سال اول، شماره ۱، اسفند ۱۳۹۲، صفحات ۱۹ تا ۲۸
نشریه آب و توسعه پایدار

2014, Vol.1, No.1, Pages 19 to 28
Journal of Water and Sustainable Development

مدل‌سازی تغییر شکل لوله و بستر آن در اثر بارگذاری در شبکه‌های انتقال آب

آرمین بوستانی[۱*]، سیدحسن گلمایی[۲]، حسین انصاری[۳]، سید محمد کالوندی[۴]

۱، ۳ و ۴ – به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
۲– دانشیار گروه آب، دانشگاه علوم کشاورزی ساری.
*(نویسنده مسئول، E-Mail: Armin.Boostani@stu.um.ac.ir)
تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۳
تاریخ پذیرش: ۹۲/۹/۲

چکیده

در شبکه‌های انتقال آب چگونگی استقرار لوله‌ها در ترانشه، متأثر از موقعیت مکانی، توپوگرافی مسیر و همچنین عوامل اقتصادی بوده که باید در طراحی این پروژه‌ها مد نظر قرار گیرد. ارزیابی رفتار این سازه‌های زیرزمینی و بررسی اثرات متقابل آن بر بستر اطراف لوله‌های مدفون در اثر بارگذاری‌های معمول، می‌تواند تحلیل مناسبی را برای انجام طراحی صحیح به مهندسین ناظر و طراحان این پروژه‌ها ارائه دهد. از این رو تعیین و تحلیل این مجاری و خطوط انتقال در اثر اعمال نیروهای موجود و تأثیرگذار در نشست و در پاره‌ای از مسائل تغییرشکل‌های جانبی امری ضروری می‌نماید. بدین منظور محدوده‌ای از طرح انتقال و توزیع آب سد دوستی به مشهد انتخاب گردید. سپس با احتساب بارگذاری‌های مختلف، مشخصه‌های لوله فولادی به کار رفته و مصالح پرکننده ترانشه، به بررسی نشست و تغییر شکل لوله و بستر آن توسط دو مدل عددی اجزای محدود Ansys و Plaxis پرداخته شد. میانگین جابجایی لوله در راستای قائم با پلاکسیس و انسیس بترتیب برابر ۲۲/۵ و ۸/۵ میلی متر شد. همچنین در مقطع مورد بررسی، لایه سطحی (آسفالت) ۵ سانتی‌متر فرو نشست داشت. فرونشست سطحی با افزایش فشار داخلی لوله تا حد مجاز کاهش یافت. بدلیل مدل کردن بهتر اندرکنش سازه با خاک و نیروهای جانبی تأثیرگذار و در نظر گرفتن تغییر شکل‌های جانبی در جدار لوله، نتایج بدست آمده از مدل انسیس در مورد نشست کلی لوله و جناحین از پلاکسیس بهتر بوده و توصیه می‌شود در طراحی‌ها، نتایج این مدل لحاظ شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه انتقال آب، مدل‌سازی عددی نشست، لوله فولادی آب، انسیس، پلاکسیس.

Modeling deformation of the pipe and bed loading on water networks

A. Boostani[1*], S.H. Golmaei[2], H. Ansari[3], S.M. Kalvndi[4]

1, 3 ,4 – PhD Student, Associate Professor & Former MSc, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
2- Associate Professor, Sari Agricultural Sciences & Natural Resources University, Iran.
* (Corresponding author Email: a.boostani1985@gmail.com)
Received: 25-10-2013
Accepted: 23-11-2013

Abstract

Water networks, water pipes in the trenches how to establish, influenced by location, topography and direction of economic factors in the drawings of these projects should be considered. evaluating the behavior of underground structures and the interaction effects on the surrounding context of buried pipes of normal loadings, can do the appropriate analysis to properly design supervisor engineers and designers of these projects provide. Hence this analysis to determine the ducts and transmission lines for the acts of existing forces and effective in settlement some of the issues essential to the deformation of side offers. For this purpose a range of water transmission and distribution project dousti dam was selected. Then, counting different loadings, characteristics of steel pipe used in filling trenches and materials, settlement to review and change the tube and bed by Ansys finite element numerical model and Plaxis was paid. Average vertical displacement along the tube and Ansys, Plaxis respectively against 22.5 and 8.5 mm was. Also in section studied, the surface layer (asphalt) 5 cm had subsided. With increased pressure inside the pipe to the limit, surface subsidence declined. Model due to better soil structure interaction and side impact forces and also in terms of deformation in the side wall of the pipe, the results of the model in Ansys general settlement of the pipe and around, better as Plaxis and is recommended in the design, the results, This model is considered.

Keywords: Water network, Settlement Numerical modeling, Steel water pipe, Ansys, Plaxis.

مقدمه

خطوط انتقال در شبکه‌های آبیاری و آبرسانی به مثابه شریان‌های حیاتی[1] برای پیکره این طرح‌ها به شمار می‌رود. شریان‌های حیاتی مهمترین نشانه‌های توسعه و آبادانی هر جامعه‌ای محسوب می‌شوند. اطلاق کلمه حیاتی به سیستم‌های مزبور از دو جنبه مطرح است: اول آن که تداوم حیات طرح به حفظ عملکرد این سیستم‌ها بستگی دارد. دوم آن که آسیب دیدن این سیستم‌ها خود می‌تواند باعث وخیم‌تر شدن وضعیت بحران و صدمات اقتصادی و اجتماعی برای بهره‌برداران گردد. توجه به اندرکنش عملکردی- آسیبی این شریان‌ها از دو منظر قابل تأمل است.

از سویی عملکرد شریان‌های حیاتی مختلف تا حدودی به دیگر سیستم‌ها بستگی داشته و از سویی دیگر آسیب دیدن برخی از شریان‌ها می‌تواند مستقیم و یا با واسطه به شریان‌های دیگر آسیب برساند (صالحیان، ۱۳۸۷). در مواردی که امکان احداث کانال‌های انتقال نبوده و بنا به دلایلی اعم از غیر یکنواخت بودن مسیر و سنگی بودن کف و همچنین طولانی بودن مسیر که مانع استفاده از مجاری سطحی پایه‌دار خواهد شد، از مجاری زیرزمینی به منظور طرح‌های انتقال آبی استفاده می‌شود.

مجرای زیرزمینی راهی است برای انتقال سیالات که برحسب ضرورت‌های مهندسی درون خاک به صورت مدفون قرار داده می‌شود و سیال به صورت آزاد و یا تحت فشار درون آن جریان می‌یابد. مجاری زیرزمینی در خطوط انتقال آب، نفت، گاز، شبکه توزیع آب، شبکه جمع‌آوری فاضلاب، شبکه‌های زهکشی، کالورت‌ها، مجرای تخلیه تحتانی سدها و نظایر آن مورد استفاده قرار می‌گیرند (نشریه ۱۸۵، ۱۳۷۸).

در صورتی که لوله‌های مورد استفاده در مجاری زیرزمینی صلب باشد از لوله‌های چدنی[2] و برای مجاری نیمه انعطاف‌پذیر تا انعطاف‌پذیر کامل از لوله‌های فولادی، پلی اتیلن و فایبرگلاس استفاده می‌شود. روش استقرار در ترانشه به صورت کامل جزء معمول‌ترین روش‌های کارگذاری مجاری زیرزمینی می‌باشد. در این روش مجرا در یک ترانشه نسبتاً باریک که در خاک دست نخورده حفر شده، کار گذاشته و روی آن خاکریزی می‌شود. به دلیل شرایط خاص طراحی و اجرای مجراهای زیرزمینی، لزوم توجه به بارهای وارده محیطی و خارجی در تعیین نشست خاکریز و لوله، برای جلوگیری از حوادث غیرمترقبه و ناگهانی امری اجتناب‌ناپذیر است. تعیین نیروهای وارد بر این مجاری و خطوط انتقال در اثر اعمال بارگذاری‌های مؤثر در نشست و در مواردی تغییر شکل‌های جانبی می‌تواند معیار مناسبی به منظور طراحی و مقاوم‌سازی شبکه به کارشناسان و مهندسان طراح این پروژه‌ها دهد.

امروزه به کمک نظریه مارستون می‌توان بارهای وارد بر مجاری زیرزمینی را برحسب نوع بستر با دقت مهندسی مناسبی تخمین زد. این نظریه به نام آنسون مارستون[3] که آن را اوایل قرن بیستم یعنی طی سال‌های ۱۹۰۴ تا ۱۹۳۲ در دانشگاه ایالتی آیوا[4] بسط داد، نام‌گذاری شده است (گروه نویسندگان و کارگروه ارزیابی وزارت نیرو، ۱۳۸۳). اسپانگلر اولین شخصی بود که روی رفتار لوله‌های فلزی مدفون و تابع سختی نسبی آن‌ها به مطالعه پرداخت (Spangler، ۱۹۴۱). برای تحلیل و بررسی نیروهای دخیل و رفتار لوله‌های فولادی از دو مدل انسیس و پلاکسیس که بر مبنای Finite elements عمل می‌کردند، استفاده شد.

در مورد لوله‌های فولادی و اکثر لوله‌های انعطاف‌پذیر مدفون توانایی مقابله با نیروهای رانش زمین و زلزله وجود دارد. همچنین نیروی مومنتوم در فشار داخلی لوله، فقط در زانویی، تبدیل‌ها و اتصالات و در مکان‌هایی که تغییر مقطع اتفاق می‌افتد تأثیرگذار بوده و در راستای طولی، طبق استاندارد آوا[5] قابل اغماض و صرف‌نظرکردن می‌باشد. در تحلیل عددی اجزاء محدود، مش‌بندی مدل‌ها و اتخاذ تعداد گره مناسب و کیفیت خاک اطراف لوله‌ها از نظر خواص مهندسی- مکانیکی خاک در تعیین تنش‌های موجود مؤثر می‌باشد (Hyde و همکاران، ۲۰۰۹).

نشست یا تغییر شکل تاج لوله بر اثر فشار وارد بر لوله بوده و از طرف دیگر مقاومت تکیه‌گاهی یا ظرفیت باربری مجرای زیرزمینی تابعی از شکل، نوع مصالح تشکیل دهنده، بسترسازی و نحوه اجرای خاکریز در جناحین و روی آن در هنگام اجرای مجرا می‌باشد. TeDatta (۱۹۹۹) با توجه به تئوری پوسته و با در نظر گرفتن تقارن محوری، آنالیز سه بعدی لوله مدفون را برای تعیین پاسخ دینامیکی لوله در برخورد با امواج فشاری که در طول لوله منتشر می‌شوند، انجام دادند.

نبود مطالعات دقیق در مورد نوع رفتار لوله‌های مدفون و تعیین میزان نشست و همچنین کنترل این پدیده، سبب شد تا در مطالعه‌ای روی لوله فولادی با قطر بزرگ، به این موضوع پرداخته شود. همچنین در شهر مشهد تاکنون مطالعه‌ای روی مقاطع عرضی لوله‌های فولادی درباره پارامترها و نیروهای مؤثر و وارده بر لوله نشده بود و فقط در مواردی، به خوردگی و محاسبه ضخامت‌های بهینه براساس عوامل اصلی تأثیرگذار در تغییر شکل پرداخته شده بود. از طرفی نبود یک الگوی جامع برای استفاده از یک نرم‌افزار خاص در مورد مدل سازی نشست لوله، لزوم اهمیت پرداختن به این موضوع را با بکار بردن دو مدل معمول در مسائل

سازه‌ای و ژئوتکنیکی و مقایسه نتایج این دو را با هم موجه می‌کرد. چوشی و همکاران، لوله‌های پلی اتیلن مدفون را از نظر بارگذاری و عکس‌العمل بین لوله و توده سنگ معدنی و ساختار خاک را به روش اجزاء محدود بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تنش و لنگر خمشی وارده بر لوله بستگی به شرائط هندسی و خصوصیات طبقات خاک بالای لوله دارد (Bhaskar و همکاران، ۲۰۰۱).

Jayadevan و همکاران (۲۰۰۶) گسیختگی و خزش خطوط لوله فولادی انتقال آب را در سطح زمین با روش عددی بررسی کردند. مشخص شد که بین تأثیر قطر و نسبت ضخامت لوله بر میزان تنش حاصل بر سطح جدار لوله و ایجاد درز روی آن تناظری مستقیم وجود دارد. همچنین با افزایش شدت و مقدار فشار داخلی لوله، قابلیت تغییر شکل[۶] جانبی لوله نیز به وضوح کاهش یافت.

Rahman و همکاران (۲۰۰۸) لوله مستقیمی با فشار داخلی یکنواخت تحت اثر بارگذاری سطحی را با نرم‌افزار انسیس مدل کردند. در مدل انسیس المان Shell 181 و در حالت ۴ گره مثلثی و با ۶ درجه آزادی در هر گره تعریف شد. نتایج مدل انسیس تطابق خوبی با داده‌های واقعی برای تحلیل بارگذاری و تعیین تغییر شکل لوله در راستای طولی داشت.

کانگ و همکاران، استحکام لوله‌های فولادی موج‌دار مدفون در خاک را با مطالعه اندرکنش خاک و سازه بررسی کردند. آن‌ها به اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین توزیع فشار سطحی روباره روی لوله‌های صلب با نوع انعطاف پذیر آن‌ها رسیدند. در این دسته‌بندی لوله‌های فولادی موج‌دار در طبقه لوله‌های نیمه انعطاف‌پذیر قرار داشتند. کانگ و همکاران برای محاسبه فاکتورهایی از قبیل تعیین تنش ماکزیمم روی جدار لوله، میزان انحنا و در نهایت شکست لوله از داده‌های عددی بدست آمده از مدل خاک- سازه بهره بردند. نتایج بدست آمده از مدل اجزای محدود مطابقت بسیار نزدیکی با داده‌های آزمایشگاهی و تجربی داشت (Junsuk و همکاران، ۲۰۰۸).

Guarracino و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر شرایط مرزی در تست لوله‌ها و مدل کردن با روش اجزاء محدود را در مواردی که لوله‌گذاری در عمق آب و شرائط زیر سطح ایستابی رخ می‌دهد بررسی کردند. آن‌ها بدین نتیجه رسیدند که در صورت نبود داده‌های واقعی و کارگاهی و بکارگیری آن‌ها در روش‌های عددی، صحت خروجی‌ها و تحلیل‌های مرتبط با مدل کردن از اعتبار برخوردار نیست. همچنین دریافتند که تغییر شکل و بارگذاری محاسبه شده روی لوله در مدل برای احتساب مومنتوم و کرنش لوله در زانویی‌ها تنها بستگی به هندسه و خواص مواد لوله و بستر دارد.

وفائیان (۱۳۸۲) اثر پلاستیک شدن دهانه تونل را با نتایج محاسبات مبتنی بر اجزای محدود در شرایط فرض الاستیک بررسی و با رابطه‌های تحلیلی مقایسه نمود. وی به این نتیجه رسید که در بسیاری موارد با کاربرد یک نرم‌افزار اجزای محدود مبتنی بر حل الاستیک- پلاستیک کامل با معیار موهر- کولمب می‌توان وضعیت رفتاری و جابجایی‌های محیط اطراف و بالای مجراهای مدفون در زمین‌های خاکی را پیش بینی کرد.

اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۳) از ترکیب دو روش عددی اجزای محدود و المان مرزی برای حل مسأله اندرکنش دینامیکی تونل و محیط اطراف بهره بردند. آن‌ها به جای بکارگیری از توابع شکلی هرمیتین یا لاگرانژین از توابع شکل مثلثاتی استفاده کردند. این ترکیب روش‌ها به منظور ارزیابی پوشش سازه‌های دایره‌ای مدفون و تونل‌ها به عبور امواج تخت بود. در خاتمه آن‌ها دریافتند که المان مفروض در مسأله در مقایسه با المان‌های معمول در مدل سازی پوشش (مانند المان های مسطح یا پیوسته) دارای درجات آزادی بسیار کمتری بود و معرفی سختی پوشش در تحلیل اندرکنش محیط دوبعدی به محیط سه بعدی، علی الخصوص در تونل‌هایی با محور غیر مستقیم با استفاده از المان تیر امکان پذیر خواهد بود. از طرفی طبق تحقیقات مهین روستا و یعقوبی (۱۳۸۷) تغییر مشخصات خاک بر فشار جانبی خاک بر مخازن مدفون مؤثر است.

ابریشمی و یزدی‌نژاد (۱۳۸۷) برای مدل‌سازی خوردگی فاضلاب‌روهای بتنی در شبکه فاضلاب شهری مشهد مقدس اقدام به مدل‌کردن لوله کردند. سپس نتایج آنالیز آن‌ها تحت یک بارگذاری ثابت و برای شرایط یکسان در نقاط بحرانی لوله برداشت شد. مشخص شد که نتایج حاصل از مدل فریم به لحاظ سادگی و کارآمدی و تشابه با نظریه مارستون، بهترین گزینه برای مدل‌سازی لوله‌های بتنی جدید خواهد بود. بوستانی و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی و مدل‌سازی نشست خاکریز احداث شده روی فونداسیون خاکی با دو مدل انسیس و پلاکسیس پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که پس از پایان ساخت خاکریز (به صورت لایه لایه) از طرفی با کاهش فشار آب حفره‌ای اضافی، پایداری خاکریز افزایش و از سویی دیگر بدلیل کاهش نفوذپذیری بافت خاک پی، در خاکریز و لایه مستقر در روی آن (پی رسی) نشست بوجود آمد. این نشست در ابتدا تنها بصورت دگرشکلی در راستای قائم اتفاق افتاد. نرم‌افزار انسیس و پلاکسیس نیز بدلیل قابلیت‌های سازه ای که دارا بودند، توانایی مدل‌کردن نشست توده خاک خاکریز روی پی و مدل کردن تغییر شکل‌های حاصل را داشتند.

طرح انتقال آب سد دوستی به مشهد مقدس که جزء پروژه‌های

جامع ملی در زمینه انتقال، توزیع و تأمین آب در سال‌های اخیر بوده که به دلیل شرایطی از قبیل: نوع لوله بکار رفته، نحوه انتقال و استقرار لوله و همچنین بسترسازی، نوع خاک‌ها، خاکریزی جناحین، روسازی و بارهای اعمال شده کاملاً مشابه شبکه‌های انتقال آبیاری و زهکشی می‌باشد، انتخاب گردید.

نبود تحلیل‌های سازه‌ای جامع در رابطه با چنین شبکه‌هایی با اقطار بزرگ و لوله‌های فولادی، نیاز به بررسی‌های جامع و امکان‌سنجی این طرح‌ها را در بخش کشاورزی در حال حاضر و آینده نه چندان دور، که شرایط اقلیمی و کمبود منابع آبی زیرزمینی و روی آوردن به برداشت از منابع سطحی آبی به آن دامن خواهد زد، ضروری‌تر می‌سازد. در واقع عدم وجود معیار دقیق و تحلیل مناسب از نوع رفتار این مجاری و مصالح پرکننده ترانشه در برابر بارگذاری‌های معمول و مؤثر در پدیده نشست و تغییر شکل لوله‌های فولادی مستقر در ترانشه، استفاده از مدل‌های کامپیوتری که بر مبنای روش اجزای محدود کار می‌کنند را ضروری‌تر می‌سازد.

هدف اصلی از مدل‌سازی نشست و تغییر شکل لوله در اثر بارگذاری‌های معمول با دو نرم‌افزار، مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها با هم و انتخاب بهترین مدل برای تحلیل و طراحی بعد ژئوتکنیکی

مواد و روش ها

پس از بررسی‌های صورت گرفته، طرح انتقال و توزیع آب سد دوستی به مشهد مقدس برای مدل‌سازی عددی و محاسبه نیروها و تغییر شکل‌های داخلی و خارجی بر اثر بارهای وارده در نظر گرفته شد. خط انتقال از مخزن سد تا ایستگاه‌های تصفیه با لوله‌های فولادی به قطر ۲ متر اجرا شد. پهنه C که خط لوله مستقیم فولادی ST37 و از نوع اسپیرال با قطر یکسان ۱۰۰۰ میلی متر بود در حد فاصل میدان آزادی تا استقلال به طول ۱۲۴۳ متر کارگذاری گردیده است. در تقسیم بندی صورت گرفته توسط آب منطقه‌ای و آبفای مشهد، محدوده خطوط لوله به ۱۰ ناحیه پهنه‌بندی گردیده است (شکل ۱).

شکل ۱- موقعیت خط لوله مورد مطالعه

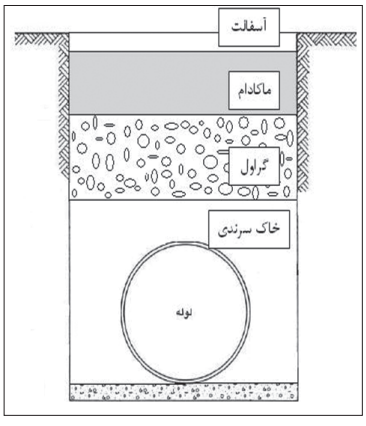
در مجاری مدفون تحت فشار، علاوه بر بارهای خارجی، باید نیروهای وارده شامل فشارهای داخلی نیز محاسبه شوند. فشارهای داخلی شامل فشار استاتیکی آب داخل لوله[۷] و فشار ناشی از ضربه آب[۸] و بارهای خارجی شامل فشار ناشی از وزن خاک و سربار سطحی می‌باشند. در خط انتقال گرانشی جریان از تراز بالا به تراز پایین است. در خطوط انتقال، فشار داخلی لوله مانند شبکه‌های تحت فشار توزیع آب شهری عامل تأثیرگذار در محاسبات نمی‌باشد. بدین منظور و فقط برای احتساب این مورد در مدل‌سازی عددی و با توجه به پتانسیل خط انتقال، فشار داخلی لوله در حالت میانگین برابر ۵ اتمسفر در مدل وارد شد. دبی در این مقطع برابر با ۷۸۰ لیتر در ثانیه بود.

ضریب هیزن ویلیامز براساس کالیبراسیون شرکت سازنده مجاری آب بر زیرزمینی می‌باشد. بنابراین در این مطالعه نیز سعی بر آن شد تا دقیقاً خصوصیات خاک بستر و مصالح پرکننده ترانشه در مدل فرض شود تا بتوان به تحلیلی دقیق از میزان نشست و نوع رفتار این مصالح رسید.

اگر مسأله نیاز به تحلیل‌های چندگانه به صورت همزمان داشته باشد، انسیس به راحتی از عهده این کار بر می‌آید. نتایج مدل پلاکسیس بدلیل لحاظ نکردن تغییرشکل‌های جانبی و کمانش مقطع که در جهت تعدیل نشست در راستای قائم بود، با خطای بیشتری بدست آمد. روسازی (لایه آسفالت) به علت نبود تراکم لازم در لایه زیرین در مقطع مورد مطالعه حدود ۵ سانتی متر نشست در هر دو مدل برابر (نیمی از ضخامت آسفالت) و لوله نیز با احتساب تغییر شکل جانبی حدود ۸/۵ میلی‌متر در راستای قائم در مدل انسیس و حدود ۲۲/۵ میلی متر خروجی پلاکسیس جابجا شد. البته با توجه به کم بودن مقدار خروجی هر دو مدل و استانداردهای موجود، هر دو از ضریب اطمینان بالایی در جهت اطمینان برخوردار بودند ولی بهتر اینست که در طراحی مجاری زیرزمینی، نتایج حاصل از مدل انسیس لحاظ گردد.

برای لوله‌های فولادی با جدار صاف برابر ۱۲۵ تا ۱۳۰ لحاظ شده است. اهمیت چگالی (دانسیته) خاک و یا درجه تراکم آن و تأثیر نوع آن در مشارکت در ظرفیت باربری مجاری زیرزمینی انکارناپذیر است. عرض ترانشه ۲ متر و در طبقه مجراهای عریض می‌باشد (شکل ۲).

از پارامترهای خاک، دو عامل ضریب پواسون و مدول یانگ در تعیین نشست خاک اهمیت بیشتری داشته و اصولاً زوایای اصطکاک داخلی و اتساع در صورت تغییر، تأثیر چندانی در پدیده نشست خاک نخواهد داشت (جدول ۱).



شکل ۲– نحوه استقرار لوله و مصالح درون ترانشه

جدول ۱– مشخصات مصالح درون ترانشه

کمیت ها	مشخصه	خاک سرندی	گراول	ماکادام	آسفالت	واحد
ضخامت	h	۱۴۰	۴۰	۳۰	۱۰	cm
چگالی	γ	۱۸	۲۶	۲۶	۲۳/۵	(KN/m^3)
مدول یانگ	E	۱۲۰۰۰	۶۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	(KN/m^2)
چسبندگی	C	۴	۱	۱	۱	(KN/m^2)
ضریب پواسون	v	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۵	
زاویه اصطکاک داخلی	φ	۲۵	۳۷	۴۰	۳۵	(o)

هر چه خاک ریز دانه‌تر باشد و جنس آن نرم‌تر، ضریب پواسون افزایش می‌یابد. برای اطمینان در حالت بینابینی برای کنترل نشست آنی بستر لوله، از ۱۰ سانتی‌متر خاک با بافت ریزدانه (خاک سرندی) استفاده شده است. معمولاً می‌توان خاک انتخابی را با سرند نمودن خاک‌های حاصل از خاک‌برداری تهیه نمود ولی چنان‌چه خاک‌های حاصل از حفاری ترانشه برای انجام خاکریزی مناسب نباشد، خاک انتخابی از منابع قرضه و بر اساس دستورهای مهندس مشاور تأمین خواهد گردید.

بار وسائل نقلیه برای کامیون و آئین نامه ایران برابر ۸ تن بر متر مربع بار درجا و یا به صورت معادل در مدل‌سازی برابر ۱۸۰۰ کیلونیوتن بر متر مربع و شتاب ثقل نیز ۹/۸۱– در جهت قائم و به سمت پایین در محیط دو نرم‌افزار اعمال شد. در جدول (۲) به ترتیب، خصوصیات آب داخل لوله و فولاد آورده شده است. خصوصیات برای آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد فرض شده است.

جدول ۲– مشخصات آب درون لوله و فولاد لوله

مشخصات	آب	واحد	فولاد	واحد
مدول حجمی بالک (مدول الاستیسیته)	۲/۱	GPa	۲۰۰۰۰۰	$(\frac{N}{mm^2})$
لزجت (ویسکوزیته)	۰/۰۰۰۱۱۵	$(Kg.s/m^2)$	–	–
ضریب پواسون	–	–	۰/۳	–

ضخامت جدار لوله ۱۲ میلی متر بود. صلبیت خمشی برای جدار خارجی با احتساب مدول الاستیسیته برای فولاد که در مدل ها لحاظ خواهد شد، از طریق رابطه زیر بدست می آید. در این روابط I: مـمان و EI: صلبیت خمشی مجرا برحسب نیوتن بر میلی متر مربع می باشد.

$$I = \frac{t^3}{12} = 144(mm^4) \quad (۱)$$

$$EI = 2\times10^5 \times 144 = 2.88\times10^7 \quad (۲)$$

یکی از عوامل مهم خرابی در لوله هایی با اقطار بزرگ، بوجود آمدن نیروهای محوری به صورت کشش و فشار در این لوله‌ها بر اثر اعمال نیروهای شدید از قبیل امواج لرزه‌ای و ناگهانی و نیروی وارد از سقوط اجسام سنگین می باشد. تنش‌های خمشی و در واقع لهیدگی در جدار مجاری انعطاف‌پذیر کارگذاشته شده در خاک متراکم می‌تواند مسأله‌ساز گردد. لنگر خمشی و نیروی محوری فشاری بوجودآمده در مقاطع دایره به علت بارهای خارجی به شرح زیر است:

$$M_c = AW_c r \quad (۳)$$

$$R_c = BW_c \quad (۴)$$

که در آن: W_c: بار خارجی وارد بر واحد طول لوله، M_c: لنگر خمشی برای واحد طول جدار، R_c: نیروی محوری فشاری برای واحد طول جدار، r: شعاع متوسط لوله و Aو Bضرائب تجربی استانداردهای موجود است. پلاکسیس نرم افزار المان محدود پیشرفته ای می باشد که برای تحلیل تغییر شکل‌ها و تحلیل پایداری در پروژه های ژئوتکنیکی کاربرد دارد. این نرم‌افزار به کمک روش ساده گرافیکی امکان استفاده سریع از مدل اجزای محدود را فراهم می سازد و در آن محاسبات به صورت خودکار صورت گرفته و جزییات و نتایج محاسبات به صورت خیلی واضح قابل ترسیم و نمایش می باشد. کاربردهای ژئوتکنیکی نیازمند مدل های پیوسته پیشرفته برای شبیه سازی رفتار غیر ایزوتروپیک و غیر خطی وابسته به زمان خاک می باشد(Brinkgreve، ۲۰۰۳).

نرم افزار انسیس نیز به منظور مدل سازی سازه، خاک و اعمال شرائط مرزی مناسب با تحلیل عددی، دارای قابلیت مناسب می باشد. همچنین نرم افزار انسیس دارای کارایی مناسب در تحلیل دینامیکی می باشد. سعی بر آن شده تا با اتخاذ انواع تحلیل‌های خطی استاتیکی و گاه در مواردی تحلیل دینامیکی، مش‌بندی مناسب با تنوع المان‌های دو بعدی موجود، بتوان از انسیس استفاده نمود. به عبارت دیگر، اگر مسأله نیاز به تحلیل‌های چندگانه به صورت همزمان داشته باشد، انسیس به راحتی از عهده این کار برمی آید.

در هر دو مدل محیط خاک با حالت بینابینی الاستو – پلاستیک و معیار مکانیکی پارامترهای خاک نیز موهر– کولمب لحاظ گردید. چسبندگی، زاویه اتساع و اصطکاک داخلی جزء مشخصه‌هایی از خاک می باشد که در مدل انسیس و از معیار موهر– کولمب قابل واردکردن نبود. در نتیجه از مدل رفتاری دراکر– پراگر برای تعیین این شاخص‌ها در مسأله استفاده شد. این مدل رفتاری، امکان بررسی سخت شدگی و نرم شدگی مصالح را به صورت همسان فراهم می سازد(Prager، ۱۹۵۶).

در آنالیزهای دو بعدی امکان انتخاب دو نوع المان ۶ گره‌ای و ۱۵ گره‌ای مثلثی در تحلیل‌ها وجود دارد. نیروهای گرهی بر گره ها اعمال می شوند و تغییر مکان ها در حالت آزادی نیز در گره‌ها در نظر گرفته می شوند. برای دستیابی به دقت بیشتر در مسأله، المان‌های ۱۵ گرهی محاسبات تنش‌ها و بارها و گسیختگی خصوصاً در هندسه مواد و لوله لحاظ شد. تابع تقریب جابجائی المان ها به عنوانپیش فرض، مرتبه دوم در نظر گرفته شده است.

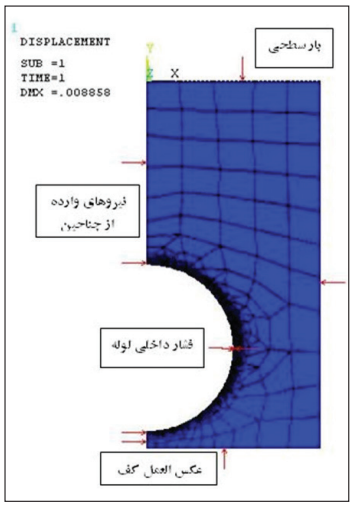
از المان Plane 42 در مدل‌سازی انسیس استفاده شده و اندرکنش سطح به سطح برای سطح برخورد خاک – سازه فرض شد. بار خارجی برابر با ۱۸۰۰ کیلو نیوتن بر متر مربع (بار زنده ناشی از حمل و نقل)، علاوه بر بار خاک سطحی روباره فرض شد. بار فرض شده برای بار خارجی مطابق آئین نامه آشتو در طراحی مجاری زیرزمینی می باشد که از توزیع فشار بوسینسک در محیط نیمه بی‌نهایت تبعیت می کند. به دلیل متقارن بودن لوله و مصالح پرکننده خاکریز در جناحین و اطراف، در مدل‌سازی، پروفیل یک نیمه مقطع مورد بررسی قرار گرفت. در مدل‌های طراحی شده، تغییر مکان المان های قرار گرفته در مرزهای پایین مدل در تمام جهت‌ها صفر در نظر گرفته شده و برای مرزهای چپ و راست جهت حرکت در جهت محور y آزاد بوده و در جهت x صفر منظور شد.

نتایج و بحث

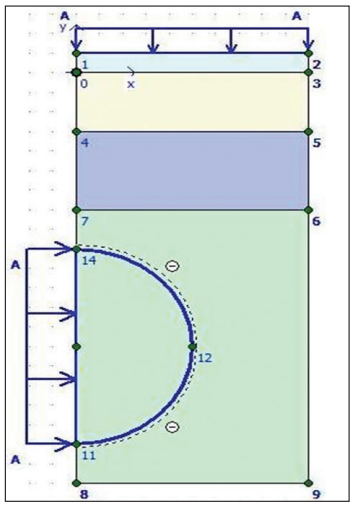
نمونه اولیه مدل پس از تعریف هندسه و تعیین مواد و بارگذاری در مدل انسیس و پلاکسیس بترتیب در اشکال (۳) و (۴) نشان داده شده است.

پس از تعریف مدل ها و با اتخاذ حالت ۱۵ گره مثلثی برای مش‌بندی

محیط مسأله اقدام شد. خط لوله به عنوان یک سازه جدار نازک در معرض انواع نیروهای استاتیکی و دینامیکی قرار دارد. در راستای طولی، در محل‌هایی که تکیه خط لوله بر بستر خود به هر نحوی کاهش یافته است، خط لوله در اثر وزن خود تحت تأثیر خمش قرار می‌گیرد (Kyriakides & Corona، ۲۰۰۷). برای محاسبه لنگر خمشی و نیروی محوری فشاری در کف به علت بارگذاری قائم که اصلی‌ترین پارامتر محاسباتی در میزان لهیدگی جدار مجرا شمرده می‌شود، ضرائب و با توجه به جداول آیوا به ترتیب ۰/۲۶۴ و ۰/۰۵۳ بدست آمد. مقدار M_c (لنگر خمشی برای واحد طول جدار) با توجه به روابط بالا برابر با ۸/۸۲ بدست آمد، همچنین میزان نیروی محوری فشاری (R_c) نیز برابر با ۱/۵۹ کیلو نیوتن در واحد طول جدار شد. با توجه به مقادیر بدست‌آمده، لوله فولادی اسپیرال مورد مطالعه با میزان کربن کمتر از ۰/۲٪ در برابر لنگرها و نیروی محوری بدست آمده مقاوم بوده و در نتایج هر دو مدل، گسیختگی در جدار لوله گزارش نشد.



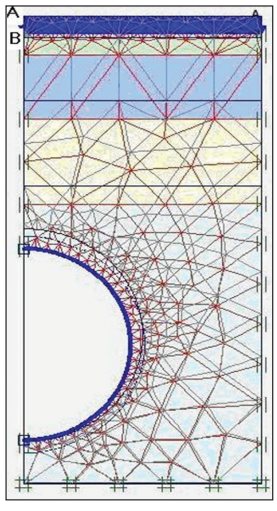
شکل ۳- مدل تعریف شده در محیط انسیس



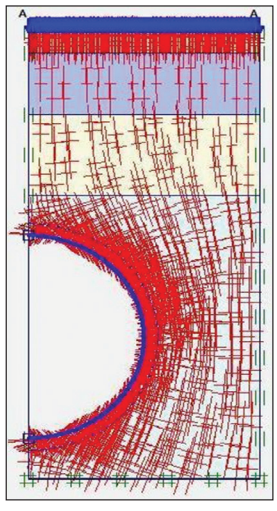
شکل ۴- محیط تعریف شده در محیط پلاکسیس

مدل پلاکسیس

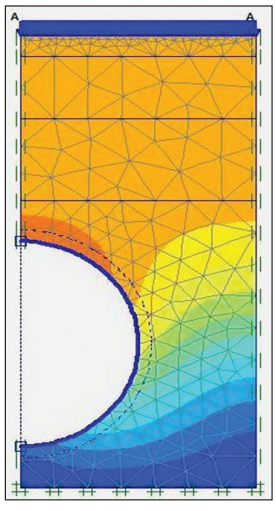
پس از بارگذاری اولیه، میزان تنش مؤثر کل در محیط مسأله مدل شد. بیش‌ترین تنش در هر دو مدل در اطراف پوشش خارجی (جدار لوله) اتفاق افتاد. همچنین تمرکز تنش‌ها بیش‌تر در وسط (مرکز) پوسته خارجی اتفاق افتاد. در شکل (۵) نشست لایه سطحی و روسازی آسفالت به میزان ۵ سانتی متر دیده می‌شود (از A تا B). در شکل (۶) تنش کل مؤثر بدست آمده در محیط مسأله پس از بارگذاری مشخص شده است. جابجایی کل لوله فولادی در راستای قائم نیز به میزان ۲۲/۸ میلی متر بدست آمد (شکل ۷).



شکل ۵- نشست لایه سطحی (آسفالت)



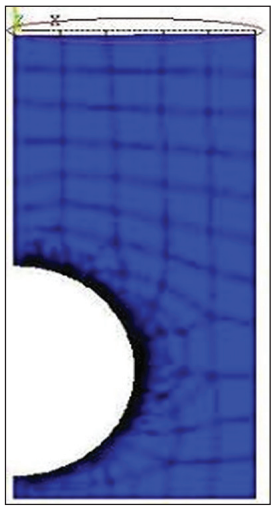
شکل ۶- توزیع تنش مؤثر کل در محیط



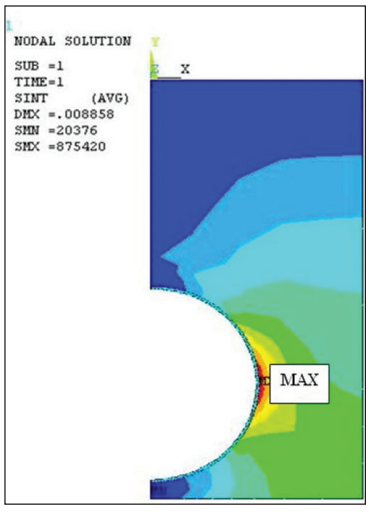
شکل ۷- جابجایی کل در راستای قائم

مدل انسیس

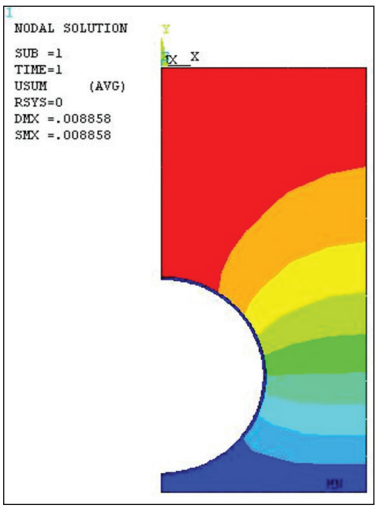
در محیط انسیس، نشست لایه سطحی مشابه مدل پلاکسیس دیده شد (شکل ۸). تنش ماکزیمم در وسط جدار خارجی لوله ۱۱۶ مگا پاسکال بودکه تا حد تنش تسلیم فولاد فاصله زیادی داشته لذا خطر گسیختگی جدار وجود ندارد (شکل ۹). حداقل تنش تسلیم فولاد مصرفی باید بزرگتر از ۱۹۰ نیوتن بر میلی متر مربع باشد، همچنین بیشترین مقدار تنش مؤثر در مرکز جدار خارجی لوله بدست آمد (۱۱۶ مگا پاسکال) که روی شکل (۱۲) نشان داده شده است. در شکل (۱۰) جابجایی کل لوله و بافت جناحین بر اثر بارگذاری در مدل انسیس مشاهده می شود که این میزان در ابتدا برابر ۸/۸ میلی‌متر بدست آمد، که با تغییر المان مورد بررسی با شرایط مشابه (Plane 82) این میزان به ۸/۳ میلی متر رسید. به طور میانگین نشست لوله نسبت به حالت اولیه پس از بارگذاری ها، مقدار ۸/۵ میلی متر در نظر گرفته شد.



شکل ۸– نشست موضعی آسفالت



شکل ۹– تنش مؤثر کل در محیط



شکل ۱۰– جابجایی کل (مجرا و مصالح در ترانشه)

مقایسه دو مدل و نتیجه گیری

آسفالت سطح در مقطع مورد بررسی به میزان نیمی از ضخامتش (۵ سانتی‌متر) نشست می‌کند، که این نشست علاوه بر بارگذاری‌های اعمالی، به عواملی چون: عدم اجرای صحیح زیرسازی و تراکم لازم، ضربه‌ها و تکانه‌های ناگهانی ناشی از وسائل نقلیه سنگین، بارهای ناشی از تغییرات دمای محیط، تغییر رطوبت در مجاری زیرزمینی و یا در خاک، بارهای ناشی از تغییر مکان خاک، بارهای اعمال شده توسط ریشه گیاهان، بارهای ناشی از نشست نسبی سازه‌هایی که مجاری به آن‌ها متصل شده‌اند و یا بارهای ناشی از ناهماهنگی‌های خاک بستر و یا شالوده مجاری زیرزمینی که به بارهای اتفاقی موسومند، بستگی دارد.

افزایش ضخامت لوله تا حد مجاز، سبب کاهش تنش‌های خمشی و محوری شده، در صورتی که با افزایش شعاع داخلی لوله فقط تنش‌های محوری کاهش می‌یابد. به عبارتی با افزایش قطر لوله، قابلیت شکل‌پذیری آن افزایش یافته، در نهایت ایمنی لوله افزایش می‌یابد. باید دقت شود که معیارهای اقتصادی طرح نیز برای انتخاب قطر بهینه صورت گیرد. با توجه به مقدار بدست آمده برای تنش محوری (۱/۵۹ کیلونیوتن بر متر) در مسأله، نیازی به افزایش ضخامت خارجی لوله نبوده و مقدار توصیه شده توسط شرکت سازنده (صفا طوس)، از درجه اطمینان بالایی برخوردار است. با توجه به این که نیروهای داخلی ناشی از فشار جانبی در جهت عکس نیروهای داخلی ناشی از فشار قائم عمل می‌کند، وجود آن، عاملی برای کاهش نیروهای داخلی و افزایش ظرفیت باربری مجرا می‌باشد. دقت یا عدم دقت در بسترسازی و خاکریزی در جناحین و روی مجاری زیرزمینی می‌تواند باعث موفقیت و یا شکست پروژه گردد.

حالت بحرانی برای خط لوله زمانی رخ می‌دهد که خط لوله مجبور باشد، همانند زمین اطراف آن تغییر شکل دهد. در فصل مشترک دو خاک با سختی‌های متفاوت بیشترین تنش‌ها در مرز آن‌ها اتفاق می‌افتد. با توجه به بارهای قائم اعمال شده و نشست بستر و خاکریز جناحین، در صورتی که مقدار تراکم بستر لوله بین ۸۵٪ تا ۹۵٪ گرفته شود، تغییرشکل مجرا و خاک جناحین در محدوده مناسبی از درجه اطمینان قرار می‌گیرد (در مسأله ۹۰٪ مدل شد). همچنین مقدار مجاز تغییر شکل لوله با توجه به نوع پوشش اپوکسی به کار رفته در جدار لوله کمتر از ۵٪ قطر لوله (حداکثر تغییر

شکل مجاز) می‌باشد (۶/۳ میلی متر). بدلیل این که نتایج حاصل از هر دو مدل در خصوص نشست مجرا، کمانش مقطع، لنگر و نیروی محوری وارد بر جدار لوله، همگی در محدوده اطمینان از سوی استانداردهای موجود در زمینه طراحی مجاری فولادی آب بر زیرزمینی[۹] قرار داشت، می‌توان به هر دو مدل تا حد قابل قبولی اطمینان کرد.

در مدل پلاکسیس و شرائط فشار داخلی مینیمم برابر با ۳ اتمسفر، میزان نشست و جابجایی مجرا نسبت به استقرار اولیه ۲۲/۸ میلی‌متر بود که با افزایش فشار به میزان فشار استاندارد در خط انتقال (۵ اتمسفر)، این میزان در حدود ۰/۴ میلی‌متر کاهش یافته است. در نتیجه با افزایش فشار داخلی تا حد ماکزیمم مجاز برای مقابله با بار وارده قائم بر لوله و به عنوان نیروی مقاوم در جهت کاهش نشست نسبی مجرا و ستون خاک بالای آن، می‌توان میزان نشست نسبی را کاهش داد. اگر فشار آب شبکه بیش از فشار اسمی لوله بوده و آن را تحت تنشی بیش از تنش مجاز خود قرار دهد، در صورت تداوم و یا تکرار این پدیده، فشار مازاد منجر به شکست لوله می‌گردد. همچنین این مقدار نشست در مدل انسیس برابر با مقدار میانگین ۸/۵ میلی‌متر بدست آمد. نتایج مدل پلاکسیس بدلیل لحاظ نکردن تغییر شکل‌های جانبی و کمانش مقطع که در جهت تعدیل نشست در راستای قائم بود، با خطای بیشتری در مقدار بدست آمد.

در محاسبات مربوط به سازه‌های زیر سطحی (تونل، خطوط لوله،....) در صورتی که اندرکنش سازه با بستر پیرامونش مد نظر باشد، مدل انسیس نتایج بهتری از خود نشان می‌دهد (بوستانی وهمکاران، ۱۳۸۸). ظرفیت باربری مجرا تابعی از مقاومت ذاتی آن، مشخصات بستر، درجه تراکم و نوع خاکریز جناحین می‌باشد. در لوله‌های فولادی و به علت خاصیت انعطاف پذیری لوله، مقاومت ذاتی آن کم است و فشار مقاوم ایجاد شده در جناحین به علت تغییرشکل جانبی قابل توجه لوله، عامل اصلی در افزایش ظرفیت باربری آن است. انتخاب این ضخامت با احتساب خوردگی جدار در طراحی عمر پروژه برابر ۱۳/۵ میلی‌متر بدست آمد. این مقدار با ضخامت توصیه شده کارخانه سازنده که برابر با ۱۵ میلی‌متر بود، ۱/۵ میلی‌متر اختلاف دارد. تغییر شکل جانبی در مدل انسیس برابر ۶/۳ میلی‌متر بدست آمد. همچنین حداکثر تغییر شکل جانبی مجاز برابر با ۵ درصد قطر لوله و مقدار ۵۰ میلی‌متر می‌باشد که از مقدار ۰/۶۳ سانتی‌متر بدست آمده از رابطه آیوا بیشتر است؛ لذا تغییر شکل جانبی مجاز بوده و از درجه اطمینان بالایی در طراحی برخوردار است. توصیه می‌شود که در طراحی مجاری زیرزمینی، بدلیل در نظر گرفتن تغییر شکل افقی مجرا (کمانش مقطع) در محاسبات، نتایج حاصل از مدل انسیس لحاظ گردد.

نتیجه گیری و پیشنهادات

مطالعه‌ای روی میزان نشست و تغییر شکل لوله فولادی و بستر اطراف آن توسط دو مدل انسیس و پلاکسیس انجام شد. در مورد بستر و مصالح پرکننده ترانشه مشخص شد که همواره میزان جابجایی در خاک‌های نرم در اثر اعمال فشارهای قائم و بارهای دینامیکی در شرائط مشابه از خاک‌هایی با بافت سخت بیشتر است. به همین علت از مصالح درشت دانه در سطح استفاده می‌شود تا نشست کمتری داشته باشد. همچنین توصیه می‌شود از خاک‌های سرندی ریزدانه برای بسترسازی استفاده شود تا با نشست خود بارهای وارد شده به مجرا را به کف انتقال داده، موجبات پایداری لوله را فراهم آورد.

با بررسی و مقایسه‌ای که بین نتایج هر دو مدل صورت گرفت، مشخص شد که نرم‌افزار انسیس بدلیل ماهیت سازه‌ای و در نظر گرفتن کلیه تغییر شکل‌های احتمالی نظیر کمانش مقطع و اندرکنش خاک با سازه، نسبت به پلاکسیس بهتر می‌تواند مسائل مربوط به نشست و تغییر شکل لوله در بارگذاری‌های شهری را مدل و تحلیل کند. در نظر گرفتن و مدل‌کردن یک مقطع در محدوده خودش می‌تواند تحلیل صحیحی به طراح بدهد؛ ولی توصیه می‌شود که به منظور تحلیل جامع در مورد خطوط لوله در مواردی مشابه تأسیسات، دریچه‌ها، شیرها، فلنج‌ها و تبدیل‌ها در برخورد با لوله نیز مد نظر قرار بگیرند.

در روش عددی اجزای محدود با توجه به تغییر شکل‌های لوله‌ها اگر المانی در دست باشد که تغییر شکل‌های آن با تغییرات ایجاد شده در محیط همخوانی داشته باشد، به یقین از چنین المانی انتظار جواب‌های قابل قبول در تحلیل نشست و نیروهای وارد بر لوله‌ها می‌باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود در محل‌های اتصال لوله به تبدیل‌ها و محل‌هایی که قطر مجرا تغییر می‌کند، به دلیل تأثیرگذاری نیروهایی چون مونتوم و ضربه قوچ، با مدل انسیس و در دست بودن اطلاعات مسأله، اقدام به مدل‌سازی عددی محیط گردد. نتایج تحلیل موردی مسأله مذکور، می‌تواند معیارهای جدیدی برای طراحی و نظارت به بخش‌هایی چون مدیریت طراحی شبکه و تأسیسات سازمان آب و فاضلاب و در بعد اجرایی از نظر استقرار لوله در ترانشه، ترتیب لایه‌ریزی و تراکم مطلوب لازم به پیمانکاران دست اندرکار پروژه‌های انتقال آب شهری دهد.

پی نوشت

1- Life Line
2- Ductile
3- Anson Marston
4- Iowa State University
5- AWWA
6- Deformation
7- Hydrostatic pressure
8- Surge pressure
9- AWWA & DIN & ISO

منابع:

ابریشمی، ج. و یزدی نژاد، ج. ۱۳۸۷. بررسی خوردگی فاضلابروهای بتنی و پیشنهاد بهترین روش‌های مقابله با خوردگی. طرح پژوهشی مصوب کمیته تحقیقات شرکت آب و فاضلاب مشهد.

اسماعیلی، م.، وهدانی، ش. و نورزاد، ا. ۱۳۸۳. ارزیابی پاسخ دینامیکی پوشش تونل های دایروی به عبور امواج تخت. نشریه دانشکده فنی، ۳۸(۶): ۷۲۰-۷۰۹.

بوستانی، آ.، گلمایی، س.ح. و انصاری، ح. ۱۳۸۸. مدل سازی بستر و لوله در شبکه توزیع آب شهری به روش اجزاء محدود. مجموعه مقالات دومین کنفرانس سراسر آب، دانشگاه آزاد اسلامی بهبهان، ص: ۴۶۱-۴۵۰.

بوستانی، آ.، گلمایی، س.ح. و انصاری، ح. ۱۳۸۹. بررسی روند تغییرات فشار حفره ای در اثر احداث خاکریز جاده روی خاک‌های با بافت نرم با استفاده از روش اجزا محدود. مجموعه مقالات پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد. اردیبهشت.

صالحیان، ف. ۱۳۸۷. ارزیابی سازه‌ای منهول‌های شبکه جمع آوری فاضلاب در مقابل زلزله. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران.

نشریه ۱۸۵. ۱۳۷۸. ضوابط طراحی سازه‌ای مجاری آب بر زیرزمینی بتنی. انتشارات معاونت برنامه و بودجه. چاپ اول.

گروه نویسندگان و کارگروه ارزیابی وزارت نیرو. ۱۳۸۳. مهندسی خطوط لوله انتقال آب (منطبق بر ضوابط نشریه شماره ۱۸۵). انتشارات دانشگاه تهران. چاپ دوم.

وفائیان، م. ۱۳۸۲. الگوی دگرشکلی‌های خاک بر اثر احداث تونل دایره‌ای در آن. مجله استقلال، سال ۲۲، شماره ۲.

مهین روستا، ر. و یعقوبی، م. ۱۳۸۷. بررسی پاسخ استاتیکی و دینامیکی مخازن نیمه مدفون با توجه به جنس خاک بستر. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت.

Bhaskar J., Dean B. Durkee, Thomas & J. Wythes, 2001. Finite element modeling of a PE pipe heap leachate collection system , Finite Elements in Analysis and Design, 37: 979-996.

Brinkgreve R.B.J. 2003. Plaxis V8.2 Reference manual. Delf University of Technology, Netherlands.

Guarracino F., Walker A.C. & Giordano A. 2009. Effects of boundary conditions on testing of pipes and finite element modeling - International Journal of Pressure Vessels and Piping, 86:196–206.

Jayadevan K.R., Berg E., Thaulow C., stby E. and Skallerud B. 2006. Numerical investigation of ductile tearing in surface cracked pipes using line-spring, International Journal of Solids and Structures, 43:pp 2378–2397.

Junsuk K., Frazier P., Chai H., Yoo. 2008, Soil–structure interaction for deeply buried corrugated steel pipes Part I: Embankment installation, Engineering Structures 30:384–392.

Kyriakides S. & Corona E. 2007. Mechanics of Offshore Pipelines, Vol. I, Buckling & Collapse, Elsevier.

Prager W., 1956. A new method of analyzing stresses and strains in work hardening plastic solids. J. Appl. Mech. 23, 493–496.

Rahman S.M., Tasnim H. and Edmundo C. 2008. Evaluation of cyclic plasticity models in ratcheting simulation of straight pipes under cyclic bending and steady internal pressure - International Journal of Plasticity 24:1756–1791.

Spangler MG. 1941. The structural design of flexible culverts. Iowa state college-bulletin 30, vol: XI. Ames (IA).

Hyde T.H. Lou R., Becker A.A., 2009. Analysis of stresses in pipes indented by long external indentation & subsequent stress variation due to pressure fluctuations, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 86 :428–434.

TeDatta K. 1999. Seismic Response of buried Pipelines, A State of the art review, Nuclear Engineering & Design, pp: 271-284.