استاتیکی و دینامیکی و غیره مورد ارزیابی قرار گیرند. مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده از قسمت های مختلف تشکیل یافته است. شکل (۳) پلان آرایش بخش های مختلف تدارک مدل آزمایشگاهی را نشان می دهد. در این مجموعه آزمایشگاهی نیروی استاتیکی و یا دینامیکی توسط Actuator دستگاه مولد Servo-Hydraulic (سیستم (۱)) وارد سیستم مبدل (سیستم (۲)) شده و نیروی قائم تبدیل به نیروی افقی به سر لوله مدفون در خاک (سیستم (۳)) می شود. با استفاده از مبدل دومی، نیروی کل بین خاک و لوله از طریق سیستم (۲) به Load cell دستگاه مولد بنام Servo-Hydraulic می رسد و توسط صفحه مونیتری این دستگاه نشان داده می شود. با استفاده از Sensorهای دقیق اندازه گیری (سیستم (۴)) تغییر مکان محوری نقاط در طول لوله توسط کامپیوتر (سیستم (۵)) ذخیره و روی صفحه مونیتری نیز نشان داده می شود.

شکل (۴) تصویر شماتیکی جانبی از مجموعه سیستم های آزمایشگاهی شامل Actuator و Load cell مربوط به دستگاه Servo-Hydraulic و مبدل متحرک تبدیل کننده حرکت قائم دستگاه Actuator به حرکت افقی در سر لوله و مبدل ثابت تبدیل کننده نیروی افقی بین خاک و لوله به نیروی قائم در Load cell و سیستم دمپرهای مستهلک کننده تداخل امواج و سیستم خاک و لوله مدفون و Sensorهای دقیق اندازه گیری تغییر مکان و سیستم کامپیوتری جهت نمایش و ضبط نتایج تغییر مکان های داخل لوله را نشان می دهد. همانطوریکه در شکل دیده می شود اگر توسط فک پائین مولد (یا همان Actuator) یک تحریک قائم بوجود آید توسط مبدل تحتانی وبا توجه به اتصال مفصلی نقطه A ، به تحریک افقی در نقطه C تبدیل می شود که نیرو افقی به سر لوله وارد می شود این نیرو از طریق لوله به خاک اطراف می رسد در نتیجه به صورت نیروی اصطکاکی بین خاک و لوله بوجود می آید. با توجه به اتصال رینگی جعبه حاوی خاک با زمین، مقاومت افقی بین جعبه و زمین وجود ندارد در نتیجه تمام نیروی افقی بین خاک و لوله از طریق مبدل بالائی به فک بالائی (Load cell) دستگاه مولد می رسد و چون اتصال نقطه B مفصلی است نیروی اصطکاکی با یک ضریبی با نیروی Load

می‌گردد که شکل (۷) مقطع طولی موقعیت اندازه‌گیرهای دقیق را نشان می‌دهد.

- سیستم کاهش بازتاب امواج

در مدل‌های آزمایشگاهی دیگر پژوهشگران، موضوع شبیه‌سازی کاهش اثر انعکاس یا بازتاب امواج به علت شرایط مرزی مدل آزمایشگاهی مورد توجه قرار نگرفته در حالیکه عملاً چنین بازتابی وجود دارد و بهتر است در مدل‌سازی آزمایشگاهی به حذف یا بهبود بازتاب امواج نیز توجه گردد. عملاً در لوله‌ای به طول بلند یا به عبارتی به طول بینهایت، وجود طول بزرگ نقش میرایی امواج را خواهد داشت اما در مدل‌های آزمایشگاهی که طول لوله محدود انتخاب می‌شود با مشکل انعکاس امواج روبرو می‌گردد که در این مدل طراحی دمپرها برای این منظور می‌باشد که در شکل (۸) تصویری از استقرار اندازه‌گیرها و سیستم دمپر دیده می‌شود که از صفحات برشی مستغرق در روغن غلیظ به عنوان دمپر استفاده شده است.

مقایسه نتایج

سختی استاتیکی بین خاک و لوله در جهت محوری با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی و بر مبنای روش فومولاسیون پیشنهادی محاسبه می‌گردد. با استفاده از سختی بدست آمده طبق مدل این مقاله و اطلاعات هندسی و بارگذاری، تحلیل غیرخطی توسط نرم افزار ANSYS انجام می‌گیرد آنگاه نتایج آزمایشگاهی با نتایج نرم افزار مذکور در محل تغییر مکان‌ها جهت نشان تأیید و قیاس مقایسه می‌شوند. شکل (۹) یک نمونه از نتایج آزمایشگاهی و شکل (۱۰) مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج ANSYS را نشان می‌دهد. مقایسات نشان می‌دهند نتایج به هم نزدیک اند و بزرگی تغییر مکان ناشی از تحلیل با ANSYS علاوه بر تأثیر خطاهای آزمایشگاهی، می‌تواند به خاطر رفتار پوسته‌ای در قیاس با رفتار محوری تنها باشد. در رفتار محوری تنها کرنش طولی در حالیکه در رفتار پوسته‌ای، علاوه بر رفتار محوری، دیگر کرنش‌های فضای ۳ بعدی فعال می‌شوند که می‌تواند یکی از عوامل خطا باشد.

پارامترهایی مانند سختی دینامیکی بین خاک و لوله و میزان میرایی و سهمی از جرم خاک که در سوی محوری با جرم لوله مشارکت می‌کند از جمله پارامترهای دینامیکی اند که با استفاده از مدل پیشنهادی تعیین می‌گردند. تأثیر پذیری و حساسیت پارامترها مبسوطاً در مرجع [۱۲] ارائه گردیده است. جدول (۱) یک نمونه از نتایج آزمایش دینامیک را نشان می‌دهد. در این جدول با اعمال دامنه و فرکانس تحریک، نیروی دینامیکی توسط دستگاه Servo-Hydraulic

cell ارتباط پیدا می‌کند. مدل آزمایشگاهی از قسمت‌های مختلف زیر تشکیل شده است:

- سیستم خاد و لوله با تجهیزات جنبی

جعبه‌ای با یک قاب و حاوی خاک و لوله بطوری که لوله از ابتداء و انتهای جعبه عبور کرده و به قسمی که از یک طرف به مولد تحریک و مبدل‌ها و دمپر و از یک طرف به دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق و دمپر وصل شده، طراحی و ساخته شد. از بین روش‌های معمول آزمایشات استاتیکی و دینامیکی در مورد لوله‌های مدفون، روش اعمال نیرو و تحریک دینامیکی با استفاده از Actuator بکار رفته است که از یک طرف بر ابتدای لوله نیروی استاتیکی و دینامیکی وارد می‌کند.

- سیستم مبدل‌های نیرویی و تغییر مکانی (ثابت و متحرک) و پایه قابی

در استفاده از سیستم بارگذاری و تحریک‌های استاتیکی و دینامیکی دستگاه Servo-Hydraulic که ماهیتاً به صورت قائم عمل می‌کند، جهت تبدیل حرکات قائم مولد (Actuator) به حرکات افقی (شامل نیرو و تغییر مکان) دو مبدل نیرویی و تغییر مکانی که یکی ثابت و دیگری متحرک است طراحی شده که هر دو مبدل به یک اسکلت قابی متصل شده‌اند و اتصال مبدل به قاب، مفصلی طرح گردیده تا نیرو و تغییر مکان قائم را به حالت افقی تبدیل کند.

- سیستم مولد استاتیکی و دینامیکی

تحریک کننده اصلی مدل آزمایشگاهی خاک و لوله دستگاه Servo-Hydraulic است که در حالت استاتیکی و دینامیکی و با انواع فرکانس و دامنه سیستم خاک و لوله را تحریک می‌کند و در صفحه مونیتری خود قادر است کلیه اطلاعات نیرویی تغییر مکانی و فرکانس دامنه و غیره بخش ورودی را نشان دهد. مبدل‌های نیرویی و تغییر مکانی از یک طرف به دستگاه Servo-Hydraulic (فک بالا: Load cell و فک پایین: Actuator) و از طرف دیگر به دستگاه خاک و لوله (بدنه جعبه و سر لوله) وصل گردیده است.

- سیستم نمایش و ضبط نتایج خروجی

نمایش ضبط نتایج خروجی که همان میزان تغییر مکان‌های طول لوله و با دقت بالا است توسط کامپیوتر (سیستم رایانه‌ای) متصل به Sensor انجام می‌گردد. شکل‌های (۵) و (۶) تصاویری از سیستم‌های مذکور را نشان می‌دهند.

- سیستم اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها

میزان نیرو و تغییر مکان و فرکانس و دامنه ورودی توسط مولد اصلی اندازه‌گیری و نشان داده می‌شود. اما میزان تغییر مکان در طول لوله که با دقت بالایی مورد نظر است توسط Sensorها اندازه‌گیری شده و توسط رایانه نسبت به زمان ثبت

اندازه گیری شد که ضریب تبدیل در آن اعمال شده است. دامنه تغییر مکان توسط Sensor اندازه گیر تغییر مکان اندازه گیری شده است. در این نمونه مقدار سختی استاتیکی طبق روش فرمولاسیون پیشنهادی برابر $K=971.0\text{kg/mm}$ بدست می آید. مقدار متوسط عددی سختی دینامیکی بازای فرکانس ۰.۵ هرتز برابر می شود با:

$$|K_d(\omega)| = \left| \frac{F_0}{u_0} (\cos \phi + \sin \phi) \right| = \frac{F_0}{u_0} = 828.0\text{kg/mm}$$

که در قیاس با سختی استاتیکی مقدار کمتری را نشان می دهد و تأییدی در راستای نتایج آزمایشات تا کادا [۹] است. نتیجه بررسی های تاکادا نشان می دهد که از لحاظ رفتاری و نوع تغییرات نتیجه حاصله وی منطبق بر نتایج این مدل است. نسبت سختی دینامیکی به استاتیکی برابر می شود با $\frac{828.0}{971.0} = 0.85$ که کمتر از عدد واحد است.

نتیجه گیری

- سختی استاتیکی مدل وینکلر و دیگر پارامترهای دینامیکی مانند میرائی سیستم خاک و لوله و سختی دینامیکی و سهمی از جرم خاک که در رفتار ارتعاشی با جرم لوله مشارکت می کند را با استفاده از روش فرمولاسیون پیشنهادی و مدل آزمایشگاهی می توان تعیین نمود. با استفاده از این مدل تأثیر پذیری پارامترهای سختی استاتیکی و دینامیکی بین خاک و لوله را نسبت به عواملی مانند عمق دفن، قطر لوله، تراکم خاک، درصد رطوبت و میزان دامنه و فرکانس تحریک مورد ارزیابی قرار گرفته که مبسوطاً در مرجع [۱۲] ارائه شده است. بررسی ها نشان می دهند پارامترهای مزبور در تغییر سختی های استاتیکی و دینامیکی و نیز میرائی و جرم افزوده سهم خاک شدیداً مؤثرند.

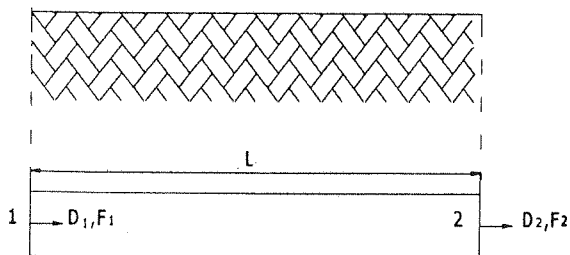
- برخی از نتایج حاصله چنین است: ۱- سختی دینامیکی بین خاک و لوله کمتر از سختی استاتیکی است. ۲- رفتار استاتیکی بین خاک و لوله در جهت محوری، غیر خطی است. ۳- با افزایش دامنه تحریک، مقدار دامنه نیروی بین خاک و لوله افزایش می یابد. ۴- با افزایش فرکانس تحریک، مقدار دامنه نیروی بین خاک و لوله کاهش پیدا می کند. ۵- با افزایش فرکانس تحریک، سختی دینامیکی بین خاک و لوله کاهش می یابد. ۶- میرائی بین خاک و لوله بر خلاف سازه های معمولی با مقدار بالا است. ۷- با افزایش میرائی بین خاک و لوله، اختلاف فاز تغییر مکان هارمونیک به نیروی هارمونیک بیشتر می شود.

فهرست علائم

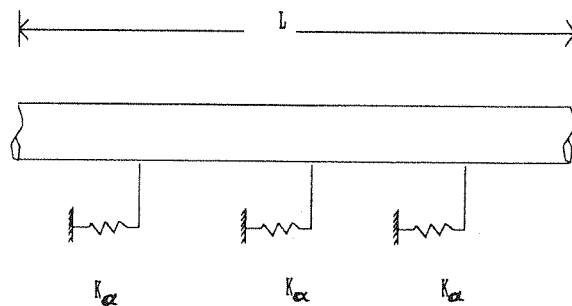
- C_p = میرایی محوری خاک و لوله
- C = میرائی معادل گره ای
- ϕ = اختلاف فاز موج تحریک به موج پاسخ سیستم
- $f(t)$ = نیروی دینامیکی در جهت محور لوله
- $u(t)$ = تغییر مکان دینامیکی در جهت محور لوله
- ω = فرکانس تحریک (در واحد رادیان بر ثانیه)
- t = متغیر زمان
- x = متغیر فاصله
- $k_d(\omega)$ = سختی دینامیکی تابعی از فرکانس
- $k_d(t)$ = سختی دینامیکی تابعی از زمان
- i = عدد موهومی در فضای مختلط $\sqrt{-1}$
- ξ = ضریب میرائی
- m = جرم سیستم
- T = دوره (زمان) تناوب
- ∂ = اپراتور مشتق پاره ای
- $[m]$ = ماتریس جرم سیستم خاک و لوله
- $[c]$ = ماتریس میرائی سیستم خاک و لوله
- \dot{u}_0 = سرعت اولیه
- $[k]$ = ماتریس سختی سیستم خاک و لوله
- k_a = سختی محوری بین خاک و لوله
- ρ_p = جرم مخصوص لوله
- E_p = مدول الاستیسیته لوله
- A_p = سطح مقطع لوله
- $u_p(x,t)$ = تابع تغییر مکان زمین
- $u(x,t)$ = تابع تغییر مکان لوله
- m_p = جرم لوله
- m_{add} = جرم افزوده سهم خاک
- k_{ij} = سختی معادل گره ای بین خاک و لوله مربوط به سطر i و ستون j
- x_i = جابجایی معادل گره ای سطر i
- \dot{x}_i = سرعت معادل گره ای سطر i
- \ddot{x}_i = شتاب معادل گره ای سطر i
- $H_{ij}(\omega)$ = پاسخ فرکانسی سیستم مربوط به سطر i و ستون j
- $f_i(t)$ = نیروی دینامیکی معادل گره ای
- F_i = نیروی بین خاک و لوله در جهت محوری و معادل در گره i
- ΔF_i = اختلاف نیروی بین خاک و لوله در جهت محوری و بین گره i و $i+1$ (= نیروی اصطکاک داخلی المان i از لوله)
- p = محیط لوله

$X(\omega)$ = تبدیل فوریه تابع جابجائی $x(t)$
 $F(\omega)$ = تبدیل فوریه تابع نیروئی $f(t)$
 F_0 = دامنه تابع نیروی هارمونیک
 u_0 = دامنه تابع تغییر مکان هارمونیک
 f = فرکانس تحریک (در واحد سیکل بر ثانیه)
 L = طول لوله

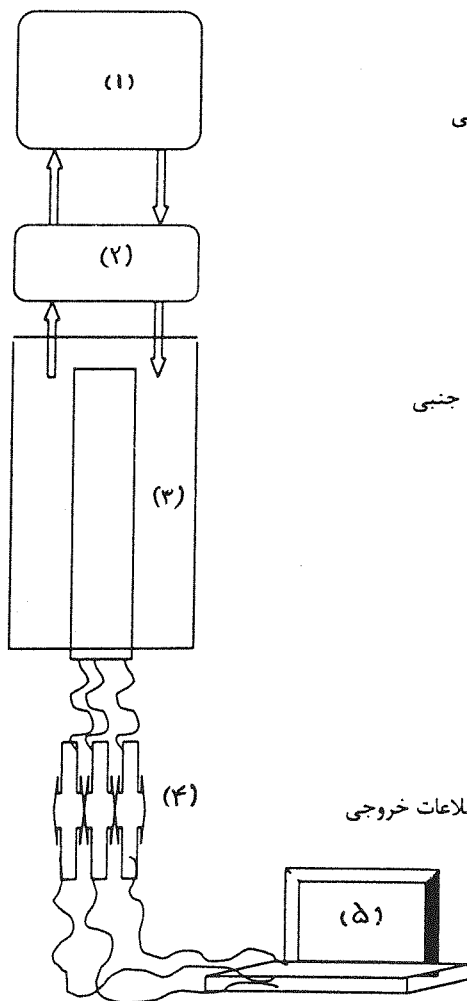
L_i = فاصله طولی بین گره i با گره $i+1$
 τ_i = تنش برشی المان i از لوله
 σ_i = تنش نرمال المان i از لوله
 ε_i = کرنش نرمال المان i از لوله
 u_i = جابجائی محوری گره i از لوله
 ω_n = فرکانس طبیعی سیستم خاک و لوله
 $K_j(\omega)$ = تبدیل فوریه سختی دینامیکی $k_j(t)$



شکل (۲) شبیه سازی رفتار خاک و لوله توسط فنرهای وینگر.



شکل (۱) درجات آزادی معادل گره ای سیستم.



۱- سیستم مولد استاتیکی و دینامیکی

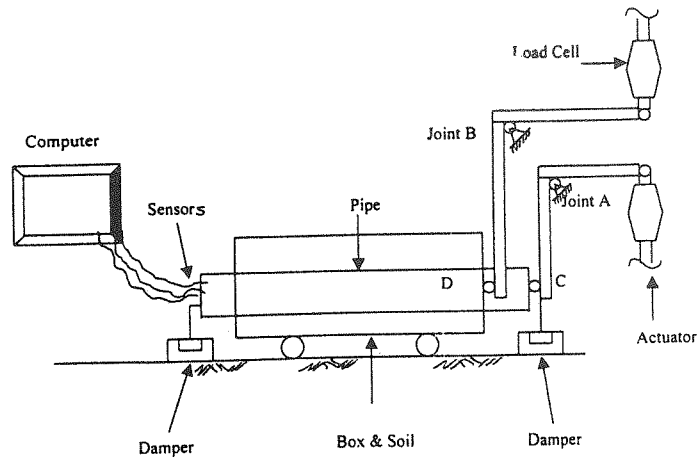
۲- سیستم مبدل ها

۳- سیستم خاک و لوله با تجهیزات جنبی

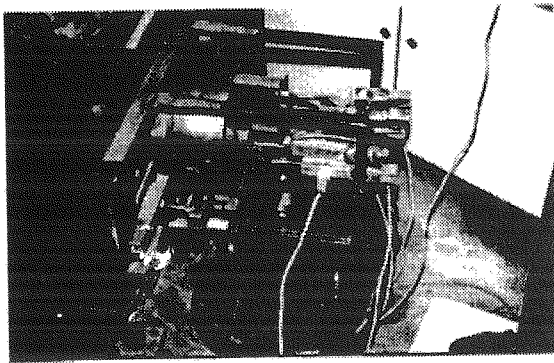
۴- سیستم اندازه گیری دقیق

۵- سیستم نمایش وضبط و ثبت اطلاعات خروجی

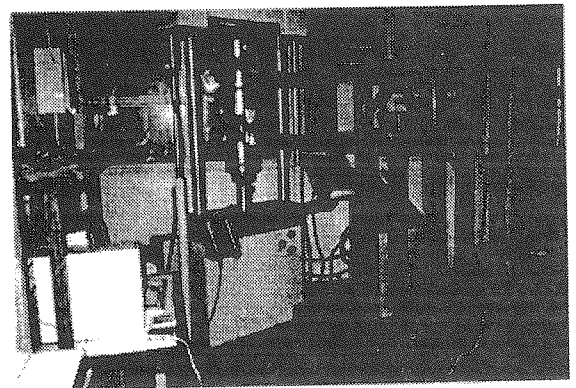
شکل (۳) پلان آرایش بخش های مختلف تدارک مدل آزمایشگاهی.



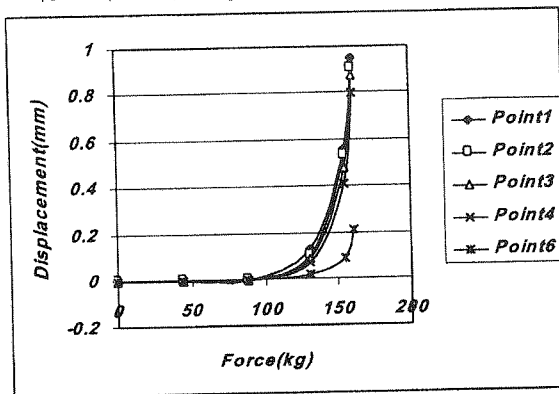
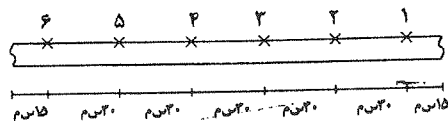
شکل (۴) شماتیکی جانبی از مجموعه سیستم های آزمایشگاهی.



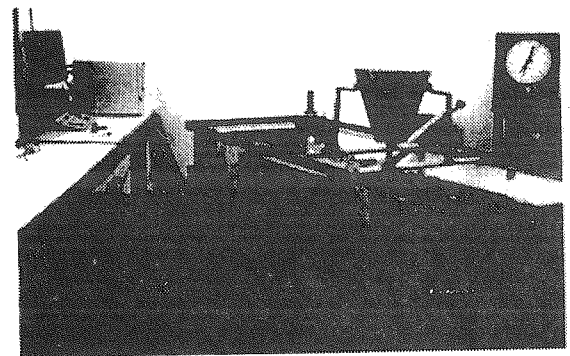
شکل (۸) تصویر کلی از استقرار Sensorها روی Frame و سیستم دمپر.



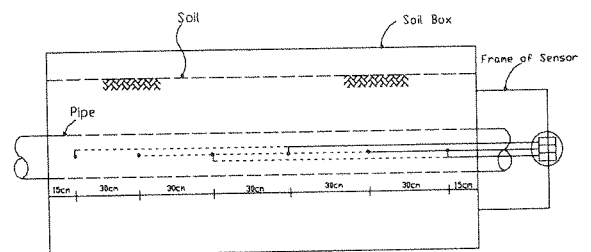
شکل (۵) تصویر کلی از آرایش Servo-Hyd. و مبدل ها و پایه و سیستم کامپیوتر.



شکل (۹) تغییرات جابجایی نسبت به نیرو در نقاط مختلف طول توله.



شکل (۶) سیستم جعبه حاوی خاک و توله و سیستم کامپیوتری ضبط نتایج.



شکل (۷) مقطع طولی موقعیت اندازه گیری های دقیق.