

# فشار خاک وارد بر مجاری جعبه‌یی مدفون در ترانشه به روش ترانشه‌ی ناقص تحت اثر فشار سربار

غلام موادی\* (دانشیار)

ابراهیم حسن خانی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

امیره‌هدی حلیان (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندسی عمران تبریز، زمستان ۱۳۹۸ (دوره ۲ - شماره ۴/۲، ص. ۶۵-۵۳)

طراحی مجاری جعبه‌یی مدفون تحت فشار سربار، نیاز به ارزیابی دقیق مقدار تنش‌های وارد بر وجوه مختلف مجرا دارد. چنانچه مجرا تحت فشار سربار بزرگ قرار داشته باشد، ارائه‌ی راهکاری به منظور کاهش مقدار تنش وارد بر جعبه حائز اهمیت است. در مطالعه‌ی حاضر، با ترکیب دو روش متداول دفن مجاری زیرزمینی (دفن در ترانشه و دفن در ترانشه‌ی ناقص)، روشی معرفی شده است که بتوان مقدار تنش وارد بر وجوه مختلف را کنترل کرد و آن را کاهش داد. به این منظور، ابتدا صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی انجام و سپس به مطالعه‌ی عددی اثر پارامترهای مختلف در مقدار ضریب اندرکنش برای وجوه مختلف مجرای جعبه‌یی تحت فشار سربار پرداخته شده است. تحلیل‌های عددی با استفاده از روش اجزاء محدود و به‌صورت دوبعدی صورت گرفته است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که توسعه‌ی قوس‌شدگی در خاکریز، عامل مهمی در کاهش مقدار تنش وارد بر سقف، دیواره و کف مجرای مدفون است.

**واژگان کلیدی:** مجرای جعبه‌یی، ترانشه، ترانشه‌ی ناقص، ضریب اندرکنش، قوس‌شدگی، اجزاء محدود.

gmoradi@tabrizu.ac.ir  
e.hasankhani@tabrizu.ac.ir  
mahdi@cc.iut.ac.ir

## ۱. مقدمه

خاکریز و دیواره‌ی ترانشه همراه با عمق کاهش می‌یابد و چنانچه مجرای در ترانشه قرار داشته باشد (روش دفن در ترانشه)، مقدار فشار کمتری را نسبت به مقدار فشار ناشی از وزن خاکریز و فشار سطحی تجربه می‌کند.<sup>[۱۷-۱۶]</sup> این کاهش فشار در ترانشه به دلیل گسترش قوس‌شدگی در خاک و کاهش تنش ناشی از آن است، که با استفاده از آزمایش‌های در محل،<sup>[۱۸،۱۰]</sup> مدل‌های عددی،<sup>[۲۱-۱۹]</sup> و مدل‌سازی فیزیکی،<sup>[۲۴-۲۲]</sup> مطالعه شده و تأثیر کاهش تنش وارد بر سقف مجرای مدفون در ترانشه به اثبات رسیده است. در روش دیگر که با عنوان روش دفن در ترانشه‌ی ناقص شناخته می‌شود، با قرار دادن یک لایه از مصالح با شکل‌پذیری بالا، مقدار تنش وارد بر سقف مجرا کاهش می‌یابد. در روش دفن در ترانشه‌ی ناقص، مصالح نرم قرار گرفته بالای مجرا، در اثر وزن خاکریز و فشار سطحی احتمالی موجود، دچار نشست می‌شوند و ستون خاک بالای آن نسبت به خاک مجاور نشست بیشتری را تجربه می‌کند. این اختلاف نشست باعث توسعه‌ی تنش‌های برشی به سمت بالا و توسعه‌ی قوس‌شدگی در ستون خاک می‌شود که منجر به کاهش تنش وارد بر سقف مجرای زیر آن می‌شود.<sup>[۲۵-۲۴]</sup> اما در اثر نشست ستون خاک بالای مجرا و در نتیجه انتقال تنش‌ها به ستون‌های کناری، مقدار تنش قائم در مجاورت مجرا

طراحی مجاری زیرزمینی به منظور انتقال آب، فاضلاب، تأسیسات مخابراتی و برقی، مسیر تردد عابر پیاده و موارد کاربردی دیگر، نیاز به تعیین مقدار فشار وارد بر مجرا تحت اثر بار ناشی از خاکریز و بارهای سطحی دارد.<sup>[۱]</sup> در شرایطی که مجاری زیرزمینی در خاکریزهای با ارتفاع زیاد و تحت اثر فشار سربار بزرگ قرار می‌گیرند، مجرا می‌تواند در اثر فشار وارده دچار خرابی و خسارت شود و نیز ممکن است در اثر احداث خاکریز، فشاری بیش از فشار طراحی بر مجرای مدفون موجود در محل وارد آید که در چنین موقعیتی طراحی مجدد و یا مقاوم‌سازی مجرا، غیراقتصادی و در مواردی غیرممکن است.<sup>[۴-۲]</sup> به علت اهمیت این موضوع، مطالعات زیادی توسط پژوهشگران به منظور تعیین تنش وارد بر مجاری مدفون تحت اثر فشارهای سربار صورت گرفته،<sup>[۹-۵]</sup> و به منظور کاهش و کنترل تنش وارده، مطالعاتی نیز به‌صورت آزمایشگاهی و عددی انجام شده است.<sup>[۱۱،۱۰]</sup> مطالعات مختلف نشان داده‌اند که مقدار تنش در خاکریز قرار گرفته در داخل ترانشه به دلیل توسعه‌ی اصطکاک بین

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۲، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۱، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۹.

DOI:10.24200/J30.2018.5720.2271

دچار افزایش می شود که باعث اعمال فشار جانبی بیشتری نسبت به حالت دفن در خاکریز به دیواره های مجرا می شود. [۳۳-۳۶، ۵]

لذا افزایش ایجاد شده ی فشار جانبی بر دیواره های مجرا باعث زیر سوال رفتن روش های به کار گرفته شده برای کاهش تنش وارد به مجرا در طراحی می شود. علاوه بر مطالعات در محل و مطالعات عددی و آزمایشگاهی، به منظور تعیین مقدار تنش وارد بر سقف مجرای مدفون در ترانشه و همچنین مدفون در ترانشه ی ناقص، روابط تحلیلی و تجربی توسط آیین نامه ها و پژوهشگران مختلف ارائه شده است، [۳۶-۳۹، ۱۲] که مطالعات بعدی انجام شده در این رابطه حکایت از عدم پیش بینی دقیق و صحیح مقدار تنش اعمالی به منظور انجام طراحی دارد. [۳۹-۴۷، ۴] با وجود این، به مقدار تنش جانبی وارد بر دیواره و کف مجرا و چگونگی محاسبه ی آن توجه اندکی شده است. به علاوه، روابط موجود برای فشار، فقط یک عدد ارائه می دهند که به معنی اعمال تنش بر سقف به صورت یکنواخت است. این در حالی است که تنش وارد بر مجاری مذکور، یکنواخت نیست و بسته به شرایط و روش اجرا، مجرا یک تنش غیر یکنواخت را تجربه می کند. [۳۹، ۳۳، ۲۶] با توجه به مطالب بیان شده و لزوم کاهش مقدار تنش وارد بر مجاری مدفون، به منظور ارائه ی طرحی با هزینه ی کمتر که اهمیت آن کاملاً مشخص است و در نوشتار حاضر به بررسی آن، به روشی که تاکنون مطالعه نشده، پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا به بررسی دو روش متداول دفن مجرا که یکی روش دفن در ترانشه و دیگری روش دفن در ترانشه ی ناقص است، پرداخته شده و در ادامه با ترکیب دو روش مذکور و براساس مکانیزم های کاهش تنش، روش دیگری معرفی و مقادیر تنش وارد بر مجرای مدفون مطالعه شده است. از آنجایی که روش معرفی شده تاکنون بررسی نشده و اطلاعاتی راجع به آن وجود ندارد، ابتدا به منظور صحت سنجی، با استفاده از روابط موجود در ادبیات فنی، مقدار تنش وارد بر سقف در دو روش اولیه مطالعه و مقایسه شده و پس از آن به مطالعه ی جامع روش پیشنهادی پرداخته شده و مقادیر تنش وارد بر مجرای مدفون تحت تأثیر پارامترهای مختلف ارزیابی شده است. تحلیل ها با استفاده از روش اجزاء محدود غیرخطی و به صورت دوبعدی انجام و نتایج در قالب تنش وارد و ضریب قوس برای سقف، دیواره و کف مجرا ارائه شده است.

## ۲. معرفی مدل رفتاری و پارامترهای آن

در مطالعه ی حاضر، انتخاب مدل رفتاری مناسب برای مصالح مورد استفاده در تحلیل های انجام گرفته حائز اهمیت بوده و بنابراین در ابتدا برای خاک و ژئوفوم، مدل رفتاری متناسب با رفتار آن ها انتخاب شده و به استفاده از ژئوفوم به عنوان مصالح ناحیه ی نرم توجه شده است که با توجه به مزایای آن معمولاً در روش دفن در ترانشه ی ناقص استفاده می شود. [۴۰-۴۳] به منظور انجام تحلیل ها در مطالعه ی حاضر، از نرم افزار آباکوس نسخه ی ۶/۱۴ استفاده شده است که قابلیت هایی نظیر مدل سازی هندسه های پیچیده و در نظر گرفتن سطوح تماس با الگوریتم های مختلف دارد و همچنین توانایی شبیه سازی رفتار مصالح مختلف را با مدل های رفتاری متعدد دارد. از نرم افزار آباکوس تاکنون در تحلیل های مسائل ژئوتکنیکی در مطالعات مختلف به صورت موفقیت آمیز استفاده شده است. [۴۴، ۴۵] در مطالعات مختلف در ارتباط با رفتار لوله ی مدفون و پدیده ی قوس شدگی اطراف آن از مدل رفتاری کشسان - خمیری با معیار گسیختگی موهر - کولمب استفاده و قابلیت آن در شبیه سازی پدیده ی مذکور تأیید شده است. [۴۸-۴۶، ۴۰] همچنین مقایسه یی که بین دو مدل رفتاری متفاوت به منظور بررسی پدیده ی قوس شدگی در ماسه انجام شده است، حکایت از عملکرد

بهتر مدل رفتاری موهر - کولمب در پیش بینی تغییر شکل و الگوی تنش، نسبت به مدل رفتاری پیچیده تر دارد. [۴۹] بنابراین در مطالعه ی حاضر، به منظور شبیه سازی رفتار خاک از مدل رفتاری موهر - کولمب استفاده شده است که سطح تسلیم آن متشکل از دو معیار است که یکی مربوط به تسلیم برشی است و با عنوان سطح گسیختگی موهر - کولمب شناخته می شود و دیگری مربوط به معیار محدودیت کشش<sup>۱</sup> است که با استفاده از سطح تسلیم رانکین تعریف می شود. [۵۰، ۴۴]

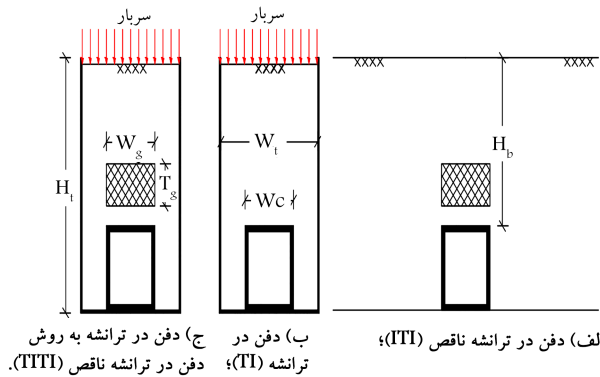
همچنین نتایج آزمایشگاهی در ارتباط با مصالح ژئوفوم نشان می دهد که پاسخ خمیری مصالح ژئوفوم تفاوت بسیاری با دیگر مصالح با تراکم بالا دارد که این موضوع به دلیل فشردگی پذیری بالای فوم است. [۵۱، ۴۰] به دلیل فشردگی پذیری خمیری مصالح ژئوفوم، مدل های رفتاری خمیری کلاسیک که براساس فرضیات فشردگی ناپذیری خمیری بسط داده شده اند، قابل کاربرد نیستند و باید مدلی انتخاب شود که اثر فشار هیدرواستاتیک را در رفتار مصالح مذکور منظور کند. [۵۲] با توجه به مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی مصالح ژئوفوم مشخص شده است که منحنی تنش - کرنش آن ها تحت فشار به صورت غیرخطی است و در کرنش های بزرگ، رفتار خمیری ماندگار محسوس تر و بسیار بزرگ از خود نشان می دهند. [۵۳-۵۵]

با توجه به بروز کرنش های بزرگ و تغییر شکل زیاد ژئوفوم در اثر اعمال سربارهای بزرگ ناشی از وزن خاکریز، در مطالعه ی حاضر از مدل رفتاری Crushable Foam در نرم افزار آباکوس استفاده شده است. این مدل به منظور شبیه سازی رفتار مصالح فوم تغییر شکل پذیر با کرنش بزرگ و تغییرات خمیری برگشت ناپذیر مناسب است و استفاده می شود. [۴۴-۵۶] مدل رفتاری Crushable Foam در سال ۲۰۰۰ میلادی معرفی و توسعه داده شد، [۵۷] که جزئیات آن در ادامه ارائه شده است. رفتار مربوط به بخش کشسان مدل رفتاری Crushable Foam با استفاده از رفتار کشسان خطی قابل تعریف است و برای بخش خمیری، سطح تسلیم مرتبط با دایره ی «میسز» در صفحه ی تنش انحرافی و سطح تسلیم بیضوی شکل در صفحه ی تنش  $p - q$  است. برای مدل Crushable Foam، دو رفتار سخت شوندگی قابل تعریف است: ۱. مدل سخت شوندگی حجمی که وضعیت تنش بر روی صفحه ی بیضی شکل در فضای  $p - q$  در آن، بارگذاری کششی هیدرواستاتیک را ثابت در نظر می گیرد و توسعه ی سطح تسلیم در آن مربوط به کرنش های فشاری خمیری حجمی است و ۲. مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک که سطح تسلیم بیضوی شکل مربوط به آن در مرکز فضای  $p - q$  قرار گرفته است. منحنی سخت شوندگی مدل رفتاری Crushable Foam، بیانگر تنش تسلیم فشاری تک محوری است که تابعی از کرنش خمیری مربوط به آن است. برای بارگذاری کششی هیدرواستاتیک، مدل سخت شوندگی حجمی، یک رفتار خمیری کامل را در نظر می گیرد، در حالی که مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک، رفتاری مشابه را در هر دو حالت بارگذاری هیدرواستاتیک فشاری و کرنشی منظور می کند. از آنجایی که رفتار مصالح ژئوفوم در کشش و فشار یکسان نیست، در مطالعه ی حاضر از مدل فوم با سخت شوندگی حجمی استفاده شده است که سطح تسلیم و سطح پتانسیل آن در شکل ۱ مشاهده می شود که مطابق آن،  $p$  و  $q$  به ترتیب بیانگر تنش فشاری متوسط و تنش انحرافی میسر و  $\alpha$  ضریب شکل سطح تسلیم بیضوی است که نسبت محورهای این سطح تسلیم را تعریف می کند. همچنین  $p$  مرکز سطح تسلیم بیضوی بر روی محور  $p$  و  $p_t$  و  $p_c$  ترتیب مقاومت مصالح تحت کشش و فشار هیدرواستاتیک را تعریف می کنند. همچنین  $\sigma_c$  تنش تسلیم اولیه در حالت بارگذاری تک محوری،  $p_c^*$  تنش تسلیم اولیه در فشار هیدرواستاتیک و  $p_t$  مقاومت مصالح در کشش هیدرواستاتیک هستند.

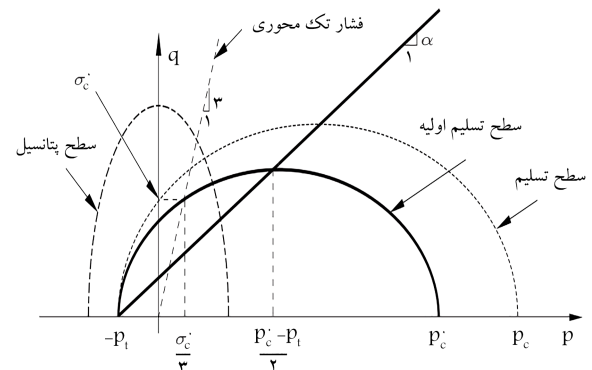
برای مدل رفتاری Crushable Foam، دو پارامتر  $k = \sigma_c^*/p_c^*$  و  $k_t = p_t/p_c^*$  نیز به منظور تعریف شکل سطح تسلیم تعریف می شوند. از آنجایی که هدف

جدول ۱. مشخصات مصالح خاکریز.

نوع خاک	وزن مخصوص ( $kN/m^3$ )	مدول کشسانی ( $MPa$ )	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	زاویه اتساع (درجه)	چسبندگی ( $kPa$ )
ماسه با تراکم متوسط	۱۷	۳۰	۰٫۳	۳۵	۰	۰



شکل ۲. روش های دفن مختلف و پارامترهای مرتبط.



شکل ۳. مدل Crushable Foam با سخت‌شوندگی حجمی در فضای  $p-q$ . [۴۸]

مناسب تعریف شده‌اند که در ادامه، مشخصات آن‌ها ارائه شده است. از آنجایی که روش TITI تاکنون بررسی نشده و اطلاعات آزمایشگاهی و نتایج اندازه‌گیری برای آن موجود نیست، امکان صحت‌سنجی برای آن وجود نداشته و در ابتدا با استفاده از روابط مربوط به دو روش اول، مقدار فشار وارد بر مجرا صحت‌سنجی شده و در ادامه و پس از مقایسه‌ی سه روش مذکور از نظر مقدار فشار وارد بر آن‌ها، فقط روش جدید معرفی شده مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. مشخصات خاک مورد استفاده در تحلیل‌ها براساس مشخصات معمول مربوط به خاک ماسه‌یی با تراکم متوسط انتخاب شده است (جدول ۱). [۵۸]

در مدل‌سازی‌های انجام شده، سطوح تماس مربوط به خاک - مجرا و خاک - ترانشه به گونه‌یی شبیه‌سازی شده است که با استفاده از آن می‌توان جابه‌جایی نسبی و جدایی خاک از سطح موردنظر را لحاظ کرد. مقدار ضریب اصطکاک برای سطح مشترک مجرا - خاک برابر  $\tan(0.67\varphi)$  و معادل  $0.43$  انتخاب و ضریب مذکور برای سطح تماس ماسه - ترانشه برابر  $0.6$  لحاظ شده است. این در حالی است که سطح تماس خاک - ژئوفوم کاملاً به هم چسبیده مدل شده و مشخصات اصطکاکی برای آن تعریف نشده است. در تمامی تحلیل‌های انجام گرفته، از المان‌های کرنش مسطح مثلثی شکل ۶ گره‌یی با انتگرال‌گیری مرتبه‌ی دوم<sup>۵</sup> به منظور شبکه‌بندی مصالح ژئوفوم و مصالح خاکی استفاده شده است.

### ۱.۳. روش دفن در ترانشه

به منظور صحت‌سنجی مدل مربوط به مجرای دفن شده در ترانشه و صحت‌سنجی مقدار فشار وارد بر سقف مجرا در روش دفن در ترانشه، از روابط مربوط به فشار در ترانشه استفاده شده است. مقدار تنش وارد بر سقف مجرای دفن شده در روش ذکر شده بر پایه‌ی تئوری «مارستون» بسط داده شده است. [۱۲] در رابطه‌ی ارائه شده توسط «مارستون»، به فشار سربار وارد بر سطح خاکریز درون ترانشه توجه نشده و از آنجایی که هدف در مطالعه‌ی حاضر، بررسی میزان تنش وارد بر مجرای مدفون در ترانشه در حضور فشار سطحی است، از رابطه‌ی توسعه داده‌شده توسط «لی و آبرتن» استفاده شده است، [۵۹] که برای ترانشه‌های با دیوار قائم به صورت رابطه‌ی ۱

از مطالعه‌ی حاضر، فقط بررسی مقدار و توزیع تنش بر وجوه جعبه‌ی مدفون است و تغییرشکل جعبه و دیواره‌ی ترانشه باعث تغییر در مقادیر تنش وارد می‌شود، جعبه‌ی مدفون و ترانشه در مطالعه‌ی حاضر به صورت صلب در نظر گرفته شده و برای آن‌ها مدل رفتاری تعریف نشده است.

### ۳. مدل‌سازی و صحت‌سنجی

تحلیل‌های عددی در مطالعه‌ی حاضر به روش اجزاء محدود و به صورت دوبعدی انجام شده‌اند. به این منظور، در ابتدا به ۳ روش دفن مجرای توجه شده است: روش اول، دفن مجرا در ترانشه‌ی ناقص (ITI)<sup>۲</sup>؛ روش دوم، دفن مجرا در ترانشه (TI)<sup>۳</sup> و روش سوم، دفن مجرا در ترانشه به روش دفن در ترانشه‌ی ناقص (TITI)<sup>۴</sup>. دو روش اول، روش‌های متداول برای دفن مجرای هستند و در آیین‌نامه‌های مختلف در ارتباط با آن‌ها بحث شده است؛ اما روش سوم که موضوع اصلی مطالعه‌ی حاضر است، در واقع ترکیبی از دو روش قبل است که در مطالعه‌ی حاضر پیشنهاد ارزیابی شده و عنوان ارائه شده برای آن انتخابی است. در شکل ۲، روش‌های دفن ذکر شده همراه با پارامترهای هندسی مرتبط مشاهده می‌شود که مطابق آن  $H_t$  و  $W_t$  به ترتیب ارتفاع و عرض ترانشه،  $W_g$  و  $T_g$  به ترتیب عرض و ضخامت ژئوفوم،  $W_c$  طول اضلاع مجرای جعبه‌یی  $H_b$  ارتفاع خاکریز هستند که در هر مورد از سقف مجرا تا سطح خاک اندازه‌گیری می‌شوند. همچنین سربار بر روی سطح خاک، آن‌چنان که در شکل مذکور نشان داده شده است، اعمال می‌شود. در دو روش دفن در ترانشه و دفن در ترانشه به روش ترانشه‌ی ناقص، ترانشه‌یی در زمین حفر و مجرا در کف آن قرار داده می‌شود. با توجه به اینکه در مطالعه‌ی حاضر فرض شده است که دیواره و کف ترانشه کاملاً صلب هستند، بنابراین زمین اطراف نمایش داده نشده و فقط ترانشه قابل مشاهده است و در شبیه‌سازی‌های عددی ترانشه به صورت صلب مدل شده و شرایط مرزی به گونه‌یی برای آن تعریف شده است که هیچ‌گونه جابه‌جایی و دورانی نداشته باشد. همچنین سطوح مشترک خاک - مجرا، خاک - ژئوفوم و خاک - ترانشه با استفاده از مدل‌های رفتاری و پارامترهای اصطکاکی

است:

$$\sigma_v = \frac{\gamma \beta}{\gamma K \tan \delta} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{\gamma h K \tan \delta}{B}\right) \right\} + q \exp\left(-\frac{\gamma h K \tan \delta}{B}\right) \quad (1)$$

که در آن،  $\gamma$  وزن مخصوص مصالح خاکریز،  $B$  عرض ترانشه و  $h$  عمق موردنظر به منظور محاسبه‌ی تنش قائم در داخل ترانشه است.  $K$  نسبت تنش افقی به تنش قائم،  $\delta$  بیانگر اصطکاک بین خاک و دیواره‌ی ترانشه و  $q$  مقدار فشار سطحی هستند. مقدار ضریب  $K$  بین مقدار ضریب فشار محرک و در حال سکون متغیر است، اما پژوهشگران با انجام تحلیل‌های عددی به این نتیجه رسیدند که به منظور استفاده از رابطه‌ی اخیر، برای محاسبه‌ی تنش وارد بر سقف مجرای مدفون، مقدار  $K$  برابر ضریب فشار خاک در حالت محرک (رابطه‌ی ۲) و مقدار  $\delta$  برابر  $\frac{\pi}{4}$  ضریب اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته شود.<sup>[۵۹]</sup>

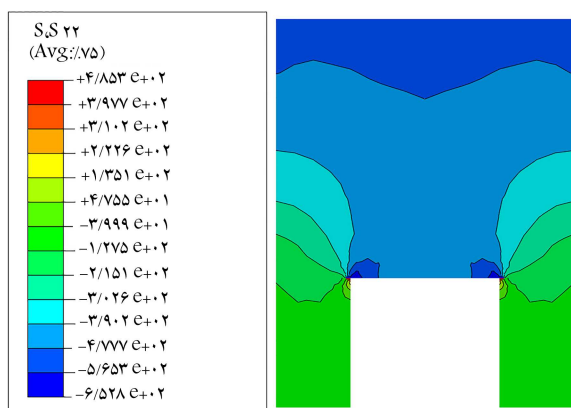
$$K = K_a = \tan^2\left(45^\circ - \varphi/2\right) \quad (2)$$

توجه شود که رابطه‌ی ۲ فقط مقدار فشار وارد بر سقف مجرای مدفون را ارائه می‌کند و مقادیر فشار وارد بر دیوار و کف مجرا توسط آن قابل تعیین نیست و همچنین با مرور ادبیات فنی نیز مشاهده می‌شود که رابطه‌ی به این منظور وجود ندارد. بنابراین، فقط امکان صحت‌سنجی مقدار تنش سقف مجرا در بخش حاضر وجود داشته و به آن توجه شده است.

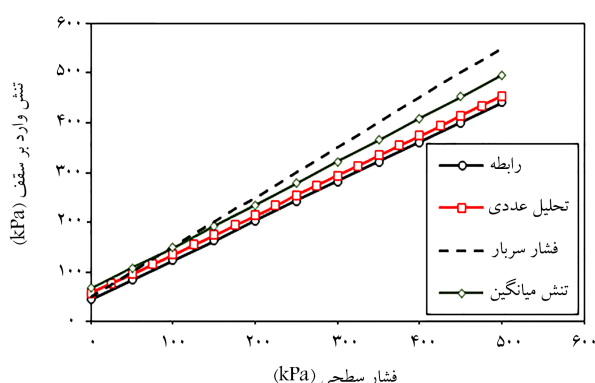
در مدل عددی ایجاد شده در روش ذکر شده، مقدار عرض ترانشه ۳ متر، طول اضلاع مجرای جعبه‌یی مدفون ۱/۵ متر و ارتفاع ترانشه ۴/۵ متر در نظر گرفته شده است. شکل ۳، چگونگی توزیع تنش قائم در خاکریز و اطراف مجرای مدفون را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشهود است، مقدار تنش وارد بر سقف ترانشه، ثابت نیست و کمترین مقدار مربوط به نقطه‌ی میانی است و به طرف دیوار مجرا افزایش یافته است. بنابراین به منظور مقایسه با مقدار تنش محاسبه شده در نقطه‌ی میانی سقف، مقدار تنش میانگین نیز همراه با افزایش فشار سطحی محاسبه و در شکل ۴ مشاهده می‌شود که مطابق آن مقدار تنش به دست آمده از رابطه‌ی «مارستون» با مقدار تنش حاصل از تحلیل عددی در نقطه‌ی میانی سقف مجرا، اختلاف کمی دارد و تحلیل عددی انجام شده به خوبی مقدار تنش اعمالی را پیش‌بینی کرده است. با این حال، مقدار تنش میانگین از مقدار تنش در نقطه‌ی میانی اندکی بزرگ‌تر است، به صورتی که در فشار سطحی ۵۰۰ کیلوپاسکال مقدار تنش میانگین به ۴۹۵/۷ رسیده است. همچنین به منظور مقایسه، نمودار مربوط به وزن سر بار که تأثیر قوس‌شدگی در آن منظور نمی‌شود، در نمودار ارائه شده است که نشان می‌دهد مقدار تنش محاسبه شده با روش تحلیلی و با استفاده از رابطه‌ی مورد استفاده، کمتر از مقدار وزن سر بار است که بیانگر تأثیر قوس‌شدگی در کاهش تنش وارد بر سقف مجراست. در نمودارهای ارائه شده، تنش در فشار سطحی صفر کیلوپاسکال ناشی از وزن مصالح داخل ترانشه است. همچنین، شکل ۵ که مربوط به الگوی نشست خاکریز داخل ترانشه در پایان بارگذاری سطحی است، وقوع پدیده‌ی قوس‌شدگی را در بالای مجرای جعبه‌یی و همچنین در فاصله‌ی بین دیواره‌ی مجرا و ترانشه به خوبی نشان می‌دهد.

## ۲.۳. روش دفن در ترانشه‌ی ناقص

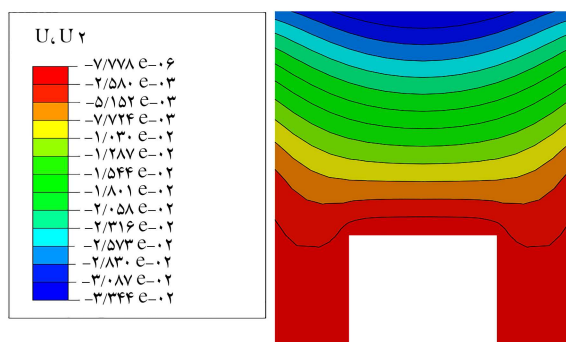
با توجه به اینکه در روش ترانشه‌ی ناقص، ژئوفوم به عنوان مصالح ناحیه‌ی نرم در بالای مجرا قرار داده می‌شود، در ابتدا لازم است رفتار تنش - کرنش ژئوفوم



شکل ۳. توزیع تنش قائم در داخل ترانشه در روش دفن در ترانشه  $S, S_{22}$  تنش قائم و واحد کیلوپاسکال است).



شکل ۴. تغییرات تنش وارد بر سقف مجرای مدفون در ترانشه با افزایش فشار سطحی.



شکل ۵. نشست خاکریز درون ترانشه ( $U, U_2$  تغییر شکل قائم و واحد متر است).

با بهره‌گیری از مدل رفتاری معرفی شده برای آن و مقایسه با نتایج یک آزمایش انجام گرفته روی مصالح ذکر شده صحت‌سنجی شود. به این منظور، نتایج آزمون بارگذاری قائم انجام شده بر روی نمونه‌ی مکعبی ژئوفوم به ابعاد ۵ سانتی‌متر و وزن مخصوص ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب از مطالعات سال ۲۰۱۴، گرفته شده است.<sup>[۶۰]</sup> براساس استاندارد مربوط به تعیین مشخصات مقاومتی مصالح ژئوفوم، آزمون بارگذاری قائم بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتی‌متر و با نرخ بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه تعیین شده است.<sup>[۵۱]</sup> به منظور صحت‌سنجی، یک نمونه‌ی مکعبی با ابعاد ذکر شده و با استفاده از المان‌های مکعبی، مدل و به منظور شبیه‌سازی بار اعمالی، تمامی گره‌های وجه بالایی با سرعت ۵ میلی‌متر

جدول ۲. پارامترهای مصالح ژئوفوم مورد استفاده در مدل رفتاری Crushable Foam.

پارامتر	وزن مخصوص ( $kg/m^3$ )	مدول کشسانی ( $MPa$ )	ضریب پواسون	نسبت تنش تسلیم فشاری	نسبت تنش تسلیم هیدرواستاتیک
مقدار	۲۰	۵/۹۹	۰	۱/۱	۰/۱

آزمایش، دو منحنی کاملاً با یکدیگر تطابق داشتند، که نشان دهنده‌ی انتخاب صحیح پارامترها و مناسب بودن مدل رفتاری انتخاب شده به منظور شبیه‌سازی رفتار ژئوفوم است. پس از کالیبراسیون رفتار ژئوفوم، مقدار تنش وارد بر سقف مجرای مدفون صحت‌سنجی شده است.

روش دفن در ترانشه‌ی ناقص ابتدا توسط «مارستون<sup>۶</sup>» پیشنهاد شد، [۶۲، ۱۲] و سپس توسط «اسپنگلر<sup>۷</sup> و هندی» توسعه یافت. [۶۳] روش طراحی و تعیین فشار وارد بر سقف مجرای مدفون در روش مذکور با عنوان تئوری «مارستون - اسپنگلر» (M-S) شناخته می‌شود و در مراجع مختلف، به منظور تعیین فشار و طراحی معرفی شده است (رابطه‌ی ۴): [۳۵]

$$W_i = C_i \gamma B_c^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

که در آن،  $W_i$  تعیین‌کننده‌ی مقدار نیروی وارد بر واحد طول مجرا و  $B_c$  بیانگر عرض مجرا هستند.  $C_i$  ضریبی است که با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شود:

$$C_i = \frac{\exp\left(\frac{-2K\mu H}{B_c}\right) - 1}{-2K\mu} \quad H \leq H_e \quad (5)$$

$$C_i = \frac{\exp\left(\frac{-2K\mu H_e}{B_c}\right) - 1}{-2K\mu} + \left(\frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c}\right) \exp\left(-2K\mu \frac{H_e}{B_c}\right) \quad H > H_e \quad (6)$$

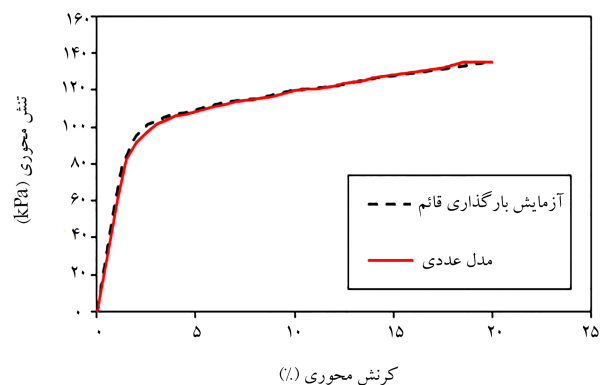
که در آن‌ها،  $\mu = \tan \delta$  ضریب اصطکاک و  $H_e$  ارتفاع خاک بالای مجرا تا صفحه‌ی نشست‌های مساوی در خاکریز است. صفحه‌ی نشست مساوی به عنوان صفحه‌ی در خاکریز معرفی می‌شود که در آن موقعیت نشست خاک بالای مصالح ناحیه‌ی نرم با نشست ستون‌های خاک مجاور برابر است. تعیین پارامتر مذکور با استفاده از روش ارائه شده‌ی کانگ<sup>۸</sup> [۶۴]، (۲۰۰۷) به صورت گرافیکی مقدور است که انتخاب صحیح آن نیاز به فرضیاتی دارد که ممکن است در نتیجه‌ی نهایی تأثیرگذار باشد. از آنجایی که محاسبه‌ی پارامتر  $H_e$  دشوار است و همچنین در رابطه‌ی ۴، به مقدار فشار سطحی توجه نشده است، لذا به منظور صحت‌سنجی و مقایسه‌ی مقدار فشار وارد بر سقف مجرای مدفون از رابطه‌ی پیشنهادی «ولاستاد<sup>۹</sup>» استفاده شده است (رابطه‌ی ۷): [۴۳]

$$\sigma_v = N_A \gamma H \quad (7)$$

که در آن،  $N_A$  ضریب قوس است و به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود:

$$N_A = \frac{1 - \exp\left(\frac{-2S_V H}{B_c}\right)}{\frac{2S_V H}{B_c}} \quad (8)$$

که در آن،  $S_V$  عدد اصطکاک است و برابر  $K_a \tan \delta$  در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه فشار سطحی در رابطه‌ی اخیر لحاظ نشده است، لذا ارتفاع خاک معادل فشار سطحی، با در نظر گرفتن فشار  $50^\circ$  کیلوپاسکال و وزن مخصوص خاک برابر ۱۷ کیلونیوتن بر مترمکعب، که برابر ۲۹/۴ متر به دست آمده است، در تعیین فشار وارد بر سقف و به جای پارامتر  $H$  در رابطه‌ی ۸ استفاده می‌شود. شایان ذکر است



شکل ۶. منحنی تنش - کرنش حاصل از آزمایش و مدل‌سازی عددی.

بر واحد زمان، در حالی که وجه پایینی در جهت قائم مقید شده بود، به سمت پایین حرکت داده شده است. از آنجایی که در مرجع اخیر، [۶۵] فقط نمودار تنش - کرنش مصالح ذکر شده ارائه شده و دیگر پارامترهای مورد نیاز مشخص نیست، بنابراین لازم است که پارامترهای مورد نیاز با استفاده از روابط و مقادیر معمول برای مصالح ذکر شده انتخاب شوند. به این منظور، مقدار مدول کشسانی با استفاده از رابطه‌ی ۳، که ارتباط بین مدول کشسانی اولیه‌ی ژئوفوم بر حسب مگاپاسکال ( $E_i$ ) و چگالی آن‌ها بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب ( $\rho$ ) را بیان می‌کند، محاسبه شده است.

$$E_t = 0.4145\rho - 2.3039 \quad (3)$$

همچنین آزمایش بر روی مصالح ژئوفوم نشان داد که مصالح ژئوفوم، ضریب پواسون کوچک و نزدیک به صفر دارند؛ لذا ضریب پواسون برابر صفر اختیار شده است. [۶۵] با توجه به اینکه مقاومت کششی ژئوفوم در قیاس با مقاومت فشاری آن در حالت هیدرواستاتیک کوچک است و در مطالعه‌ی حاضر مصالح ژئوفوم تحت تنش هیدرواستاتیک کششی قرار نگرفته‌اند، بنابراین مقدار پارامتر اخیر تأثیر چندانی در نتایج نخواهد داشت و توصیه شده است که پارامتر نسبت تنش تسلیم هیدرواستاتیک در مدل رفتاری مورد استفاده حدود  $0.5^\circ$  تا  $0.1^\circ$  در نظر گرفته شود. [۴۴] همچنین، در غیاب نتایج آزمایشگاهی کامل بر روی مصالح انتخاب شده در مطالعه‌ی حاضر، مقدار نسبت تنش تسلیم فشاری ۱/۱ انتخاب شده است، که مقایسه‌ی نتایج مدل عددی، [۶۵] و آزمایشگاهی، حکایت از مناسب بودن مقدار ذکر شده دارد. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل رفتاری Crushable Foam در جدول ۲ ارائه شده است.

علاوه بر پارامترهای ذکر شده، لازم است رفتار سخت‌شوندگی مصالح مورد استفاده نیز معرفی شود. به این منظور و براساس روش ارائه شده برای کالیبراسیون رفتار ژئوفوم، داده‌های سخت‌شوندگی از منحنی تنش - کرنش و با در نظر گرفتن تنش تسلیم ۷۹/۹۶ کیلوپاسکال معادل تنش تسلیم خمیری صفر اختیار و برای مدل رفتاری معرفی شده است. نتیجه‌ی مقایسه‌ی منحنی تنش - کرنش حاصل از آزمایش تجربی و مدل ساخته شده، در شکل ۶ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، به دلیل انتخاب منحنی سخت‌شوندگی از روی منحنی تنش - کرنش حاصل از

که دلیل استفاده از رابطه ۸، عدم نیاز به محاسبه‌ی موقعیت صفحه‌ی نشست‌های مساوی در خاک است.

در مدل ایجاد شده در روش ذکر شده، ابعاد مجرا همانند روش دفن در ترانشه هستند، در حالی که ضخامت لایه‌ی ژئوفوم ۵/۵ متر و عرض آن برابر ۱/۵ متر معادل عرض مجرا انتخاب شده‌اند. فاصله‌ی ژئوفوم تا سقف مجرا نیز برابر ۳/۳ متر در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب چگونگی توزیع تنش قائم و تغییرشکل قائم را به روش دفن در ترانشه‌ی ناقص نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در اثر نشست ژئوفوم در بالای مجرای جعبه‌یی و ایجاد قوس در آن ناحیه، مقدار تنش وارد بر سقف مجرا کاهش یافته و الگوی توزیع تنش اطراف مجرا تغییر کرده است. نتیجه‌ی صحت‌سنجی حکایت از تطابق خوب بین نتایج عددی و مقدار تنش حاصل از رابطه‌ی ۷ دارد و در تمامی محدوده، فشار وارده‌ی دو منحنی کاملاً بر هم منطبق هستند (شکل ۹). نکته‌ی قابل توجه این است که مقادیر مربوط به دو منحنی مذکور مربوط به نقطه‌ی میانی سقف مجراست، در حالی که توزیع تنش در سقف همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است، ثابت و یکنواخت نیست و بنابراین به مقدار تنش میانگین نیز به منظور مقایسه توجه شده است. مشاهده می‌شود که تنش میانگین وارده بزرگ‌تر از مقدار آن در نقطه‌ی میانی سقف است و با افزایش فشار سطحی، اختلاف تنش ذکرشده بیشتر نیز می‌شود؛ به صورتی که مقدار تنش روی سقف در پایان بارگذاری سطحی برای نقطه‌ی مرکزی به ۱۰۵ و برای تنش میانگین

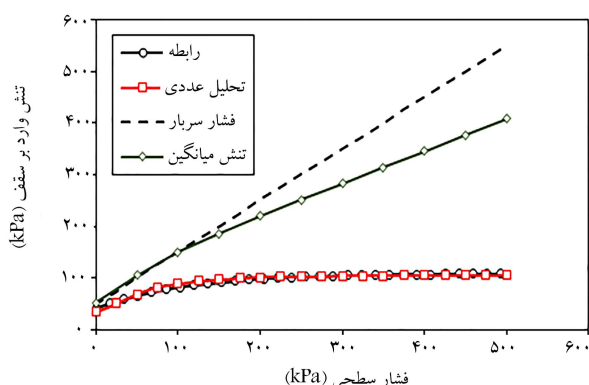
به ۴۰۸ کیلوپاسکال رسیده است که نشان‌دهنده‌ی اختلاف زیاد در مقدار تنش پیش‌بینی شده است. در واقع ملاک قرار دادن نقطه‌ی میانی و استفاده از روابط تحلیلی و تجربی به دلیل یکنواخت نبودن توزیع تنش بر سقف مجرا نمی‌تواند معیار مناسبی جهت تعیین تنش وارد بر مجرا باشد و ضریب قوس باید با توجه به تمامی طول سقف مجرا قضاوت شود. با این حال، مقایسه‌ی نتایج با مقدار تنش وارد بر سقف بدون در نظر گرفتن اثر قوس‌شدگی، نشان‌دهنده‌ی کاهش تنش وارد بر سقف، در روش دفن شده‌ی ذکر شده و مقدار تنش نهایی ۲۶٪ در قیاس با تنش میانگین کاهش یافته است که مزیت آن در کاهش فشار وارد بر مجاری مدفون است. (شکل ۹)

## ۴. روش دفن در ترانشه به روش ترانشه‌ی ناقص و

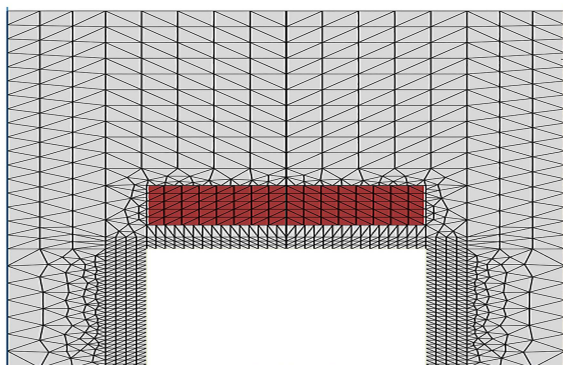
### مقایسه‌ی سه روش

پس از صحت‌سنجی مقدار تنش وارد بر سقف مجرای مدفون در دو روش اخیر، به مطالعه‌ی روشی پرداخته شده است که ترکیبی از دو روش پیشین است. در روش دفن در ترانشه به روش ترانشه‌ی ناقص، علاوه بر اینکه مجرا داخل ترانشه قرار گرفته است، در بالای آن یک لایه‌ی ژئوفوم نیز قرار داده می‌شود. به این ترتیب می‌توان از پدیده‌ی قوس‌شدگی ایجاد شده در بالای سقف مجرا و همچنین فاصله بین دیواره‌ی ترانشه و مجرا به منظور کنترل و کاهش تنش وارد بر مجرا بهره برد.

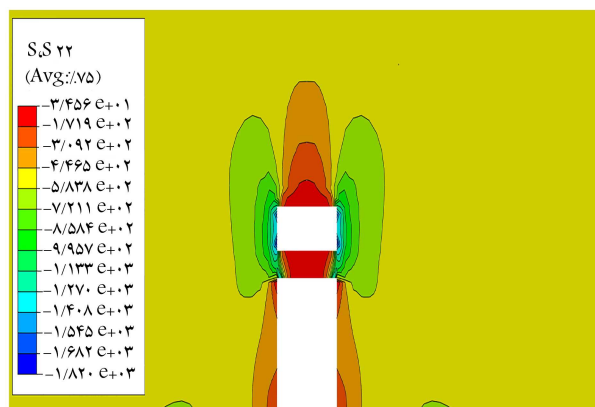
چگونگی شبکه‌بندی اجزاء محدود مدل ایجاد شده در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. ابعاد مجرا، مراحل خاک‌ریزی و اعمال فشار سطحی، ابعاد ژئوفوم و موقعیت



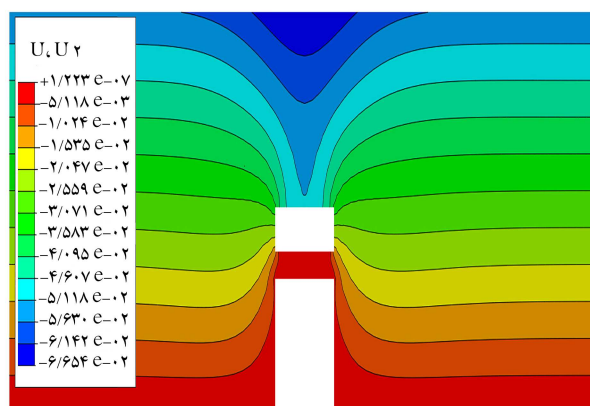
شکل ۸. تغییرات تنش وارد بر سقف مجرا در روش دفن در ترانشه‌ی ناقص با افزایش فشار سطحی.



شکل ۹. شبکه‌بندی و اجزاء مدل ایجاد شده در روش TITI.



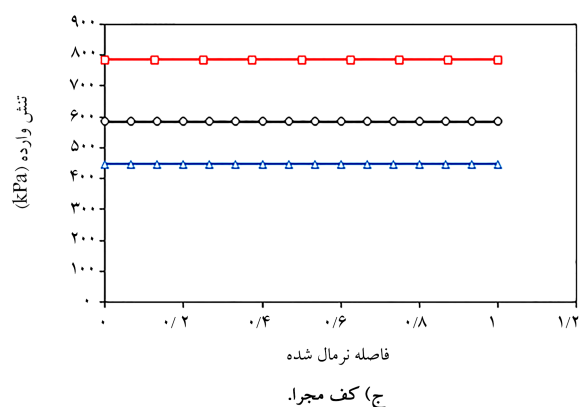
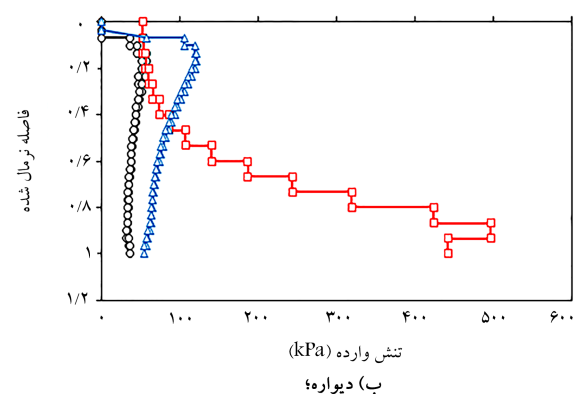
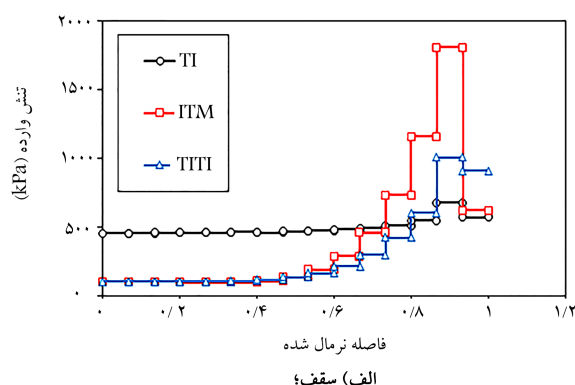
شکل ۱۰. توزیع تنش قائم در داخل ترانشه به روش دفن در ترانشه‌ی ناقص (S, SS۲) تنش قائم و واحد کیلوپاسکال است).



شکل ۱۱. نشست خاکریز داخل ترانشه به روش دفن در ترانشه‌ی ناقص (U۲) تغییرشکل قائم و واحد متر است).

برای سقف و کف از نقطه‌ی میانی مجرا و برای دیواره از نقطه‌ی بالای مجرا مدنظر قرار گرفته است. مقایسه‌ی مقدار تنش وارد بر سقف در دو روش ITI و TITI نشان می‌دهد که مقدار تنش تا فاصله‌ی ۶۰ درصدی از میانه‌ی سقف، در هر دو روش تقریباً یکسان است و پس از آن به سمت دیوار مجرا اختلاف زیاد شده و در روش ITI و در نزدیکی دیواره به مقدار بیشینه‌ی ۱۸۰۰ کیلوپاسکال یعنی بیش از ۳ برابر فشار سطحی رسیده است، در حالی که روند افزایش تنش در روش TITI کندتر است و مقدار بیشینه‌ی آن حدود ۱۰۰۰ کیلوپاسکال است (شکل ۱۳ الف).

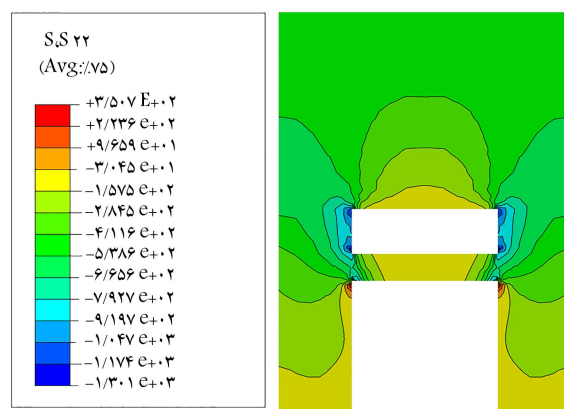
این موضوع به این دلیل است که وجود ترانشه در روش TITI باعث وقوع پدیده‌ی قوس در ستون‌های خاک مجاور مجرا شده و مقدار تنش قائم را کاهش داده است، که مقایسه‌ی مقدار تنش افقی وارد بر دیواره‌ی مجرا نیز مؤید آن است (شکل ۱۳ ب). در روش TI، مقدار فشار وارده بر سقف و جداره نسبت به دو روش



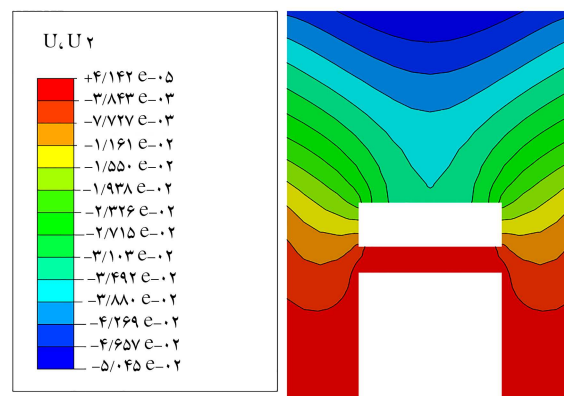
شکل ۱۳. مقایسه‌ی مقادیر تنش وارد بر مجرا در هر ۳ روش دفن مجرا.

قرارگیری آن‌ها دقیقاً با مدل دفن در ترانشه‌ی ناقص یکسان است و مشخصات ترانشه و سطح مشترک آن با مصالح خاکریز همانند مدل دفن در ترانشه است. چگونگی توزیع تنش قائم و تغییرشکل قائم پس از اعمال بارگذاری سطحی، به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود علاوه بر قوس ایجاد شده در بالای سقف مجرا به دلیل نشست لایه‌ی ژئوفوم که منجر به کاهش تنش در روی سقف شده است، قوس دیگری در فاصله‌ی دیواره‌ی ترانشه و دیواره‌ی مجرا تشکیل شده است که باعث کنترل مقدار تنش در ناحیه‌ی مذکور شده است. در واقع انتقال تنش از ستون خاک بالای مجرا به ستون‌های کناری، با تشکیل قوس مذکور کنترل و باعث کاهش تنش وارد بر دیوار مجرا شده است. همچنین، مقدار تغییرشکل در فضای بین مجرا و دیوار ترانشه به سمت کف مجرا دچار کاهش شده است که این موضوع منجر به کاهش تنش برشی و نیروی حاصل از آن به طرف پایین بر روی دیوار مجرا و در نتیجه کاهش تنش کل رو به پایین در روش ذکر شده می‌شود. در ادامه، به مقایسه‌ی مقدار تنش وارد بر هر ۳ وجه مجرای مدفون به ۳ روش مذکور پرداخته و مقدار و الگوی توزیع تنش مطالعه شده است. الگوی توزیع تنش بر وجه مختلف با تعریف پارامتری با عنوان «فاصله‌ی نرمال شده» ارائه شده است که بیان‌گر نسبت فاصله‌ی هر نقطه از وجه مجرا به اندازه‌ی کل آن وجه است که برای سقف و کف مجرا، به علت تقارن فقط به نیمی از آن توجه شده است. فاصله‌ی نرمال شده

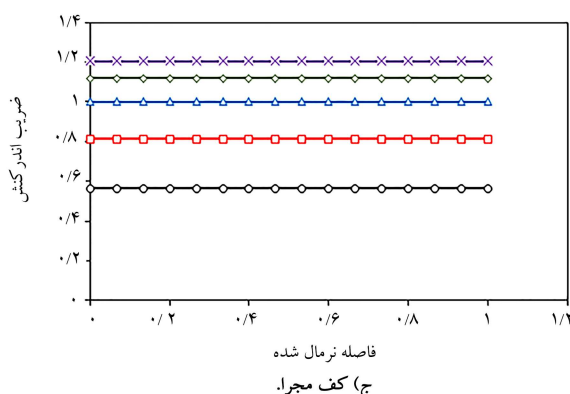
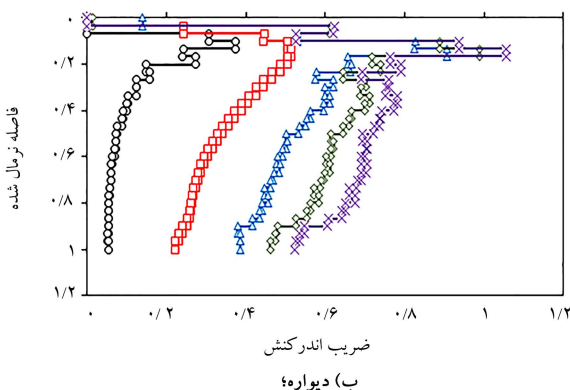
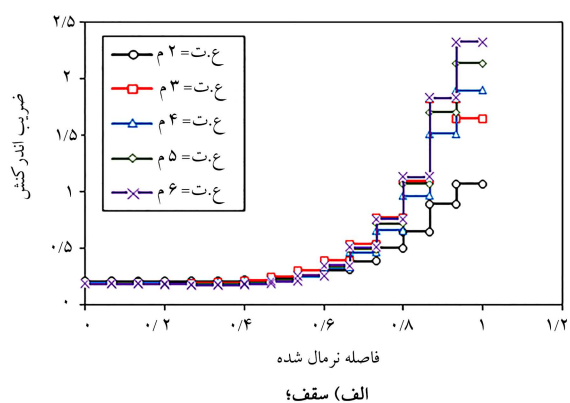


شکل ۱۱. توزیع تنش قائم در داخل ترانشه در روش TITI (S, SS2) تنش قائم و واحد کیلوپاسکال است).



شکل ۱۲. نشست خاکریز داخل ترانشه در روش TITI (U2) تغییرشکل قائم و واحد متر است).





شکل ۱۴. تأثیر عرض ترانشه در ضریب اندرکنش (ع.ت: عرض ترانشه).

کاهش تأثیر قوس، باعث افزایش مقدار فشار وارد بر هر ۳ وجه: سقف، دیوار و کف مجرای مدفون خواهد شد.

## ۲.۵. بررسی اثر ارتفاع ترانشه

نتایج تحلیل‌ها نشان داد که افزایش ارتفاع ترانشه باعث کاهش مقدار ضریب اندرکنش بر روی هر ۳ وجه مجرای مدفون می‌شود. در مورد سقف مجرا مشاهده می‌شود که مقدار ضریب اندرکنش تقریباً در فاصله‌ی ۶۰ درصدی از محور مجرا به سمت لبه، تأثیر اندکی از ارتفاع ترانشه گرفته و در حدود ۰/۲ ثابت بوده است، اما در نزدیکی لبه‌ی مجرا، اختلاف اشاره شده زیاد شده و برای مجرای واقع در ترانشه به ارتفاع ۶ متر به مقدار ۱/۴ رسیده است (شکل ۱۵ الف). در واقع با افزایش ارتفاع ترانشه، به علت افزایش اصطکاک بین دیواره و خاکریز، تنش بیشتری مستهلک شده و فشار اعمالی به سقف مجرا کاهش یافته است. در شکل ۱۵ ب، مشاهده می‌شود که مقدار

دیگر تا حدود ۷۰٪ طول سقف مجرا بزرگ‌تر و پس از آن به سمت دیواره کمتر و تغییرات آن نیز منظم‌تر بوده است. فقط یک افزایش تنش در نزدیکی دیواره مشاهده می‌شود که می‌تواند به تمرکز تنش ناشی از قوس بین مجرا و دیوار ترانشه نسبت داده شود. شکل ۱۳ ج، مقادیر تنش وارد بر کف در روش ITI را بیش از دو روش دیگر و مقدار آن را برای روش TITI کمتر از مقدار تنش سطحی نشان می‌دهد. در واقع، در روش دفن در ترانشه به روش ترانشه‌ی ناقص، مقدار متوسط تنش وارد بر سقف و کف مجرا نسبت به دو روش دیگر کمتر است، که نشان‌دهنده‌ی مزیت روش مذکور در کنترل تنش‌های وارد بر مجراست، اگرچه مقدار تنش افقی وارد بر دیواره‌ی مجرا نسبت به روش دفن در ترانشه، به ویژه در بخش بالایی دیواره، اندکی بزرگ‌تر است.

## ۵. مطالعات پارامتریک

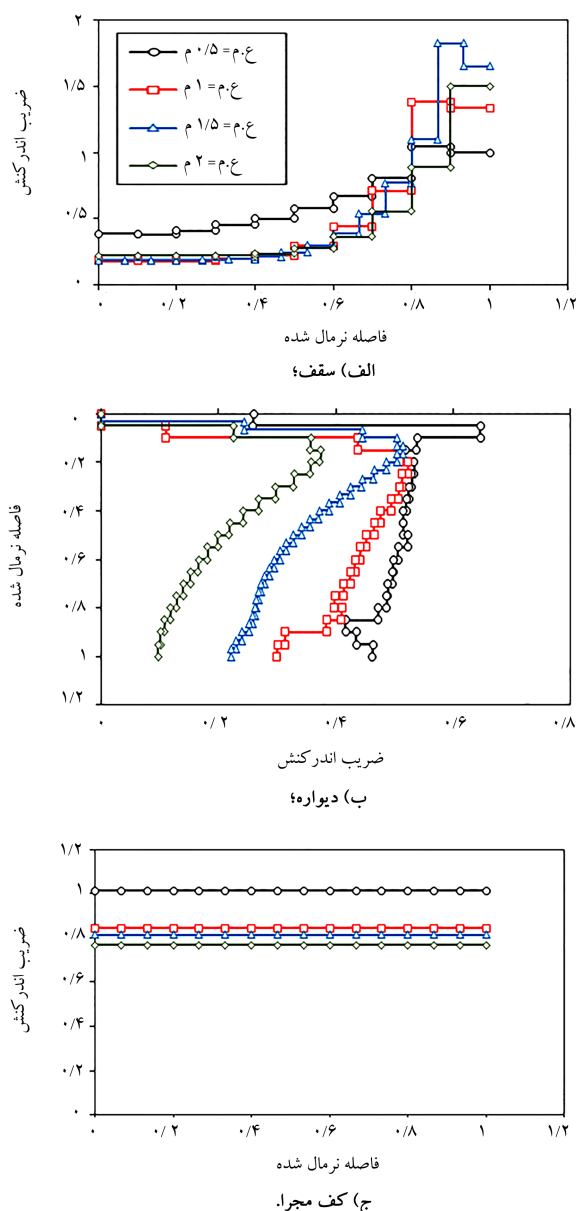
پس از بررسی و مقایسه‌ی مقادیر تنش وارد بر وجوه مجرای جمعیتی مدفون در ۳ روش متفاوت ذکر شده، در بخش حاضر فقط به مطالعه‌ی تأثیر پارامترهای مختلف هندسی و بار سطحی در میزان تنش وارد بر مجرای مدفون به روش TITI پرداخته شده است. مدل مینا، مشخصات عنوان شده‌ی در بخش صحت‌سنجی دارد و در هر بخش با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، به تأثیر پارامتر موردنظر توجه شده است. با توجه به اینکه به منظور تعیین مقدار فشار وارد بر مجرای مدفون از مفهوم ضریب اندرکنش در آئین‌نامه‌ها و مطالعات پیشین استفاده شده است، [۳۵، ۳۶، ۳۷] و همچنین به منظور پی‌بعد کردن پارامترها، در مطالعه‌ی حاضر نتایج در قالب ضرایب اندرکنش ارائه شده‌اند که همان نسبت تنش نرمال اعمالی محاسبه شده در تحلیل‌ها به تنش تئوری وارد بر همان وجه است. منظور از تنش تئوری برای سقف و کف مجرا، تنش قائم ناشی از وزن خاکریز و فشار سطحی بدون در نظر گرفتن اثر قوس است. تنش افقی تئوری وارد بر دیواره با توجه به عمق هر نقطه از دیواره و براساس تنش در حال سکون منظور شده است.

## ۱.۵. بررسی اثر عرض ترانشه

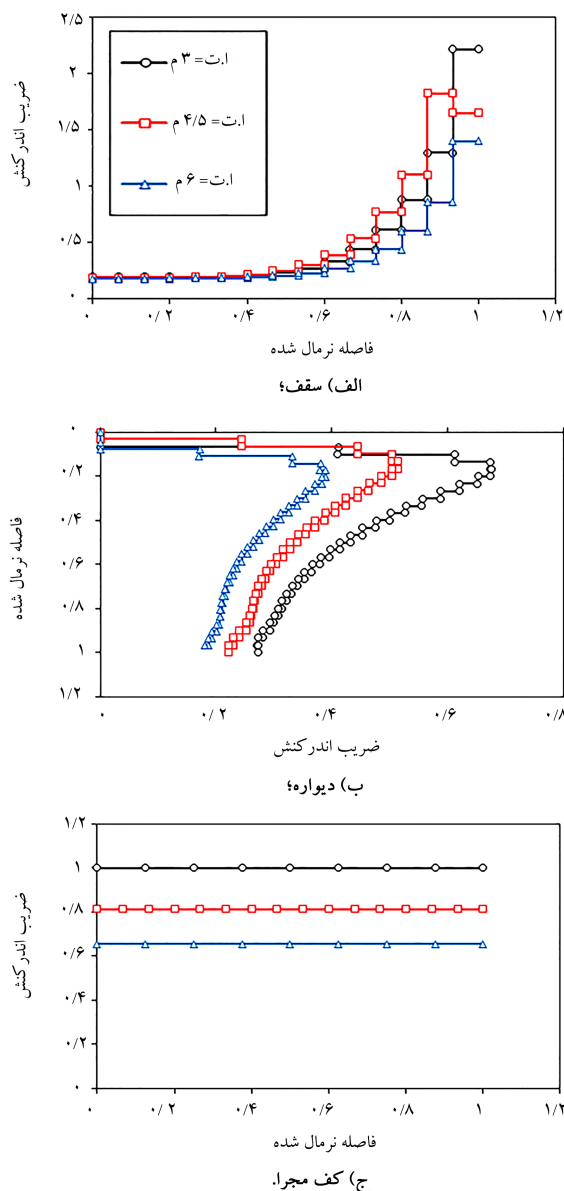
در بخش حاضر، عرض ترانشه برابر ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ متر انتخاب و تأثیر پارامتر عرض ترانشه ارزیابی شده است. در تمامی مدل‌ها، عرض جعبه‌ی مدفون برابر ۱/۵ متر بوده است. شکل ۱۴ الف نشان می‌دهد که با افزایش عرض ترانشه، مقدار فشار وارد بر سقف مجرای مدفون در محدوده‌ی ۶۰٪ میانی برای تمامی ترانشه‌های با عرض متفاوت، تقریباً ثابت و یکسان است و پس از آن دچار افزایش می‌شود. به صورتی که مقدار ضریب اندرکنش برای مجرای واقع در ترانشه با عرض ۶ متر، در لبه‌ی مجرا برابر ۲/۳ و در همان موقعیت در شرایط ترانشه با عرض ۲ متر برابر ۱/۰۶ است. همچنین مقدار فشار وارد بر دیوار و کف مجرا نیز با افزایش عرض ترانشه بیشتر شده است؛ در حالی که برای دیوار مجرا، ضریب اندرکنش به سمت پایین روند کاهشی دارد. با بزرگ‌تر شدن عرض ترانشه، نرخ افزایش ضریب اندرکنش بر دیوار و کف مجرا نرخ کاهشی دارد (شکل ۱۴ ب و ج).

برای کف مجرا، مقدار ضریب اندرکنش برای ترانشه با عرض ۴ متر، تقریباً مساوی ۱ و برای عرض‌های کوچک‌تر و بزرگ‌تر به ترتیب کمتر و بیشتر از مقدار ۱ است و ضریب اندرکنش برای مجرای با عرض ۲ و ۶ متر به ترتیب برابر ۰/۵۶ و ۱/۲ حاصل شده است. بنابراین می‌توان گفت که افزایش عرض ترانشه به دلیل





شکل ۱۶. تأثیر عرض مجرا در ضریب اندرکنش (م.ع: عرض مجرا).



شکل ۱۵. تأثیر ارتفاع ترانشه در ضریب اندرکنش (ات: ارتفاع ترانشه).

۵/۰، ۱/۰، ۱/۵ و ۲ متر مطالعه شده است. در تمامی مدل‌ها، ارتفاع خاکریز داخل ترانشه، ثابت و برابر ۴/۵ متر بوده و عرض مصالح ژئوفوم مساوی عرض مجرا در نظر گرفته شده است.

به طور کلی مشاهده می‌شود که با کاهش عرض مجرا یا به بیان دیگر، با کاهش نسبت عرض مجرا به عرض ترانشه، ضریب اندرکنش برای هر وجه مجرای مدفون افزایش یافته است. برای سقف مجرا، در حالتی که مقدار عرض آن کمینه است، مقدار ضریب اندرکنش برای کل سقف نسبت به سه حالت دیگر بزرگ‌تر بوده و بیانگر این مطلب است که چنانچه نسبت عرض مجرا به عرض ترانشه کم باشد، قوس به خوبی توسعه نمی‌یابد و نمی‌تواند باعث کنترل فشار وارد بر سقف مجرای مدفون به روش TITI شود (شکل ۱۶ الف).

اگرچه در نزدیکی دیوار مجرا، مقدار ضریب اندرکنش نسبت به سه حالت دیگر کمتر است، اما چنانچه مقدار میانگین در نظر گرفته شود، ضریب اندرکنش بیش از

ضریب اندرکنش به سمت پایین مجرا در دیوار جانبی، با افزایش ارتفاع ترانشه کاهش یافته است که این مورد را می‌توان به کاهش تنش در هر عمق با افزایش ارتفاع ترانشه نسبت داد. مقدار ضریب اندرکنش بیشینه‌ی دیوار در حالت ترانشه با ارتفاع ۶ متر، کمتر از ۰/۷ است و نشان دهنده‌ی مقدار فشار اعمالی کمتر از مقدار فشار در حال سکون است. در ارتباط با فشار وارد بر کف مجرا نیز در حالت ترانشه با ارتفاع ۳ متر، بیشترین ضریب اندرکنش ملاحظه می‌شود که تقریباً برابر ۱ است (شکل ۱۵ ج). این در حالی است که ضریب اندرکنش برای ترانشه با ارتفاع بیشینه‌ی مورد بررسی در بخش حاضر به ۰/۶۵ رسیده است. بنابراین می‌توان به ارتفاع ترانشه به عنوان یک پارامتر مؤثر در کنترل مقدار فشار وارد بر وجوه مجرا توجه کرد.

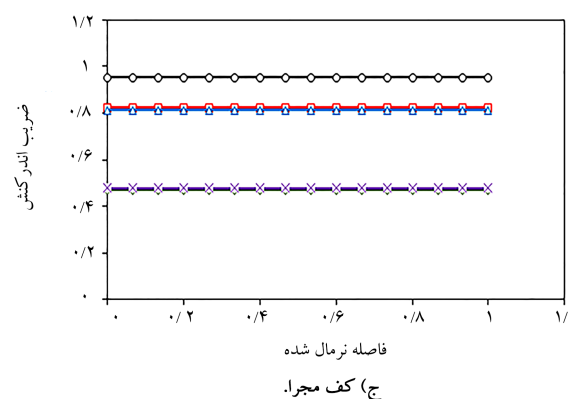
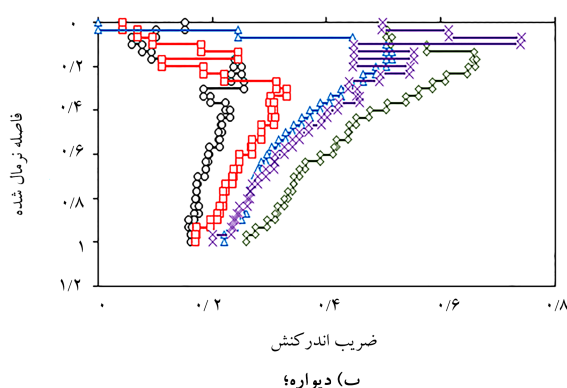
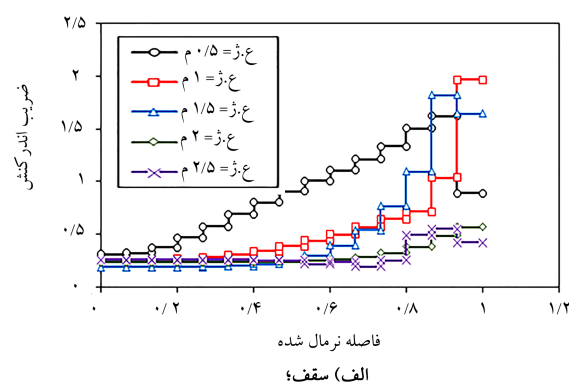
### ۳.۵. بررسی اثر عرض مجرا

در بخش حاضر، تأثیر عرض مجرای مدفون با بررسی فشار وارد بر مجرای با عرض

بقیه‌ی حالت‌ها خواهد بود. در ارتباط با فشار وارد بر دیوار مجرا، روند کاهش فشار با افزایش عمق منظم‌تر است و بیشترین ضریب اندرکنش در این مورد مربوط به مجرای با عرض ۰/۵ متر است که برابر ۰/۶۴ حاصل شده است (شکل ۱۶ ب). همچنین از شکل ۱۶ ج، مشخص است که کاهش عرض مجرا به ۰/۵ متر، باعث افزایش زیادی در مقدار ضریب اندرکنش وارد بر کف مجرا در قیاس با مجراهای دیگر شده و در این حالت ضریب اندرکنش به ۱/۰۱ رسیده است. به طور کلی می‌توان این‌گونه بیان کرد که کاهش نسبت عرض مجرا به عرض ترانشه به دلیل افزایش فاصله بین مجرا و ترانشه باعث کاهش اثر قوس‌شدگی و کنترل میزان فشار وارد بر مجرا می‌شود و مقدار ضریب اندرکنش را افزایش می‌دهد.

#### ۴.۵. بررسی اثر عرض ژئوفوم

عرض ناحیه‌ی نرم قرار گرفته بالای سقف مجرای مدفون، یکی دیگر از پارامترهایی



شکل ۱۷. تأثیر عرض ژئوفوم در ضریب اندرکنش (ع: عرض ژئوفوم).

است که در بخش حاضر به تأثیر آن توجه شده است. به این منظور، مدل‌هایی با عرض ژئوفوم ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر تحلیل و نتایج آن ارائه شده است. در تمامی مدل‌ها بدون توجه به عرض ژئوفوم، ضخامت آن ثابت و برابر ۰/۵ متر بوده است. شکل ۱۷ الف، نشان می‌دهد در شرایطی که ضخامت ژئوفوم برابر ۰/۵ متر انتخاب شده است، به علت عرض محدود آن در مقایسه با عرض مجرا، مقدار ضریب اندرکنش با شیبی متفاوت از سایر مدل‌ها به طرف دیوار مجرا افزایش یافته است. این در حالی است که در سایر مدل‌های با عرض‌های مختلف ژئوفوم، مقدار ضریب اندرکنش برای بخش میانی، اختلاف اندکی وجود دارد و به طرف دیوار مجرا افزایش می‌یابد. هنگامی که از ژئوفوم با عرض بیشتر نسبت به عرض مجرا استفاده شده است، تغییر ضریب اندرکنش در نزدیکی دیوار مجرا، نسبت به بخش میانی، نرخ افزایشی کمتری دارد که ناشی از پوشش کامل ژئوفوم در سقف است. اگرچه افزایش عرض ژئوفوم، مقدار فشار وارد بر سقف را کاهش می‌دهد، اما همان‌گونه که در شکل ۱۷ ب، مشاهده می‌شود، فشار وارد بر دیوار دچار افزایش شده است و بیشترین مقدار فشار جانبی اعمالی مربوط به حالتی است که عرض ژئوفوم برابر ۲ متر است. این در حالی است که در مورد فشار کف و سقف، اختلاف بین مدل‌های با عرض ژئوفوم ۲ و ۲/۵ متر محسوس نیست و تأثیر آن فقط در مقدار فشار وارد بر وجه جانبی قابل توجه است. بنابراین، می‌توان به این نتیجه رسید که عرض ژئوفوم، مقدار بهینه‌ی دارد که تأثیر آن لزوماً در تمامی وجوه مجرای مدفون یکسان نیست. نکته‌ی قابل توجه در مورد فشار وارد بر کف مجرا این است که با وجود اختلاف بین مقدار فشار جانبی وارد بر مجرا و با توجه به اختلاف ناچیز فشار وارد بر سقف در شرایطی که عرض ژئوفوم برابر ۲ و ۲/۵ متر است، فشار وارد بر کف در این دو حالت برابر و ضریب اندرکنش برای آن حدود ۰/۴۸ است (شکل ۱۷ ج). این موضوع به این معناست که مقدار فشار جانبی وارد بر دیوار مجرا، به تنهایی بر مقدار نیروی اصطکاکی به طرف پایین مؤثر نیست و به الگوی توزیع این نیرو نیز باید توجه کرد. تغییر عرض ژئوفوم، توزیع و جهت تنش‌های اصلی را بر وجوه مجرا تغییر می‌دهد و در جهت نیروی اصطکاکی و گستره‌ی آن تأثیرگذار است.

#### ۵.۵. بررسی اثر فشار سطحی

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که افزایش فشار سطحی، موجب کاهش ضریب اندرکنش در ۸۵٪ بخش میانی سقف شده است؛ اما با نزدیک شدن به دیوار مجرا، روند جریان عکس شده و مقدار ضریب اندرکنش افزایش یافته است، به طوری که مقدار ضریب اندرکنش در فاصله‌ی ۱۵٪ انتهایی، در شرایط فشار سطحی ۲۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب حدود ۱/۴ و ۱/۸ شده است (شکل ۱۸ الف). دلیل این کاهش ضریب اندرکنش در بخش میانی با افزایش فشار را می‌توان به تغییر شکل بیشتر ژئوفوم در اثر فشار بیشتر و در نتیجه، توسعه‌ی برش بیشتر در سطوح گسیختگی بالای ناحیه‌ی نرم به سمت بالا نسبت داد و از طرفی تنش کاهش یافته در بخش بالای مجرا، به سمت ستون‌های خاک کناری انتقال یافته است که باعث افزایش ضریب اندرکنش در بخش‌های کناری سقف مجرا شده است. این در حالی است که مطالعه‌ی مقدار ضریب اندرکنش بر دیوار جانبی مطابق شکل ۱۸ ب، بیانگر شرایط متفاوتی است و برای این وجه مجرای مدفون، افزایش فشار سطحی در تمامی طول دیوار باعث افزایش ضریب اندرکنش شده است. با این حال، مقدار ضریب اندرکنش در پایین‌ترین نقطه، یعنی نزدیک به کف مجرا، برای تمامی موارد تقریباً یکسان و اختلاف کمی با یکدیگر دارند. در تمامی حالت‌ها، مقدار فشار وارد بر دیواره کمتر از مقدار فشار در حال سکون است. ضریب اندرکنش کف مجرا نیز روند مشابهی را با فشار وارد بر سقف نشان می‌دهد و افزایش فشار سطحی مقدار

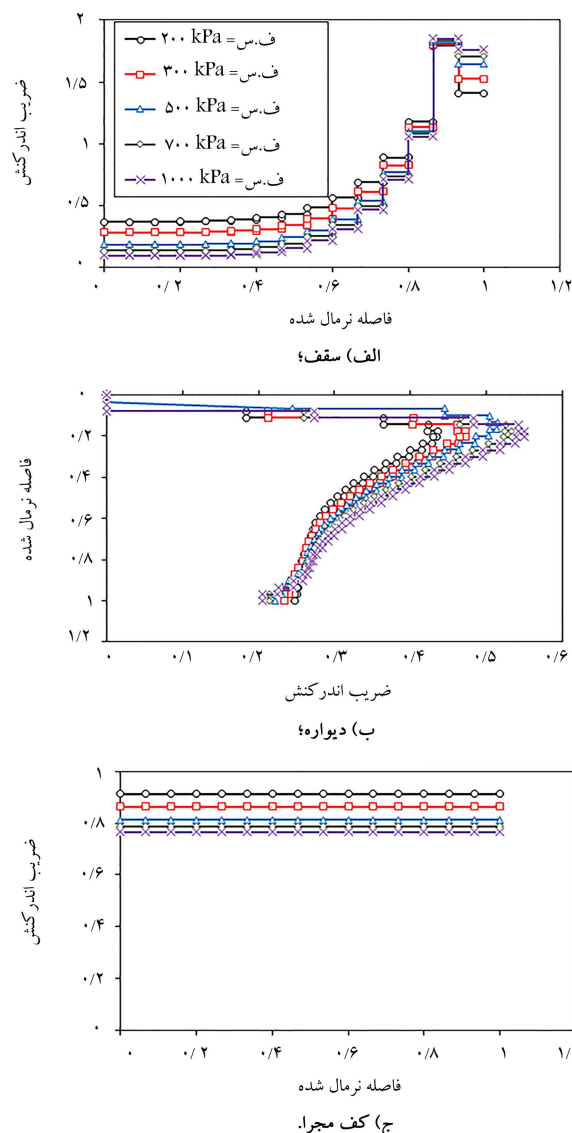
## ۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، با معرفی روشی به منظور کاهش مقدار تنش وارد بر مجرای مدفون، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در الگو و مقدار تنش اعمالی بر وجوه مختلف مجرای جعبه‌یی پرداخته شده است. در ابتدا، مقایسه‌یی بین مقادیر تنش حاصل از تحلیل عددی دوبعدی برای دو روش دفن متداول و روش مورد مطالعه انجام شد و نتایج نشان داد که دفن مجرای به روش پیشنهادی به علت پدیده‌ی قوس در بالای مجرا و همچنین در کنار آن باعث کاهش مقدار فشار اعمالی به سقف و کف مجرای مدفون، نسبت به روش دفن در ترانشه و دفن در ترانشه‌ی ناقص می‌شود. اما فشار اعمالی به دیوار مجرا نسبت به مجرای قرار گرفته در ترانشه بیشتر بوده است که به دلیل اضافه تنش انتقال‌یافته از ستون خاک قرار گرفته در بالای مجرا به ستون‌های خاک کناری ناشی از گسترش قوس در خاکریز است. با وجود این، همچنان مقدار فشار وارد بر دیواره‌ی مجرا از مقدار فشار در حال سکون، کمتر و روش پیشنهادی را می‌توان به عنوان روشی مناسب جهت کاهش مقدار تنش وارد بر مجرای جعبه‌یی محسوب کرد. در ادامه‌ی تحلیل‌ها، مطالعات پارامتریک انجام شده در روش دفن در ترانشه به روش ترانشه‌ی ناقص نشان داد که مقدار تنش وارد بر سقف تا محدوده حدود ۶۰٪ از میانه‌ی سقف، از مشخصات هندسی ترانشه و مجرا، تأثیر پذیری اندکی داشته است، در حالی که با انتخاب عرض کوچک‌تر از مقدار مشخص برای ژئوفوم، مقدار تنش وارد بر سقف دچار افزایش می‌شود. این در حالی است که مقدار ضریب اندرکنش برای دیوار مجرا، با افزایش عرض ترانشه، بزرگ‌تر شده و با افزایش ارتفاع و عرض مجرا، کاهش یافته است. در تمامی موارد و تحت اثر پارامترهای مختلف، مقدار ضریب اندرکنش سقف به طرف دیوار مجرا افزایش می‌یابد. مقدار ضریب اندرکنش دیواره در اثر افزایش عرض ژئوفوم تا مقدار ۲ متر، روند افزایشی داشته و با اضافه شدن بیشتر عرض مصالح مذکور، کاهش یافته است؛ در حالی که مقدار فشار سطحی در الگوی توزیع تنش بر دیواره، تأثیر چندانی ندارد و مقدار آن را نیز در مقایسه با دیگر پارامترها، کمتر دچار تغییر می‌کند. در ارتباط با کف مجرا نیز تأثیر پارامتر مذکور قابل ملاحظه نیست و فقط در محدوده‌ی کوچکی، مقدار ضریب اندرکنش را تغییر می‌دهد. افزایش عرض و ارتفاع ترانشه، ضریب اندرکنش کف مجرا را به ترتیب افزایش و کاهش می‌دهد و انتخاب ژئوفوم با عرض زیاد، مقدار آن را به شدت کاهش می‌دهد. به طور کلی می‌توان بیان کرد، هر پارامتری که تأثیر بیشتری در توسعه‌ی قوس بین دیوار ترانشه و دیوار مجرا داشته باشد، مقدار ضریب اندرکنش دیوار مجرا را کاهش می‌دهد؛ در حالی که مقدار ضریب اندرکنش کف، علاوه بر مقدار فشار وارد بر دیوار مجرا، به جهت تنش‌های اصطکاکی روی آن بستگی دارد.

## پانوشته‌ها

1. tension cutoff
2. induced Trench Installation (ITI)
3. trench installation (TI)
4. trenched induced trench installation (TITI)
5. quadratic

6. Marston
7. Spangler
8. Kang
9. Vaslestad



شکل ۱۸. تأثیر فشار سطحی در ضریب اندرکنش (ف.س: فشار سطحی).

ضریب اندرکنش را کاهش می‌دهد، اما با این تفاوت که مقدار ضریب در این وجه در تمام طول کف ثابت است (شکل ۱۸ ج). برای محدوده‌ی فشار سطحی اعمالی مورد مطالعه در بخش حاضر، مقدار ضریب اندرکنش کف مجرا کوچک‌تر از ۱ به دست آمده است.

## منابع (References)

1. Moser, A.P. and Folkman, S. "Buried pipe design", Mc Graw Hill, New York (2008).
2. Maekawa, K., Zhu, X., Chijiwa, N. and et al. "Mechanism of long-term excessive deformation and delayed shear failure of underground RC box culverts", *Journal of Advanced Concrete Technology*, **14**(5), pp. 183-204 (2016).
3. Shatnawi, A., Almasabha, G. and Tarawneh, B. "Structural behavior of concrete box culverts under deep burial", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, **8**(4), pp.1-5 (2017).
4. Pimentel, M., Costa, P., Flix, C. and et al. "Behavior of reinforced concrete box culverts under high embankments", *Journal of Structural Engineering*, **135**(4), pp. 366-375 (2009).
5. Kim, K. and Yoo, C.H. "Design loading on deeply buried box culverts", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(1), pp. 20-27 (2005).
6. Oshati, O.S., Valsangkar, A.J. and Schriver, A.B. "Performance of two cast-in-place box culverts under high embankments", *Canadian Geotechnical Journal*, **12**(49), pp. 1331-1346 (2012).
7. Ning, B.K., Fan, H., Gong, L. and et al. "Study on vertical earth pressure of slab culvert under high embankment", *Applied Mechanics and Materials, Switzerland: Trans Tech. Publ.*, **256-259**, pp. 1898-1902 (2012).
8. Bennett, R.M., Wood, S.M., Drumm, E.C. and et al. "Vertical loads on concrete box culverts under high embankments", *Journal of Bridge Engineering*, **10**(6), pp. 643-649 (2005).
9. Weng, X.L., Wang, W. and Zhang, L.J. "The Study on soil pressure on embankment culvert under high-fill", *Applied Mechanics and Materials*, **170-173**, pp. 1696-1699 (2012).
10. Chen, B. and Sun, L. "Performance of a reinforced concrete box culvert installed in trapezoidal trenches", *Journal of Bridge Engineering*, **19**(1), pp. 120-130 (2013).
11. Bueno, B., Viana, P. and Zornberg, J. "A novel construction method for buried pipes using geosynthetics", *Geosynthetics Research and Development in Progress, Eighteenth Geosynthetic Research Conference*, pp. 1-7 (2005).
12. Marston, A. "The theory of loads on pipes in ditches: and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe", Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts (1913).
13. Li, L., Aubertin, M., El Mkadmi, N. and et al. "An evaluation of influence factors that affect pressures in back-filled trenches", *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, pp. 1747-1750 (2013).
14. Selig, E.T. and Packard, D.L. "Buried concrete pipe trench installation analysis", *Journal of Transportation Engineering*, **113**(5), pp. 485-501 (1987).
15. Oshati, O.S., Valsangkar, A.J. and Schriver, A.B. "Earth pressures exerted on an induced trench cast-in-place double-cell rectangular box culvert", *Canadian Geotechnical Journal*, **49**(11), pp. 1267-1284 (2012).
16. Li, Y.G., Xing, S.Y. and Feng, L.W. "Study on earth pressure on the top of trapezoid ditch-buried culverts", *Applied Mechanics and Materials, Switzerland: Trans. Tech. Publ.*, pp. 707-713 (2011).
17. Cheng, Q.Y. and Li, Y.G. "Finite element analysis of the soil pressure in sandy soil at the top of pipe culvert", *Applied Mechanics and Materials: Trans. Tech. Publ.*, 744-764, pp. 1077-1081 (2015).
18. Valsangkar, A.J. "Soil-structure interaction studies: Research and practice", GeoHalifax, Shanghai, pp. 1-18 (2009).
19. Cho, S. and Vipulanandan, C. "Behavior of flexible pipe with sand backfill in trench condition and verification with finite element method", *Pipeline Division Specialty Congress, San Diego, California, ASCE*, pp. 1-10 (2004).
20. Gerscovich, D., Sieira, A. and Ferreira, A. "Numerical simulation of the mechanical behavior of buried pipes in trench", *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, India, Goa (2008).
21. Kellogg, C.G. "Vertical earth loads on buried engineered works", *Journal of Geotechnical Engineering*, **119**(3), pp. 487-506 (1993).
22. Corey, R., Han, J., Khatri, D.K. and Parsons, R. "Laboratory study on geosynthetic protection of buried steel-reinforced HDPE pipes from static loading", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **140**(6), pp.1-10 (2014).
23. Chen, B., Zheng, J. and Han, J. "Experimental study and numerical simulation on concrete box culverts in trenches", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **24**(3), pp. 223-234 (2010).
24. Krushelnitzky, R. and Brachman, R. "Response of a landfill drainage pipe buried in a trench", *Canadian Geotechnical Journal*, **42**(3), pp. 752-762 (2005).
25. McAfee, R.P. and Valsangkar, A.J. "Field performance, centrifuge testing, and numerical modelling of an induced trench installation", *Canadian Geotechnical Journal*, **45**(1), pp. 85-101 (2008).
26. Meguid, M., Hussein, M., Ahmed, M. and et al. "Investigation of soil-geosynthetic-structure interaction associated with induced trench installation", *Geotextiles and Geomembranes*, **45**(4), pp. 320-330 (2017).
27. Turan, A., El Naggar, M.H. and Dundas, D. "Investigation of induced trench method using a full scale test embankment", *Geotechnical and Geological Engineering*, **31**(2), pp. 557-568 (2013).
28. McGuigan, B.L. and Valsangkar, A.J. "Earth pressures on twin positive projecting and induced trench box culverts under high embankments", *Canadian Geotechnical Journal*, **48**(2), pp. 173-185 (2011).
29. McGuigan, B.L. and Valsangkar, A.J. "Field monitoring and analysis of twin 3660 mm inside diameter induced trench culverts installed under 21.7 m of fill", *Canadian Geotechnical Journal*, **48**(5), pp. 781-794 (2011).
30. Selig, E.T. and Packard, D.L. "Buried concrete pipe embankment installation analysis", *Journal of Transportation Engineering*, **112**(6), pp. 576-592 (1986).

31. Dancygier, A. and Yankelevsky, D. "A soft layer to control soil arching above a buried structure", *Engineering Structures*, **18**(5), pp. 378-386 (1996).
32. Kang, J., Parker, F. and Yoo, C. "Soil-structure interaction and imperfect trench installations for deeply buried corrugated polyvinyl chloride pipes", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2028**, pp. 192-202 (2007).
33. Meguid, M. and Hussein, M. "A numerical procedure for the assessment of contact pressures on buried structures overlain by EPS geofoam inclusion", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **3**(1), pp. 2 (2017).
34. Marston, A. "The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments", *Highway Research Board Proceedings, Washington, DC, USA: Highway Research Board*, **9**, pp. 138-170 (1930).
35. ACPA, "Concrete pipe design manual", American Concrete Pipe Association, United State of America (1998).
36. AASHTO, L. "LRFD bridge design specifications", Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012).
37. Sladen, J. and Oswell, J. "The induced trench method-a critical review and case history", *Canadian Geotechnical Journal*, **25**(3), pp. 541-549 (1988).
38. Abuhajar, O., El Naggar, H. and Newson, T. "Static soil culvert interaction the effect of box culvert geometric configurations and soil properties", *Computers and Geotechnics*, **69**, pp. 219-235 (2015).
39. McAfee, R. and Valsangkar, A. "Performance of an induced trench installation", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1936**, pp. 230-237 (2005).
40. Horvath, J.S. "The compressible inclusion function of EPS geofoam", *Geotextiles and Geomembranes*, **15**(1), pp. 77-120 (1997).
41. Hazarika, H. "Stress-strain modeling of EPS geofoam for large-strain applications", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(2), pp. 79-90 (2006).
42. Horvath, S. "Lessons learned from failures involving geofoam in roads and embankments", Research Rep. No. CE/GE-99. 1 (1999).
43. veslestad, J. "soil-structure interaction of buried culverts", Ph.D, Thesis, institutt for Geoteknikk, Norway. (1990).
44. ABAQUS, V. "6.14 Documentation", Dassault Systemes Simulia Corporation (2014).
45. Helwany, S. "Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications" *John Wiley & Sons*, New Jersey (2007).
46. Zheng, J.J., Luo, D.P. and Ma, Q. "Numerical analysis of slab culvert beneath imperfect ditch covered with geogrid layers", *Applied Mechanics and Materials*, **71**, pp. 3338-3341 (2011).
47. Chen, B. and Sun, L. "The impact of soil properties on the structural integrity of high-fill reinforced concrete culverts", *Computers and Geotechnics*, **52**, pp. 53-45 (2013).
48. Sun, L., Hopkins, T.C. and Beckham, T.L. "Reduction of stresses on buried rigid highway structures using the imperfect ditch method and expanded polysterene (Geofoam)", Degree, University, Kentucky, USA (2009).
49. Pardo, G. and Saez, E. "Experimental and numerical study of arching soil effect in coarse sand", *Computers and Geotechnics*, **57**, pp. 75-84 (2014).
50. Labuz, J. and. Zang, A. "Mohr-Coulomb failure criterion", *Rock mechanics and rock engineering*, **45**(6), pp. 975-979 (2012).
51. Elragi, A.F. "Selected engineering properties and applications of EPS geofoam", Ph. D. Thesis, State University of New York, Syracuse, NY (2000).
52. Rizov, V., Shipsha, A. and Zenkert, D. "Indentation study of foam core sandwich composite panels", *Composite Structures*, **69**(1), pp. 95-102 (2005).
53. Chun, B.S., Lim, H.-S., Sagong, M. and et al. "Development of a hyperbolic constitutive model for expanded polystyrene (EPS) geofoam under triaxial compression tests", *Geotextiles and Geomembranes*, **22**(4), pp. 223-237 (2004).
54. Bartlett, S.F., Lingwall, B.N. and Vaslestad, J. "Methods of protecting buried pipelines and culverts in transportation infrastructure using EPS geofoam", *Geotextiles and Geomembranes*, **43**(5), pp.450-461 (2015).
55. Ozturk, U.E. and Anlas, G. "Finite element analysis of expanded polystyrene foam under multiple compressive loading and unloading", *Materials & Design*, **32**(2), pp. 773-780 (2011).
56. Wong, H. and. Leo, C.J. "A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam", *Geotextiles and Geomembranes*, **24**(5), pp. 299-310 (2006).
57. Deshpande, V. and. Fleck, N.A. "Isotropic constitutive models for metallic foams", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **48**(6), pp. 1253-1283 (2000).
58. Das, B.M. "Advanced soil mechanics", CRC Press (2013).
59. Li, L., Dube, J.-S. and Aubertin, M. "An extension of marston's solution for the stresses in backfilled trenches with inclined walls", *Geotechnical and Geological Engineering*, **31**(4), pp. 1027-1039 (2013).
60. Birhan, A. "Effect of confinement and temperature on the behavior of EPS geofoam", (2014).
61. Horvath, J.S. "Emerging trends in failures involving EPS-block geofoam fills", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **24**(4), pp. 365-372 (2010).
62. Marston, A. "The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments", Transportation Research Board Business Office, Washington, DC, USA: Iowa State College, pp. 138-170 (1930).
63. Spangler, M.G. and Handy, R.L. "Soil engineering", Intext Educational Publishers (1973).
64. Kang, J. "Soil-structure-interaction and imperfect trench installation applied to deeply buried conduits", Ph.D. Thesis, Auburn, USA (2007).
65. Abuhajar, O., El Naggar, H. and Newson, T. "Numerical modeling of soil and surface foundation pressure effects on buried box culvert behavior", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **142**(12), pp. 04016072 (2016).