



مدلسازی عددی سیستم خاک - لوله و بررسی پاسخ لوله های مدفون به گسیختگی زمین ناشی از زلزله در شرایط دفن عمیق

خلیل عفتی داریانی^۱، کاظم بدو^۲ و هادی بهادری^۳

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی ۱۶۵

پست الکترونیکی: k.badv@urmia.ac.ir

خلاصه

خطوط لوله بهترین وسیله برای انتقال منابع آب، گاز و فاضلاب جهت ارائه خدمات شهری، کشاورزی، صنعتی و حمل و نقل می باشد. گسیختگی زمین در اثر زلزله نظیر زمین لغزش، گسلش و فرونشست منجر به آسیب دیدگی لوله ها، بروز خسارات مالی و قطع ارتباط و خدمات و مختل شدن چرخه زندگی می شود. با توجه به اهمیت موضوع و ارائه روشهای طراحی مناسب و ایمن، مدل عددی دو بعدی سیستم مرکب خاک - لوله تهیه شده است. روابط تحلیلی موجود برای تخمین نیروهای اوج ایجاد شده در جداره لوله در اثر حرکات جانبی خاک بعلت گسیختگی زمین و نتایج آنالیز مدل اندرکنشی خاک و لوله در ماسه نشان می دهد که در اعماق دفن زیاد، روابط موجود تخمین مناسبی برای نیروهای اوج بدست نمی دهد. از اینرو در این مطالعه ضمن بررسی و مقایسه مدل عددی با مدل های فیزیکی، آنالیزهای متعددی برای بررسی تاثیر ارتفاع خاکریز بر رفتار نیرو- تغییر مکان لوله و یافتن عمق بحرانی در ماسه انجام شده و نتایج بدست آمده برای استفاده در طراحی خطوط لوله مدفون در ماسه برای شرایط دفن عمیق ارائه شده است.

کلمات کلیدی: لوله های مدفون، حرکت زمین، اندرکنش خاک - لوله، آنالیز عددی.

مقدمه

طراحی مقاوم خطوط لوله مدفون در برابر زلزله، مستلزم درک پاسخ خط لوله به حرکات زمین است. این حرکات ممکن است از گسیختگی شیروانیها، گسلش، زمین لغزش، روانگرایی، خاکبرداری و حفاری های شهری و نشستهای بزرگ زمین بوجود آید. در چنین شرایطی بعلت حرکت نسبی بین خط لوله و خاک اطراف آن، به لوله بار وارد می شود. فرمول استاندارد نیرو - تغییر مکان برای اندرکنش جانبی خاک و خط لوله در ماسه توسط ALA (اتحادیه خطوط لوله آمریکا) در "دستورالعمل طراحی لوله های مدفون فولادی" ارائه شده است [1]. مطابق این دستورالعمل حداکثر نیروی جانبی وارد بر خط لوله مدفون در ماسه، در واحد طول لوله (P_{II}) از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_{II} = N_q \bar{\gamma} H D \quad (1)$$

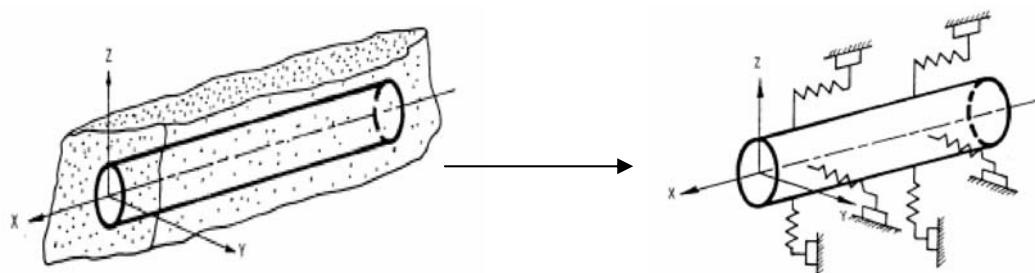
که در آن $\bar{\gamma}$: وزن موثر خاک؛ H : عمق دفن از سطح زمین تا مرکز خط لوله؛ D : قطر خارجی لوله و N_q : فاکتور ظرفیت باربری که تابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک و نسبت H/D هستند. گرچه تستهای انجام شده نشان می دهد که حداکثر نیروی وارده بر لوله در تغییر مکانهای نسبی بزرگ کاهش می یابد ولی در رابطه فوق فرض بر اینست که نیروی P_{II} پس از رسیدن به مقدار حداکثر ثابت می ماند. رابطه تجربی فوق بر اساس یک مدل سازه ای نشان داده شده در شکل (۱) بدست آمده که در آن خاک اطراف لوله بصورت فنرهای مستقل از هم در نظر گرفته شده است. این رابطه از نتایج تحقیقات محققانی نظیر [2] Oversen and Stromann، [3] Audibert and Nyman، و [4] Trautmann and O'Rourke برای نسبت عمق دفن های $H/D \leq 10 \sim 20$ بدست آمده و برای شرایط دفن عمیق جوابهای صحیحی ارائه نمی دهد.

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی

۲ دانشیار

۳ دانشجوی دوره دکتری و بورسیه هیئت علمی

در این مطالعه، اندرکنش خاک - خط لوله تحت حرکات جانبی در ماسه مورد مطالعه قرار گرفته است. بازبینی راه حل های تحلیلی مختلف انجام شده روی لوله ها یا مهارهای نواری نشان می دهد که اختلاف زیادی در محاسبه نیروی اوج بی بعد برای اعماق زیاد وجود دارد.

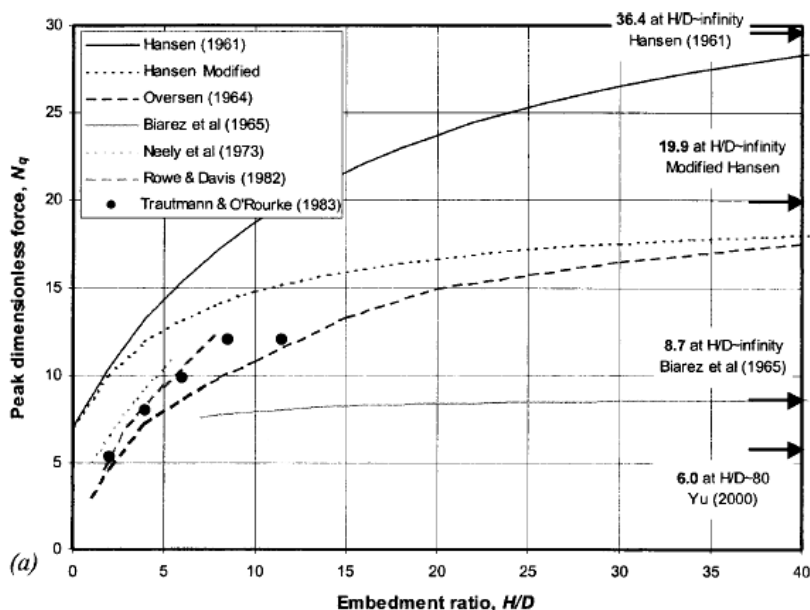


شکل ۱- مدل سازه ای ایده آل خاک بصورت فنرهای مستقل بجای مدل سه بعدی واقعی (ASCE 2001)

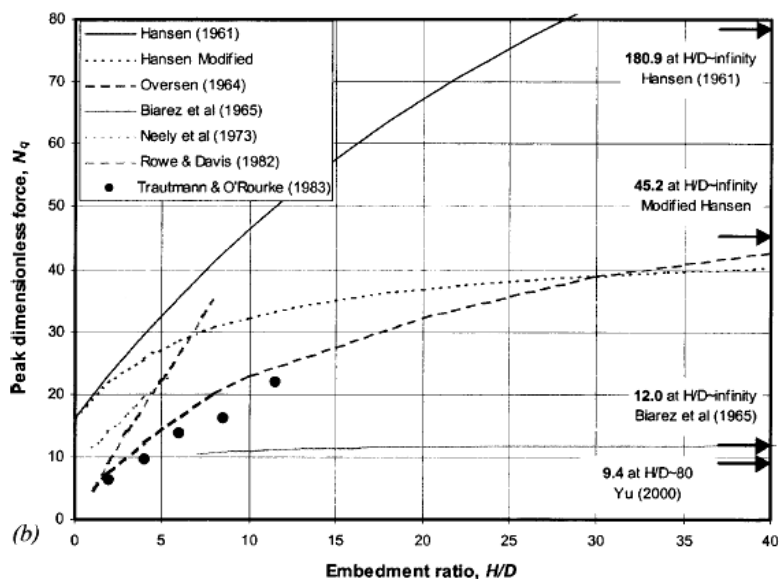
بعلاوه اطلاعات در مورد تغییر وضعیت از حالت سطحی به عمق زیاد محدود است. برای بررسی این پدیده یک مدل سازی عددی به روش تفاضل محدود انجام گرفته است. نتایج ابتدا با داده های آزمایش انجام شده توسط [5] Hurley and Phillips مقایسه و سپس آنالیزها برای نسبت های دفن بزرگتر انجام شده است.

بازبینی مطالعات اندرکنش جانبی خاک - لوله برای شرایط دفن عمیق

در اشکال (۲) و (۳) فاکتور ظرفیت باربری محاسبه شده از مدل های عددی و تحلیلی برای لوله ها و مهارهایی که در معرض حرکات جانبی قرار دارند، با نتایج تجربی ارائه شده توسط [4] Trautmann and O'Rourke برای ماسه نیمه متراکم ($\phi_{peak} = 35^\circ$ ، $\psi = 5^\circ$) و ماسه متراکم ($\phi_{peak} = 44^\circ$)، مقایسه شده است. اختلافات در بین مدل های مختلف بویژه برای اعماق زیاد آشکار هست. مدل های [6] Neely et al. و Rowe and Davis [7] فقط برای اعماق سطحی محدود شده است. همچنین فاکتور ظرفیت باربری برای اعماق زیاد $N_q \left(\frac{H}{D} \rightarrow \infty \right)$ توسط مدل های Hansen [8] و [9] Biarez et al. در این اشکال نشان داده شده است. با توجه به این اشکال اختلاف مقادیر بدست آمده برای $N_q \left(\frac{H}{D} \rightarrow \infty \right)$ خیلی باهم متفاوت هستند بطوریکه از ۶ تا ۳۶/۴ برای ماسه نیمه متراکم و از ۹/۴ تا ۱۸۰/۹ برای ماسه متراکم تغییر می کند. با اینحال در اغلب مدلها، فاکتور ظرفیت باربری با افزایش نسبت عمق افزایش می یابد.



شکل ۲- مقایسه بین روابط تحلیلی و داده های آزمایشگاهی حرکت جانبی لوله مدفون در ماسه نیمه متراکم

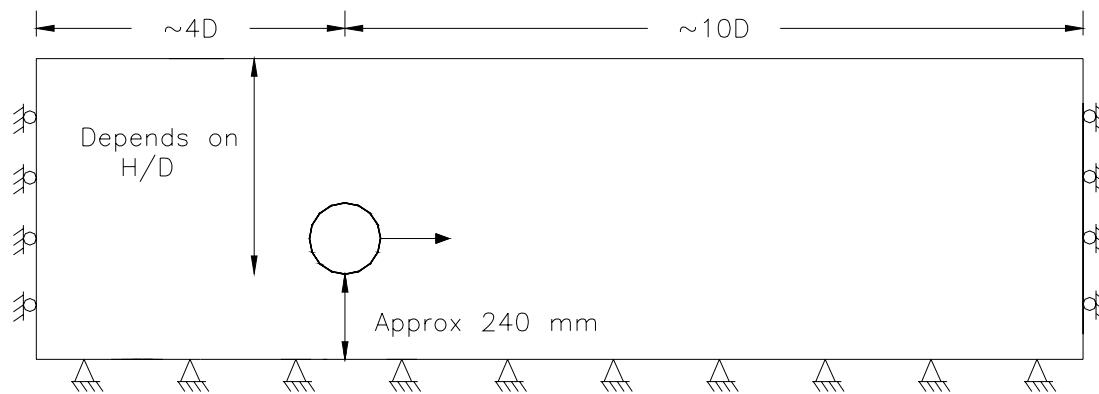


شکل ۲ - مقایسه بین روابط تحلیلی و داده های آزمایشگاهی حرکت جانبی لوله مدفون در ماسه متراکم

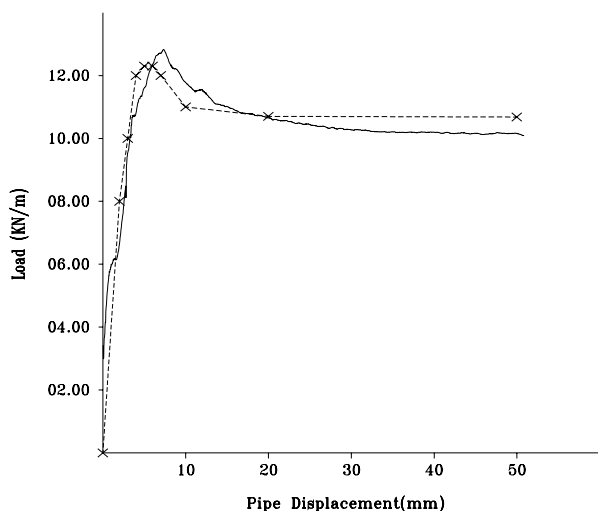
بررسی صحت مدلسازی عددی

صحت نتایج مدل عددی با مدل فیزیکی دو آزمایش بزرگ مقیاس اندرکنش خاک - لوله تحت بارگذاری جانبی که توسط Hurley and Phillips [4] در مرکز تحقیقاتی C-CORE دانشگاه کانادا انجام شده، بررسی شده است. آزمایش MMS01 در ماسه متراکم خشک و آزمایش MMS02R در ماسه نیمه متراکم و در شرایط اشباع انجام شده است. آزمایش MMS02R برای بررسی تاثیر شرایط غوطه وری در پاسخ لوله های مدفون در زیر اقیانوسها در مقایسه با آزمایش MMS01 انجام و نتایج آزمایشات بصورت منحنی نیرو - تغییر مکان ارائه شده است. در هر دو آزمایش، یک لوله فولادی با قطر ۰/۲ متر تحت تغییر مکان نهایی ۰/۱ متر در جهت افقی جابجا شده است.

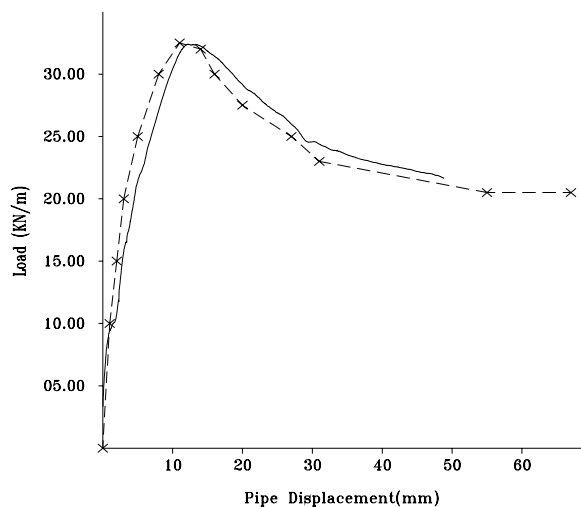
شرایط مرزی مورد استفاده برای آنالیز رفتار لوله های مدفون در شکل (۴) نشان داده شده است. محدوده مرزهای توده خاک در جهت حرکت جانبی برای کاهش اثر شرایط مرزی در نتایج باندازه کافی دورتر انتخاب شده است. تغییر مکان افقی سطوح جانبی نمونه خاک و تغییر مکان عمودی سطح زیرین نمونه خاک بعنوان شرایط مرزی ثابت تعریف شده است. زاویه اصطکاک داخلی برای ماسه متراکم ۴۴ درجه و برای ماسه نیمه متراکم ۴۱ درجه در نظر گرفته شده است. زاویه آماس بر اساس رابطه $\phi_{red} = \phi_{crit} + 0.01 \sigma'_v$ داده شده توسط Bolton [10] تخمین زده شده است. سایر مشخصات مصالح مطابق مفروضات [11] Popescu and Nobahar در آنالیز المان محدود این آزمایشات در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری مصالح بر اساس مدل موهر کولمب با در نظر گیری رفتار غیر خطی مصالح (strain-hardening/softening) تعریف شده است. در اشکال (۵) و (۶) بترتیب منحنی نیرو - تغییر مکان حاصل از مدلسازی عددی به روش تفاضل محدود بصورت خط پر در مقایسه با نتایج آزمایش فیزیکی MMS01 و MMS02R بصورت خط چین نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، پیش بینی عددی رفتار، سازگاری مناسبی با نتایج فیزیکی داشته و تفاوت زیادی در حداکثر نیروی نرمال وارده بر لوله وجود ندارد.



شکل ۴ - دیاگرام شماتیک مسئله برای آنالیز لوله مدفون



شکل ۶- مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی MMS02R



شکل ۵- مقایسه نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی MMS01

آنالیز عددی و نتایج

مدلسازی و بررسی رفتار بار - تغییر مکان لوله های مدفون در ماسه همگن با تغییر پارامترهای مختلف انجام شده است. مهمترین پارامتر هندسی، عمق دفن لوله می باشد که این پارامتر معمولاً بصورت نسبت عمق دفن به قطر لوله، H/D ، بیان می شود و در آن H ارتفاع خاک از سطح زمین تا مرکز لوله و D قطر خارجی لوله می باشد. برای هر یک از انواع خاکهای ماسه ۵ حالت H/D شامل مقادیر ۲، ۳، ۴، ۶ و ۸ در نظر گرفته شده که اعماق دفن واقعی نیز عموماً در این محدوده قرار می گیرد.

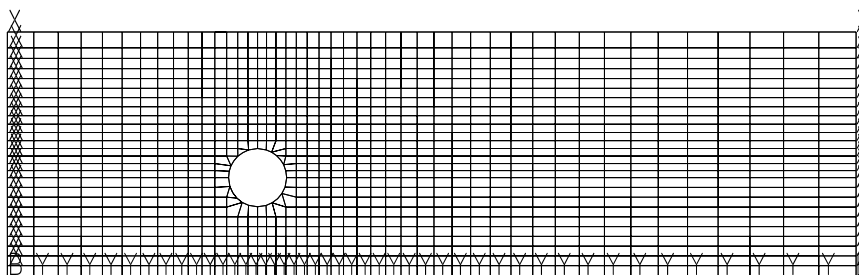
مشخصات موثر خاک در رفتار لوله های مدفون، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (φ)، زاویه اتساع (ψ) وزن مخصوص خاک (γ) و ثابتهای الاستیک خاک E و G و ضریب پواسون می باشد. معمولاً در انجام مطالعه پارامتریک، مشخصات فوق در محدوده مقادیر واقعی تغییر می یابد. در انجام آنالیزهای پارامتریک تحقیق حاضر، مشخصات ماسه رودخانه Chattahoochee در شرایط متراکم و شل انتخاب شده است [12]. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی گزارش شده برای ماسه شل برابر ۳۲ و برای ماسه متراکم برابر ۴۴ می باشد. حالات و خصوصیات مفروض مورد استفاده در آنالیزها در جدول شماره (۱) داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در آنالیز عددی

Case No.	$\gamma(\text{kg/m}^3)$	φ	ψ	$E(\text{Mpa})$
1	1317	32	0	6
2	1500	36	5	15
3	1543	40	10	19.6
4	1700	44	15	22

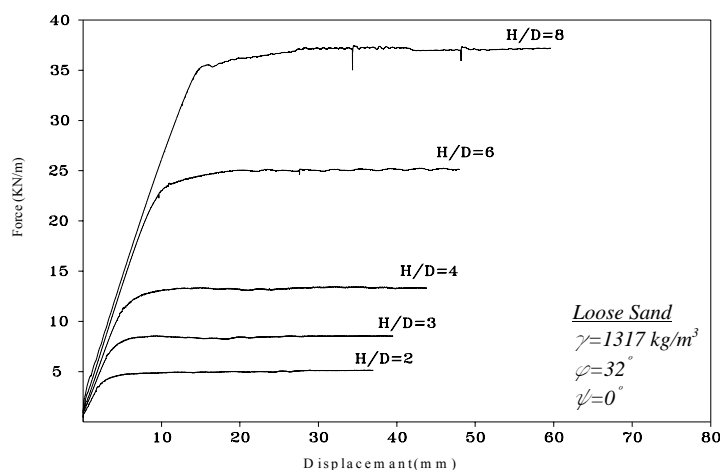
با توجه به انجام آنالیز در ماسه، ضریب چسبندگی خاک در تمامی حالات صفر و مشخصات لوله در تمامی حالات ثابت نگه داشته می شود. مش بندی و شرایط مرزی یکسان برای حالات فوق تنها با تغییر در عمق دفن لوله در نظر گرفته می شود و با اعمال تغییر مکان به المانهای لوله در جهت افقی، نیروی نرمال وارده نسبت به تغییر مکان بدست می آید.

نمونه ای از مش تفاضل محدود استفاده شده در آنالیزها با هندسه مشابه با مدل آزمایشگاهی در شکل (۷) نشان داده شده است. آنالیز در شرایط خشک و کرنش مسطح انجام گرفته است. همچنین اندرکنش بین خط لوله و خاک اطراف با المان Interface مدل شده است که امکان لغزش و جداسدن وجود دارد. لوله با اعمال تغییر مکان در شرایط مرزی تمامی گره های لوله در جهات جانبی اعمال شد و امکان در نظر گیری تغییر شکل لوله در هر گام محاسباتی وجود دارد.

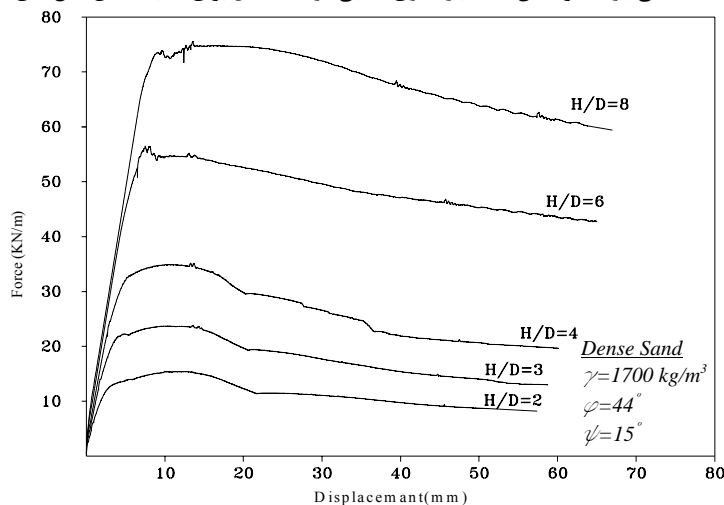


شکل ۷- شبکه تفاضل محدود مورد استفاده در آنالیز

زاویه اصطکاک بین لوله و خاک ($\sigma_{\text{H}}^{\text{L}}$) معادل $\sigma_{\text{H}}^{\text{L}}$ خاک فرض شده است. در حقیقت بدست آوردن این پارامتر اسان نیست بخاطر اینکه به خصوصیات سطوح و درجه حرکت نسبی (لغزش) میان لوله و خاک بستگی دارد ولی تحقیقات نشان می دهد معمولاً $\sigma_{\text{H}}^{\text{L}}$ در محدوده بین ۲۰ درجه تا مقداری مساوی با زاویه اصطکاک خاک قرار دارد [13]. مقادیر بزرگتر $\sigma_{\text{H}}^{\text{L}}$ نمایش دهنده لوله های زبر غیر پوششی با سطوح زنگ زده یا پوشیده و مقادیر کوچکتر مربوط به لوله هایی با سطوح پوششی صاف می شود. همچنین تحقیقات [14] Yimsiri et. al. بمنظور بررسی حساسیت نتایج آنالیز عددی به تغییر زاویه اصطکاک بین سطوح نشان می دهد که با تغییر زاویه اصطکاک بین سطوح از $\sigma_{\text{H}}^{\text{L}}/2$ تا $\sigma_{\text{H}}^{\text{L}}$ نیروی اوج ۸٪ افزایش می یابد. همچنین [7] Rowe and Davis به این نتیجه رسیدند که اثر زبری لوله روی پاسخ در برابر حرکات جانبی با افزایش عمق دفن کاهش می یابد. بنابراین ملاحظه گردید که انتخاب $\sigma_{\text{H}}^{\text{L}}$ نباید تاثیر زیادی روی نتایج داشته باشد. شکل (۸) و شکل (۹) بترتیب نتایج آنالیز تفاضل محدود را برای ماسه شل و متراکم در نسبتهای عمق دفن متفاوت نشان می دهد.

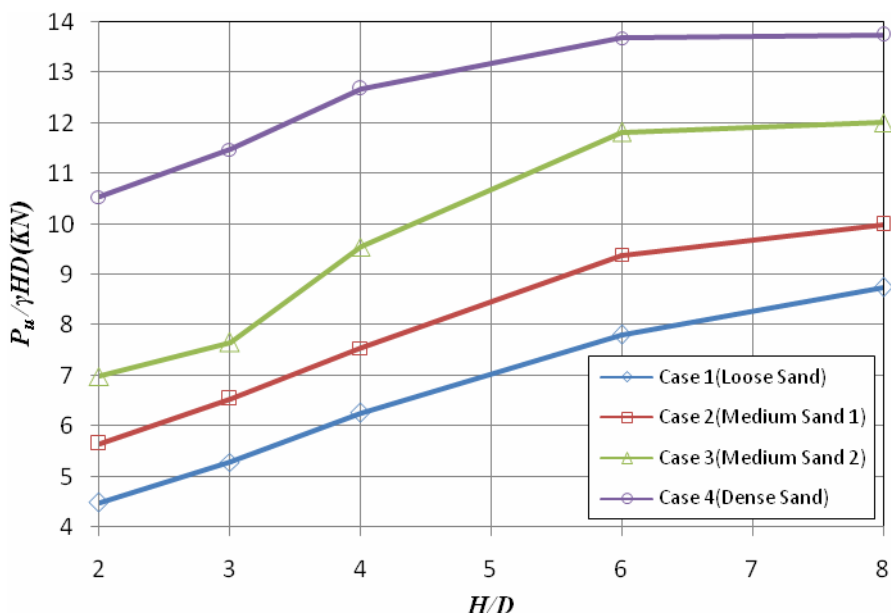


شکل ۸- منحنی بار تغییر مکان تحت بارگذاری جانبی در ماسه شل برای نسبت عمق دفن های مختلف



شکل ۹- منحنی بار تغییر مکان تحت بارگذاری جانبی در ماسه متراکم برای نسبت عمق دفن های مختلف

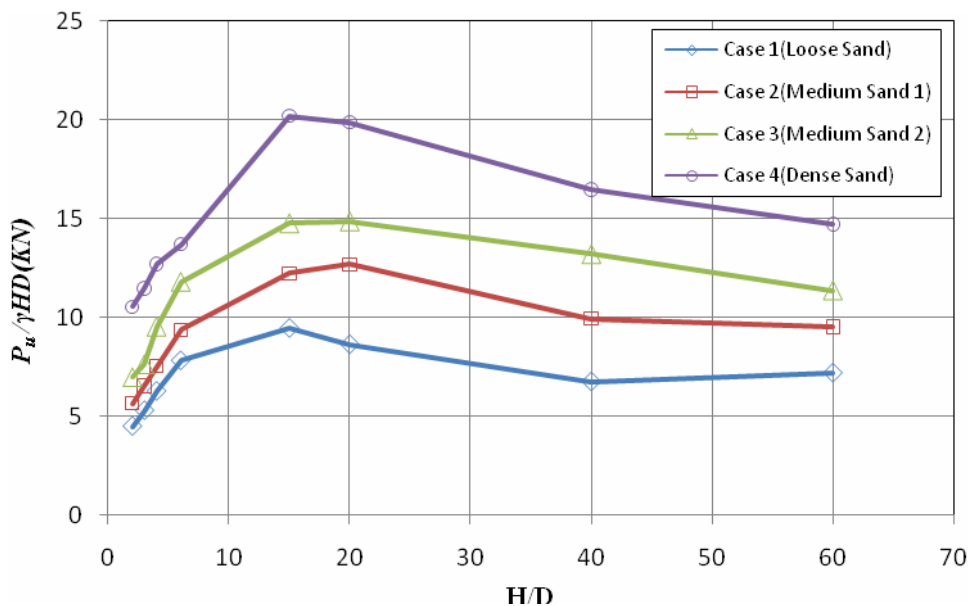
نیروهای اوج بی بعد بدست آمده از آنالیز تفاضل محدود برای H/D های مختلف در شکل (۱۰) مقایسه شده است.



شکل ۱۰- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری نسبت به عمق دفن لوله

آنالیز المان محدود برای اعماق دفن زیاد

آنالیزهای المان محدود بیشتری برای نسبتهای دفن زیاد تا ۶۰ انجام شد تا تغییر فاکتور ظرفیت باربری از حالت گسیختگی سطحی به مکانیسم های گسیختگی عمیق بررسی شود. یک لوله با همان قطر مورد استفاده قرار گرفت. در اعماق دفن خیلی بالا $H/D \geq 60$ تعیین نیروهای اوج بخاطر مشکلات انحرافات عددی در اثر تغییر شکل های زیاد المانهای اطراف لوله که به داخل حفره ایجاد شده پشت لوله متحرک داخل خاک فرو می ریزند، مشکل است. نتایج آنالیز عددی نشان می دهد که تحت حرکت جانبی فاکتور ظرفیت باربری تقریباً با افزایش نسبت عمق دفن بطور خطی در شرایط سطحی افزایش می یابد و به یک مقدار ماکزیمم در یک نسبت مشخص می رسد و بعد از آن با افزایش نسبت دفن تقریباً کاهش می یابد. عمقی که این تغییر وضعیت اتفاق می افتد "عمق دفن بحرانی" نامیده می شود و نیروی اوج متناظر با آن نیز "نیروی اوج بحرانی" خوانده می شود. بر اساس آنالیزهای انجام گرفته برای ماسه ها نسبت عمق بحرانی ۱۵ و فاکتور ظرفیت باربری متناظر با آن برای ماسه شل ۹/۵ و برای ماسه متراکم ۲۰ بدست آمد.



شکل ۱۱- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری نسبت به عمق دفن لوله در شرایط دفن عمیق



بحث و نتیجه‌گیری

بمنظور طراحی مقاوم سیستمهای انتقال سیالات در برابر خطرات لرزه ای و شناخت رفتار سیستم مرکب خاک و لوله ، آنالیز اندرکنش خاک - خط لوله تحت حرکات جانبی در ماسه با توجه ویژه به نیروهای اوج اعمالی به لوله در اعماق زیاد که در ALA ارائه نشده ، بررسی گردید. بازبینی راه حل های تحلیلی نشان می دهد که یک محدوده بزرگ برای پیش بینی فاکتور ظرفیت باربری لوله های مدفون وجود دارد ، خصوصاً وقتی نسبت عمق و زاویه اصطکاک افزایش می یابد اطلاعات محدودی برای مقدار فاکتور ظرفیت باربری وجود دارد .

آنالیز تفاضل محدود تست های انجام شده توسط [5] Hurley and Phillips ابتدا با دو مدل با داده های ورودی تستهای آزمایشگاهی انجام گرفت. نتایج نیروهای نرمال ماکزیمم محاسبه شده با نتایج آزمایشگاه برای هر دو نوع ماسه متراکم خشک و نیمه متراکم اشباع معقول بود. در ادامه آنالیزهای بیشتری برای ارزیابی تغییر وضعیت از شرایط سطحی به عمیق انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش نسبت عمق دفن لوله ، نیروی وارد بر لوله افزایش می یابد ولی در اعماق زیاد با توجه به تغییر مکانیسم گسیختگی خاک اطراف لوله ، مقدار فاکتور ظرفیت باربری کاهش می یابد. این آنالیزها نسبت دفن بحرانی و نیروی اوج بحرانی متناظر را برای استفاده در طراحی لوله ها در اعماق زیاد نتیجه داد .

مراجع

1. American Lifelines Alliance, ALA (2001) Guidelines for the design of buried steel pipe, Obtained from <http://www.americanlifelinesalliance.org>. 83 p.
2. Oversen, N. K., and Stromann, H. (1972) Design method for vertical anchor slabs in sand. *Proc., Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, New York*, **1**, 1481–1500.
3. Audibert, J. M. E., and Nyman, K. J. (1977) Soil restraint against horizontal motion of pipes. *J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, **103**(10), 1119–1142.
4. Trautmann, C. H., and O'Rourke, T. D. (1983) Behavior of pipe in dry sand under lateral and uplift loading. *Geotechnical Engineering Report 83-7, Cornell University, Ithaca, N.Y.*
5. Hurley, S. and Phillips, R. (1999) Large scale modelling of pipeline/soil interaction under lateral loading - Final Report. *Contract Report for Minerals Management Service, U.S. Department of the Interior, C-CORE Publication 99-C25.*
6. Neely, W. J., Stuart, J. G., and Graham, J. (1973) Failure loads of vertical anchor plates in sand. *J. Soil Mech. Found. Div.*, **99**(9), 669–685.
7. Rowe, R. K., and Davis, E. H. (1982) The behavior of anchor plates in sand. *Geotechnique*, **32**(1), 25–41.
8. Hansen, J.B. (1961). The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces. *Bulletin 12, Danish Geotech. Inst., Copenhagen*, 5-9.
9. Biarez, J., Boucraut, L.M., and Negre, R. (1965) Limiting equilibrium of vertical barriers subjected to translation and rotation forces. *Proc., 6th ICSMFE*, **2**, 368–372.
10. Bolton, M. D. (1986) The strength and dilatancy of sands. *Geotechnique*, **36**(1), 65–78.
11. Popescu. R., Nobahar. A., C-CORE (2003) 3D finite element analysis of pipe-soil interaction – effects of groundwater. *Final Report prepared for Minerals Management Service, C-CORE Report R-02-029-076, February 2003.*
12. Vesic A.S., Clough G.W. (1968) Behavior of granular materials under high stresses. *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*. **94**(SM3), 661-688.
13. Yoshima, Y., and Kishida, T. (1981) A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces. *Geotech. Test. J., ASTM*, **4**(4), 145–152.
14. Yimsiri, S., Soga, K., Yoshizaki, K., Dasari, G. R. and O'Rourke, T. D. (2004) Lateral and upward soil-pipeline interactions in sand for deep embedment conditions. *J. Geotech. Eng.*, **130**(8), 830-841.