

## تحلیل عددی اندرکنش زمین و شالوده‌های بزرگ با در نظر گرفتن اثرات ابعاد شالوده

جهانگیر خزائی (استادیار)

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه

سیدعبدالعظیم امیرشاه کریمی (استادیار)

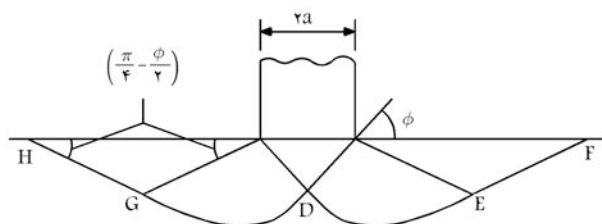
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

در این نوشتار تغییرات خواص و پارامترهای رفتاری زمین زیر و اطراف شالوده با توجه به تغییر ابعاد (هندسه) شالوده به صورت عددی و با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش بین زمین و شالوده بررسی و مطالعه می‌شود. برای این منظور مدل تحلیلی به صورت دوجبه‌ای و ثابت، تحت بارگذاری گسترده‌ی یکنواخت برای شالوده‌های با ابعاد کوچک و بزرگ در محیط نرم‌افزار ANSYS نسخه ۸٫۱ آنالیز شده است. نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که رفتار زمین در زیر و اطراف شالوده‌های کوچک به صورت برشی است و این همان رفتار پیش‌بینی شده و الگوی خرابی پذیرفته شده است که اغلب محققان به آن اعتقاد دارند. اما در شالوده‌های بزرگ زمین واقع در نواحی مرکزی و زیر شالوده عمدتاً تحت تنش‌های فشاری و هم‌جانبه است و رفتاری نرم همراه با خمیری سخت‌شونده دارد؛ بنابراین باربری آن همواره رو به افزایش است که منجر به تمرکز تنش و تغییر شکل‌ها به سوی این ناحیه خواهد شد. پس با توجه به ثابت بودن بارگذاری، نواحی خارج از زیر شالوده (طرفین) بایستی در حالت باربرداری قرار گیرند. الگوی خرابی در شالوده‌های بزرگ به صورت درونی و همراه با تشکیل سطح لغزش قائم در مرز مشترک زمین زیر و اطراف شالوده، تشکیل ستون باربر و مقاوم از زمین در زیر شالوده و وقوع پدیده‌ی «تمرکز تغییر شکل‌ها» بین زمین زیر و اطراف شالوده است. لازم به ذکر است که خواص و رفتار زمین زیر شالوده و حجم زمین مؤثر در باربری با تغییر هندسه‌ی شالوده تغییر می‌کند؛ لذا ماتریس سختی سیستم تغییر خواهد کرد که این تغییر به صورت توأم<sup>۲</sup> است.

واژگان کلیدی: تحلیل عددی، اندرکنش، اثر تغییر ابعاد شالوده، خواص رفتاری زمین، الگوی خرابی، تمرکز تغییر شکل.

### مقدمه

تکیه بر رابطه‌ی کلی هانسن تحقیقات دامنه‌داری شروع شد که تاکنون همچنان ادامه دارد. عمده‌ی این مطالعات بر تغییرات ضریب ظرفیت باربری ( $N_\gamma$ ) در جمله‌ی سوم ظرفیت باربری با توجه به مشخصات مکانیکی خاک و ابعاد شالوده متمرکز است و بر پایه‌ی الگوی خرابی ارائه شده توسط ترزاقی استوارند.<sup>[۱]</sup>



شکل ۱. شکل عمومی گوه‌های گسیختگی برشی ترزاقی.<sup>[۱]</sup>

موضوع بررسی و مطالعه‌ی رفتار زمین در زیر شالوده‌ها برای اولین بار توسط ترزاقی<sup>۳</sup> (۱۹۴۳) به صورت نظریه‌ی ظرفیت باربری حدی برای یک شالوده‌ی نواری (دارای نسبت طول به عرض خیلی بزرگ) مطرح شد. این نظریه با استفاده از تحلیل حالت حدی و با تعریف سطوح لغزش (الگوی خرابی) مطابق شکل ۱ به رابطه‌ی ظرفیت باربری منجر می‌شود. این رابطه بسیار ساده است و برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری یک شالوده‌ی مربع یا دایره‌ی باید ضرایبی را در آن وارد کرد. مطابق این نظریه ظاهراً تنها پارامتری که اثر اندازه‌ی شالوده را مشخص می‌کند «عرض شالوده» (B) است.<sup>[۱]</sup> بعدها مایرهوف<sup>۴</sup> (۱۹۶۳) و سرانجام هانسن<sup>۵</sup> (۱۹۷۰) نظریه‌ی ترزاقی را گسترش داده و با در نظر گرفتن یکسری پارامترهای دیگر در معادله‌ی ارائه شده توسط ترزاقی بخشی از نواقص آن را برطرف کردند و رابطه شکل عمومی تری پیدا کرد. با

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۳/۴، دوری ۱۳۸۸/۲/۲۲، پذیرش ۱۳۸۸/۱۰/۲۹.

در دهه‌های اخیر رشد نمایی در زمینه‌ی رایانه‌ها و ماشین‌های حساب‌گر، موجب استفاده‌ی بیش از پیش محققین از روش‌های عددی، از جمله روش اجزاء محدود غیرخطی در اغلب زمینه‌های مهندسی ژئوتکنیک - نظیر تحلیل و مطالعه‌ی پی‌های سطحی - شده است. مطالعات عددی در زمینه‌ی بررسی و مطالعه‌ی رفتار زمین در زیر شالوده‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۷۴ انجام شد<sup>[۱]</sup> و نتیجه‌ی حاصل از آن نشان داد که انتخاب نوع المان در نتیجه‌ی تحلیل بسیار مهم و مؤثر است و چنانچه از برنامه‌های اجزاء محدود که براساس روش کنترل تغییر مکان کار می‌کنند استفاده شود، برای رسیدن به جواب‌های منطقی‌تر باید افزایش کرنش حجمی به‌صورت یک متغیر مستقل در نظر گرفته شود.

بعدها محققین (۱۹۸۰) با استفاده از روش اجزاء محدود در تحلیل رفتار خاک‌ها، سعی کردند با نهایی قابل تحمل توسط سیستم باربر شالوده - خاک (پی) را پیش‌بینی کنند.<sup>[۲]</sup> البته تلاش آن‌ها بسیار مقدماتی و تنها در خاک‌های غیراتساعی قابل استفاده بود. در ادامه، در سال ۱۹۸۴، در تحقیقی توانایی‌ها و محدودیت‌های روش اجزاء محدود طی تحلیل‌های جدی ارزیابی شد. محققین در این ارزیابی عنوان کرده‌اند که به‌طور کلی سه روش برای رسیدن به جواب‌های منطقی به‌منظور مدل‌کردن خاک‌های اصطکاکی اتساعی با کمک روش اجزای محدود و در شرایط کرنش مسطح و تقارن محوری وجود دارد. در روش اول استفاده از المان‌های هشت‌گونی با چهار نقطه‌ی گوسی پیشنهاد شد. با این حال دی بورست (۱۹۸۲) بیان می‌دارد که این المان‌ها نیز در بعضی شرایط جواب‌های چندان دقیقی ارائه نمی‌کنند. دومین روش، راه‌حلی ترکیبی است که در آن کرنش نیز همانند تنش درون‌یابی خطی می‌شود. اگرچه این روش در ابتدا امیدوارکننده به نظر می‌رسد، ولی در اغلب برنامه‌های اجزاء محدودی که از روش کنترل جابه‌جایی استفاده می‌کنند، قابل استفاده نیست. در روش سوم که در سال ۱۹۸۲ پیشنهاد شد،<sup>[۳]</sup> المان‌های ۱۵ گرهی با ۱۲ نقطه‌ی گوسی برای مسائل کرنش مسطح و المان‌های ۱۵ گرهی با ۱۶ نقطه‌ی گوسی برای مسائل تقارن محوری پیشنهاد شد.

در ادامه و براساس پیشنهادات ارائه‌شده، محققین با استفاده از آنالیزهای عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که تنش جانبی محصورکننده تابعی از پهنای شالوده (B) و وزن مخصوص خاک زیر شالوده (γ) است.<sup>[۴]</sup> آنها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که پارامترهای مقاومتی خاک (φ و C) که در محاسبه‌ی ظرفیت باربری از روابط ترازقی حاصل می‌شوند، ثابت نیستند و با توجه به ابعاد شالوده و سطح تنش جانبی محصورکننده باید تعریف و اندازه‌گیری شوند. در نوشتار دیگری که در تکمیل بحث پیشین ارائه شد،<sup>[۵]</sup> روش پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی شالوده‌های سطحی مستقر بر ماسه‌ها، با توجه به اثرات سطح تنش<sup>۶</sup> و اندازه‌ی شالوده<sup>۷</sup> ارائه، و تأکید شده است که وابستگی ظرفیت باربری نهایی به سطح تنش متأثر از وابستگی تنش هم‌جانبه به مقاومت برشی زمین است، یعنی رفتار زمین در زیر شالوده متأثر از ابعاد شالوده و سطح تنش خواهد بود.<sup>[۶،۵]</sup>

سرانجام در سال ۲۰۰۱، پژوهش‌گران در مطالعات‌شان نشان دادند که علاوه بر وابستگی ظرفیت باربری به ابعاد شالوده، شکل گوه‌های گسیختگی ترازقی نیز با تغییر ابعاد شالوده عوض می‌شود.<sup>[۷]</sup>

اخیراً نیز در تحقیق جدیدی که در سال ۲۰۰۵ بر ظرفیت باربری شالوده‌های دایره‌یی و به‌روش اجزاء محدود (عددی) انجام شد،<sup>[۸]</sup> مشخص شد که ابهامات زیادی در این موضوع وجود دارد که به‌صورت واقع‌گرایانه در زمان تعریف معادله‌ی ظرفیت باربری توسط ترازقی تخمین و فرض شده‌اند و بیشتر کوشش‌ها روی توسعه و تفسیر واقعی پارامترهای ظرفیت باربری متمرکز شده است، در حالی که کاربرد

معادله‌ی ظرفیت باربری ترازقی موضوعی است که چندین ابهام با اهمیت در رابطه با سازگاری فرضیات با واقعیت دارد.

نوشتار حاضر حاصل یک تحقیق مفهومی - تحلیلی است که در آن سعی می‌شود با شبیه‌سازی ریاضی و مدل‌سازی تحلیلی، رفتار مصالح و استفاده از ابزارها و روش‌های محاسباتی به واقعیت رفتاری زمین نزدیک‌تر شود. شیوه‌ی مورد استفاده در تحقیق حاضر، شکستن محوطه‌ی مورد مطالعه به ناحیه‌های داخلی است که در هنگام بارگذاری، به‌لحاظ مکانیکی رفتار کاملاً متفاوتی دارند. در این ارتباط توجه به موضوع اندرکنش زمین و شالوده، شکل الگوی خرابی و میزان تنش محصورکننده (همه‌جانبه) در زمین زیر و اطراف با تغییر ابعاد شالوده از جمله موضوعات جدیدی است که به آن پرداخته شده است.

## تعریف و تقسیم‌بندی اندرکنش

موضوع اندرکنش (اثر متقابل) اجزاء سازه‌ها از بحث‌های مهم و پیچیده‌ی مهندسی است که درحال حاضر مورد توجه ویژه‌ی محققین است. طراحان و مهندسان محاسب به‌دلیل عدم اطلاع و دانش کافی از موضوع، و نیز با توجه به این که تاکنون در آئین‌نامه‌های معتبر موضوع اندرکنش گنجانیده نشده، عموماً از بررسی آن صرف‌نظر می‌کنند اما با پیشرفت‌های موجود و توانایی‌های بیشتر فتاوری و خواسته‌ی کارفرمایان بررسی و مطالعه‌ی اندرکنش الزامی است. برای نیل به این هدف باید راه‌حل‌های عملی معرفی شود که این امر در حیطه‌ی مهندسی ژئوتکنیک و سازه خواهد بود. به‌طور کلی سه نوع اندرکنش در ارتباط با مصالح ژئومکانیکی با شکل‌پذیری زیاد، فولاد و بتن قابل تعریف و بررسی است.<sup>[۹]</sup>

### ۱. اندرکنش به‌صورت سازگاری در مرز مشترک و سطح تماس

#### مصالح متفاوت<sup>۸</sup>

در این حالت باید با تعریف المان‌های واسطه<sup>۹</sup> در سطوح تماس، بین مصالح مختلف ارتباط برقرار شود. المان واسطه خواص مصالح دو محیط را دارد و تا حد معینی تنش‌ها را تحمل می‌کند. در این المان که موجد شرایط سازگاری و پیوستگی بین دو محیط است، انتقال تنش به‌صورت پیوسته بین دو محیط انجام می‌شود و پس از آن که تنش به حد نهایی رسید المان‌های طرفین به‌صورت مستقل عمل می‌کنند و جدایش به وجود می‌آید، یعنی در این مرحله معادلات سازگاری برقرار نخواهد بود.

### ۲. اندرکنش هندسی (تغییر شکل‌های بزرگ و سُرخوردن در سطح

#### تماس<sup>۱۰</sup>)

جابه‌جایی و حرکت نقاط متناظر از دو محیط مجاور بسیار محسوس و بزرگ است، به‌طوری که احتمال جابه‌جایی و حرکت بخشی از یک محیط در محیط دیگر وجود دارد و بنابراین خرابی (گسیختگی) در بخشی از محیط اتفاق می‌افتد. روابط تنش-کرنش در نقاط متناظر مرزی دو محیط برقرار نیست و باید رفتار هندسی مصالح در مرز مشترک به‌صورت غیرخطی بررسی و مطالعه شود.

### ۳. اندرکنش رفتاری (ناپیوستگی محیط مادی<sup>۱۱</sup>)

میزان، مقدار و جهت تنش‌ها و بالطبع تغییر شکل‌ها در نقاط تماس با هم یکسان نیست. وقوع پدیده‌ی «تمرکز تغییر شکل» به‌طور واضح در مرزهای تماس محتمل

عددی مقدور است که اساس و پایه‌ی نظری تجزیه و تحلیل تغییر شکل‌ها است. در این تحقیق از روش تحلیل مذکور استفاده شده است.

## نظریه و مدل تحلیلی

### ۱. مدل پیشنهادی

وقتی تغییر شکل‌ها زیاد و محوطه بزرگ باشد، احتمال شکسته شدن محوطه و تبدیل آن به چند محوطه‌ی متصل و پیوسته بسیار زیاد است. این پدیده در علم مهندسی رفتار غیرخطی خمیری به «حوزه‌بی‌شدن» (پدیده‌ی تمرکز تغییر شکل‌ها) معروف شده است که براساس آن تبدیل یک محوطه به یک مجموعه محوطه‌ها با تعریف شرایط مرزی متغیر امکان‌پذیر می‌شود. این محوطه‌ها براساس میزان بار، رفتارهایی مختلف با اندرکنش‌های متفاوت در زمین دارند. در تحقیق اخیر برای پیش‌بینی و تفسیر نتایج تحلیل رفتار زمین در زیر شالوده از روش حلقه‌های پیوسته‌ی نرم‌شونده به صورت مدل تفهیمی در تنظیم تمرکز تغییر شکل‌ها و تفسیر رفتار واقعی مصالح استفاده می‌شود.<sup>[۱۰]</sup>

مطابق این مدل در روش آنالیز براساس تغییر شکل‌ها به دلیل یکنواخت فرض کردن رفتار زنجیرها و نیز یکسان بودن میزان بار در آنها، رفتار تمام حلقه‌ها در تمام مراحل بارگذاری تا شروع شکست شبیه به هم است و تغییر شکل کلی برابر با مجموع تغییر شکل همه‌ی حلقه‌هاست. چنانچه برای توجیه تمرکز تغییر شکل‌ها در شکل ۲ فرض کنیم که به لحاظ رفتاری هر پنج حلقه شبیه به هم نیستند و یکی از حلقه‌ها، مثلاً حلقه‌ی شماره‌ی ۳، ضعیف‌تر از سایر حلقه‌ها باشد قبل از این که رفتار حلقه‌ی شماره ۳ به حالت سست‌شونده برسد، رفتار سیستم و نیز رفتار همه‌ی حلقه‌ها مشابه است و از لحظه‌ی که حلقه‌ی شماره ۳ به وضعیت سست‌شوندگی برسد کل سیستم را به عملکرد سست‌شونده وامی‌دارد. مطابق شکل ۳ در این حالت حلقه‌ی شماره ۳ تحت بارگذاری است در حالی که حلقه‌های شماره ۱، ۲، ۴ و ۵ به حالت باربرداری درآمده و جمع می‌شوند.<sup>[۱۰]</sup>

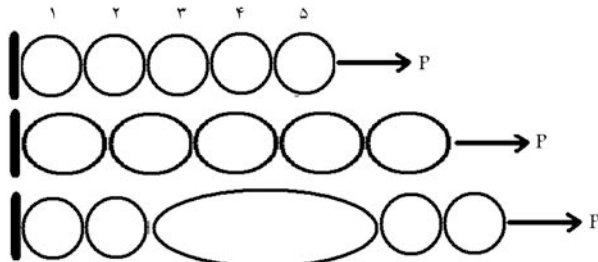
در این وضعیت تغییر طول کل سیستم با در نظر گرفتن تغییر طول در حلقه‌ی شماره ۳ که در وضعیت سست‌شوندگی قرار دارد و نیز کسر کردن میزان جمع‌شدگی در سایر حلقه‌ها به دست می‌آید:

$$\Delta \delta_t = \Delta \delta_{P(3)} - \Delta \delta_{e(1)} - \Delta \delta_{e(2)} - \Delta \delta_{e(4)} - \Delta \delta_{e(5)} \quad (1)$$

با فرض برابر بودن میزان جمع‌شدگی در حلقه‌های ۱، ۲، ۴ و ۵، خواهیم داشت:

$$\Delta \delta_t = \Delta \delta_{P(3)} - 4 \cdot \Delta \delta_{e(1)} \quad (2)$$

مشاهده می‌شود که با اعمال بارگذاری، یک حلقه شروع به تغییر شکل زیاد و نهایتاً شکستن می‌کند در حالی که سایر حلقه‌ها مایل به بازگشت به شکل اولیه‌اند؛ یعنی



شکل ۲. تغییر شکل شماتیک حلقه‌های پیوسته‌ی نرم‌شونده.<sup>[۱۰]</sup>

و قابل مشاهده است. این نوع خواص رفتاری ممکن است حتی در یک محیط مادی به وجود آید. تفاوت یا ناپیوستگی فقط به علت ماهیت رفتاری بخش‌های مختلف محیط مادی تحت عوامل خارجی یا داخلی روی می‌دهد، یعنی ممکن است علی‌رغم ثابت و یکسان بودن جنس مصالح، خواص رفتاری در نقاط مختلف از محیط مادی متفاوت باشد. این نوع اندرکنش مفهومی است و فقط با مدل‌سازی کلی مجموعه شالوده و بخش مؤثر زمین (محیط مطالعه) در نظر گرفته می‌شود. به هر حال در بحث اندرکنش زمین و سازه علاوه بر سیستم سازه‌یی، باید مجموعه قطعات غیر باربر مثل دیوارها و قطعات پرکننده و... را که منجر به پیچیده شدن مدل تحلیلی و روش مدل‌سازی می‌شوند، لحاظ کرد.

هنگام محاسبه‌ی تغییر شکل‌ها در نظر گرفتن رفتار زمین الزامی است. در تغییر شکل‌های کوچک، اثر تغییر شکل بر نازک‌کاری یا حایل‌ها و پرکننده‌ها مهم است، اما در تغییر شکل‌های بزرگ - مخصوصاً هنگام زلزله - موقعیت دیوارهای پرکننده از لحاظ توزیع جرم از یک سو و به لحاظ ایجاد سختی و دخالت در ماتریس سختی سازه از سوی دیگر اهمیت می‌یابد. یعنی در تغییر شکل‌های بزرگ زمین، حد و تعریف سازه به دلیل دخالت و ورود المان‌های غیرسازه‌یی به سازه تغییر می‌کند. المان‌های سازه‌یی جدیدی وارد عمل می‌شوند که میزان دخالت آنها بستگی به هندسه، جنس و اتصال آنها با سازه‌ی اصلی دارد. این تغییر ماتریس سختی و دخالت المان‌های جدید با توجه به میزان تغییر شکل و شکستن المان‌های قدیم عوض می‌شود که با روش مکانیک شکست این موضوع قابل بررسی و تخمین است. معمولاً زمین به صورت یک محیط پیوسته (نیمه بی‌نهایت) برای محاسبه تنش و تغییر شکل‌ها مدل می‌شود.<sup>[۱۰]</sup>

## تحلیل اندرکنش زمین و شالوده‌های بزرگ

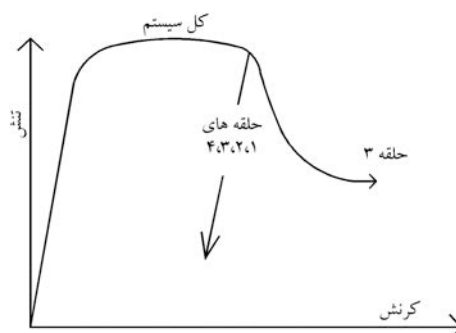
برای بررسی و تحلیل اندرکنش زمین و شالوده‌های بزرگ به‌طور کلی دو روش تحلیلی وجود دارد.

### ۱. تحلیل باربری به روش تعادل حدی

به‌منظور بررسی و تعیین ضریب اطمینان در ارتباط با رفتار زمین زیر شالوده‌های بزرگ باید تحلیل حالت حدی انجام شود. معمولاً برای روش تحلیل حدی، تعریف الگوی خرابی - یعنی تعریف و ترسیم سطوحی که جسم (محیط) روی آن لغزش دارد (شر می‌خورد) و خراب می‌شود - ضرورت می‌یابد. وقتی که شالوده تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، قطعاتی (نواحی) در زمین زیر و اطراف شالوده ایجاد می‌شود و این قطعات روی هم می‌لغزند. الگوی خرابی یادشده که توسط ترزاقی تعریف شده فقط برای شالوده‌های کوچک (منفرد و نواری) صادق است. روابط ظرفیت باربری بر این اساس ارائه شده که نمی‌تواند برای شالوده‌های با ابعاد بزرگ (گسترده) برقرار باشد.

### ۲. تجزیه و تحلیل تغییر شکل‌ها

این نوع تجزیه و تحلیل بسیار پیچیده و مشکل است. در این حالت چگونگی رفتار شالوده روی زمین تحت بار و پارامترهای مؤثر در رفتار لایه‌ها و المان‌های زمین بررسی می‌شود. موضوعی که بسیار مهم است تشخیص و شناسایی تفاوت‌های رفتاری بین لایه‌ها و خاک زیر شالوده در اعماق زمین زیر شالوده است. ستون‌هایی از خاک که دقیقاً در وسط و زیر شالوده قرار دارند با ستون‌هایی از خاک که در کنار شالوده‌اند رفتار متفاوت دارند. بررسی تحلیلی این تغییر رفتار فقط با روش‌های



شکل ۳. منحنی رفتار حلقه‌ها به صورت شماتیک. [۱۹]

کافی از محل قرارگیری شالوده دور است تا اثرات تنش و تغییر شکل‌ها در آن نقاط ناچیز و قابل اغماض باشد. شبکه‌بندی ثابت و مستقل از ابعاد شالوده در محوطه‌ی مطالعه به منظور جلوگیری از اثرات تغییر شبکه‌بندی در تمام مدل‌های با ابعاد مختلف شالوده رعایت شده است. شالوده‌ی بتنی و محیط خاک با المان ۸۲ Plane مدل شده‌اند. این المان به صورت هشت‌گویی و دوبعدی است که در هر گره سه درجه آزادی انتقالی دارد و توانایی در نظر گرفتن رفتار کشسانی - خمیری و تغییر شکل‌های بزرگ را در حالت کرنش مسطح دارد. برای تعریف اندرکنش به صورت سازگاری در مرز مشترک و سطح تماس مصالح متفاوت بین شالوده و زمین، از المان واسطه‌ی (تماسی) دوگویی ۱۲ Contact استفاده شده است. این المان تماسی دوبعدی گره به گره دارای ۳ درجه آزادی انتقالی در هر گره بوده و توانایی شکاف اولیه ۱۲ را دارد. تحمل فشار در راستای محوری و برش اصطکاکی کلمب در راستای مماسی از خصوصیات این المان است. سختی محوری و مماسی زمانی وارد عمل می‌شوند که شکاف اولیه بسته شود. سختی محوری و مماسی براساس سختی سطح تماس تعریف می‌شوند و مقاومت مماسی نیز در حالت اصطکاک کلمب با وارد کردن ضریب اصطکاک سطح تماس در نظر گرفته می‌شود. یادآور می‌شود المان‌بندی در شالوده و خاک زیر آن به صورت کاملاً منظم انجام شده تا برای المان‌های تماسی، گره‌های متناظر در مجاورت هم قرار گیرند. [۱۸]

### ۳. مشخصات مصالح

در این تحقیق مدل رفتاری بتن به صورت کشسان و برای زمین از مدل رفتاری دراگر - پراگر که رفتار ماده را به صورت کشسانی - خمیری در نظر می‌گیرد استفاده شده است. خصوصیات و مشخصات مکانیکی مصالح در جدول ۱ خلاصه شده است. [۱۲]

### ۴. شرایط مرزی و بارگذاری

با توجه به این که مدل هندسی به صورت دوبعدی و در حالت کرنش مسطح تعریف شده است، مرزهای قائم طوری محدود شده‌اند که فقط امکان تغییر مکان در راستای قائم به صورت بدون اصطکاک مقدور است و انتقال افقی وجود ندارد و مرز افقی (کف) طوری محدود شده که فقط امکان انتقال در راستای افقی را داشته باشد. بارگذاری روی شالوده به صورت فشار (تنش) یکنواخت و درگام‌های کوچک بارگذاری انجام شده و نتایج حاصله با هم مقایسه شده‌اند. به منظور تحلیل غیرخطی از روش گام‌به‌گام نیوتن - رافسون کامل استفاده شده و هنگامی که حل در هر زیرگام هم‌گرا می‌شود خروجی‌ها در گره‌ها ذخیره می‌شوند. [۱۳]

## نتایج حاصل از تحلیل در محوطه‌ی مورد مطالعه

### ۱. تنش جانبی (σ<sub>۳</sub>)

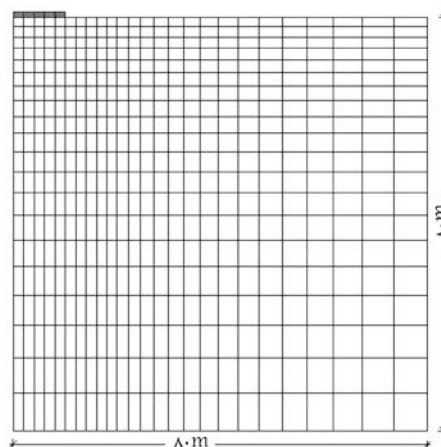
تنش جانبی در زیرشالوده‌های با عرض کوچک بسیار اندک است. در شالوده‌های بزرگ و پهن محدوده‌ی که تنش جانبی بزرگ دارد گسترش می‌یابد پس مقدار بیشتری از مصالح زمین در زیر یک شالوده‌ی بزرگ و پهن به صورت نرم عمل می‌کند (شکل ۵). گسترش محدوده‌ی با تنش جانبی بالا در زیر شالوده باعث تغییر در رفتار و خواص مصالح و شکل الگوی خرابی می‌شود که این موضوع در قسمت‌های بعدی به طور مشخص ارائه خواهد شد. بنابراین انتخاب نوع آزمایش‌ها و مقدار تنش‌های

تغییر شکل‌ها در یک حلقه متمرکز می‌شوند و میزان تغییر شکل در سایر حلقه‌ها کاهش می‌یابد، این پدیده «تمرکز تغییر شکل» نامیده می‌شود. [۱۹]

مشابه این حالت وقتی بار روی شالوده کم باشد، رفتار زمین زیر و اطراف شالوده به صورت همگن و پیوسته است و رابطه‌ی تنش-کرنش برای تمام نقاط محیط مادی یکسان و خطی است. چنانچه بار روی شالوده تا حد باربری خمیری در زمین افزایش داده شود، رفتار زمین زیر و اطراف شالوده به صورت غیرهمگن ولی پیوسته تغییر می‌کند و خواص مصالح تابع مسیر تنش و میزان (سطح) تنش خواهد بود. اگر همچنان بار افزایش داده شود، رفتار زمین زیر و اطراف شالوده غیرهمگن و غیرپیوسته خواهد شد که در این حالت سطوح لغزش برشی در بخش‌هایی از محوطه تشکیل می‌شود. براین اساس محوطه‌ی مورد مطالعه را می‌توان به چندین بخش تجزیه کرد به گونه‌ی که هر بخش رفتارهای متفاوتی داشته باشد. بخش‌هایی از محوطه در حالت باربرداری است که تغییر شکل در آن‌ها به صورت کشسان است، و بخش‌های دیگر دچار شکست و خرابی و تغییر شکل‌های بسیار بزرگ می‌شوند.

### ۲. مدل سازی

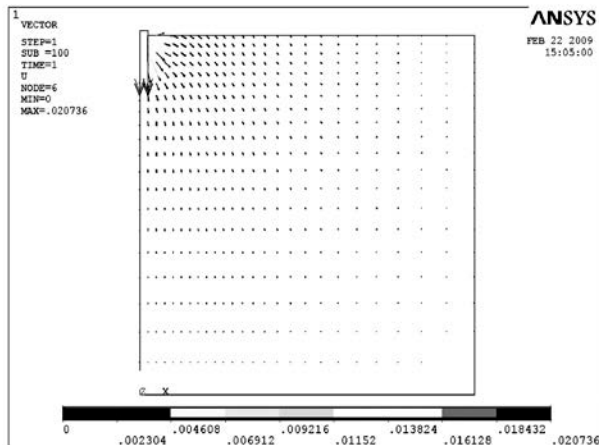
در این تحقیق برای مدل سازی و انجام تحلیل‌های عددی از نرم‌افزار ANSYS نسخه ۸٫۷ استفاده شده است. به منظور ایده‌آل‌سازی هندسی مطابق شکل ۴ با در نظر گرفتن اندرکنش بین شالوده و زمین، محوطه‌ی مطالعه شامل شالوده و بخشی از خاک زیر و اطراف شالوده که در باربری و تغییر شکل (نشست) مؤثر است و به اندازه‌ی کافی بزرگ است (حدود ۴B در طرفین و زیر شالوده‌ی بزرگ) به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده است. [۲۰]



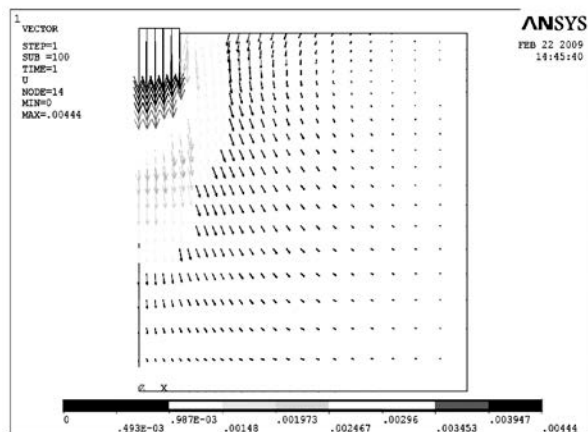
شکل ۴. مدل هندسی و محیط مورد مطالعه.

جدول ۱. خصوصیات مصالح و مشخصات مکانیکی تعریف شده در مدل تحلیلی.

مصالح	E (KPa)	$\nu$	$\varphi$	C (KPa)	$\gamma$ (Kg/m <sup>3</sup> )	ks (KN/m)	kn (KN/m)	$\mu$
زمین (خاک)	۲E۴	۰٫۳	۳۰	۱	۱۷۰۰	-	-	-
بتن	۲E۷	۰٫۱۵	-	-	۲۴۰۰	-	-	-
المان واسطه (مرز مشترک)	-	-	-	-	-	۸E۶	۸E۶	۰٫۷

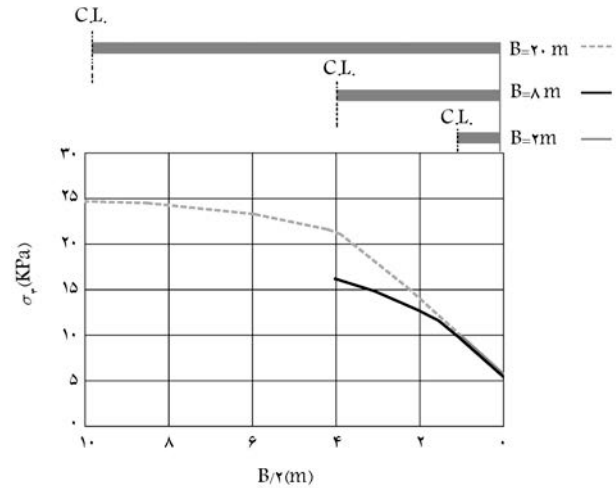


الف) شالوده به عرض ۲ متر



ب) شالوده به عرض ۲۰ متر

شکل ۶. بردارهای تغییر شکل.



شکل ۵. توزیع تنش جانبی ( $\sigma_x$ ) در زمین زیر شالوده.

اولیه و جانبی وارد بر نمونه‌های آزمایشگاهی برای خاک زیر شالوده بزرگ و کوچک با هم متفاوت است و عدم توجه به این موضوع می‌تواند نتایج را با خطا همراه سازد.

## ۲. بردارهای تغییر شکل

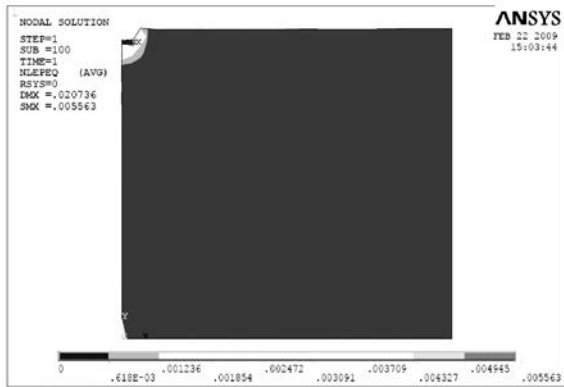
جهت بردارهای جابه‌جایی و تغییر شکل زمین زیر شالوده‌ی کوچک دارای چرخش کلی کاملاً واضح است که نشانه‌ی از وقوع الگوی خرابی عمومی و پیشنهادی ترازقی است در حالی که برای شالوده‌های بزرگ چنین چرخشی ملاحظه نمی‌شود (شکل ۶). در شالوده‌ی بزرگ بردارهای جابه‌جایی عمدتاً قائم و محدود به زیرشالوده‌اند. البته این موضوع در اشکال مربوط به تغییر شکل‌های قائم (شکل ۷) و افقی (شکل ۸) برای شالوده‌های بزرگ و کوچک در محوطه‌ی زمین مورد مطالعه نیز قابل مشاهده است.

## ۳. کرنش برشی خمیری

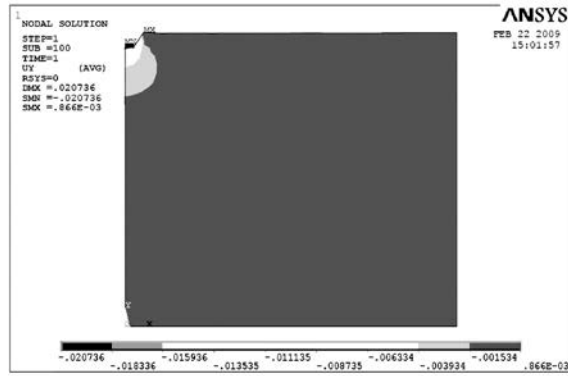
این پارامتر در واقع نشان‌دهنده‌ی باند لغزش و سرخوردن قطعات و ناحیه‌های تشکیل‌شده در زمین زیر و اطراف شالوده است. چنان‌که در شکل ۹ الف مشاهده می‌شود، در شالوده‌های کوچک، کرنش برشی خمیری حداکثر از ناحیه‌ی زمین زیر مرکز شالوده شروع و به سطح زمین در اطراف شالوده ختم می‌شود، یعنی الگوی گسیختگی عمومی است. در عموم کتب مهندسی پی، به این نوع گسیختگی اشاره شده و درباره‌ی آن توضیحاتی ارائه شده است. اما مطابق شکل ۹ ب در شالوده‌ی بزرگ، باند بیشترین کرنش برشی خمیری در حد فاصل زمین زیر شالوده و زمین خارج از زیر شالوده مشاهده می‌شود. در این حالت زمین زیر شالوده به دو بخش مشخص تقسیم می‌شود: بخشی از زمین که در زیر شالوده واقع است و بخش خارج از زیر شالوده که با وقوع کرنش برشی بیشینه در مرز این دو از هم قابل تفکیک می‌شوند. مشاهده‌ی این پدیده حاکی از گسیختگی موضعی و وقوع پدیده‌ی تمرکز

## ۴. تنش هیدرواستاتیک (حجمی)

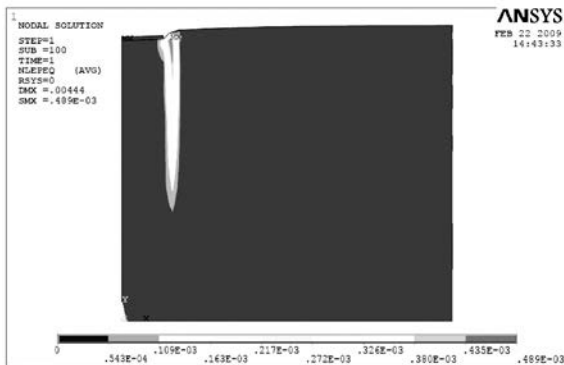
بررسی وضعیت توزیع تنش هیدرواستاتیک (حجمی) در زمین و محوطه‌ی مورد مطالعه‌ی زیر شالوده از جنبه‌های مختلف قابل تأمل و حائز اهمیت است. تمرکز تنش هیدرواستاتیک برای شالوده‌ی بزرگ عمدتاً ناحیه‌ی زیر شالوده و تا عمق زیادی از زمین را در بر دارد، به طوری که ستونی از خاک با قابلیت باربری بالا و تحت تنش جانبی محصورکننده‌ی زیاد تشکیل می‌شود که در حال سخت‌شدن و متراکم‌شدن است. تمرکز تنش در این ناحیه بسیار زیاد است و بخش عمده‌ی باربری توسط این ناحیه ایجاد می‌شود و عملاً خاک اطراف نقش چندانی در باربری ایفا نمی‌کند (شکل ۱۰). در شالوده‌ی کوچک حجم اندکی از زمین تنش هیدرواستاتیک (حجمی) بالا



الف) شالوده به عرض ۲ متر؛

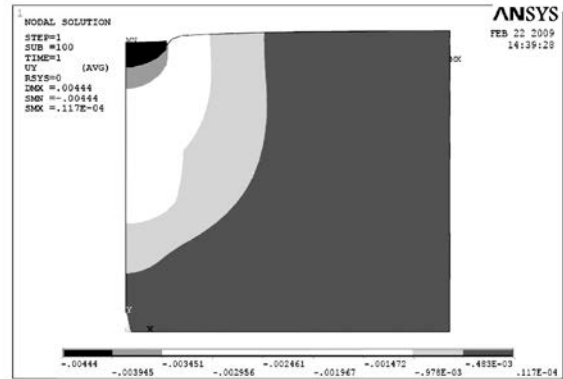


الف) شالوده به عرض ۲ متر؛



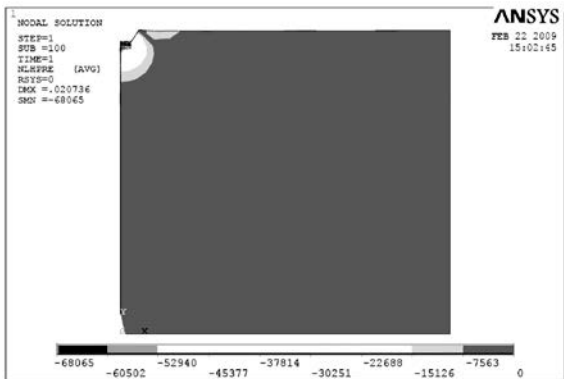
ب) شالوده به عرض ۲۰ متر.

شکل ۹. کانتور کرنش برشی خمیری.

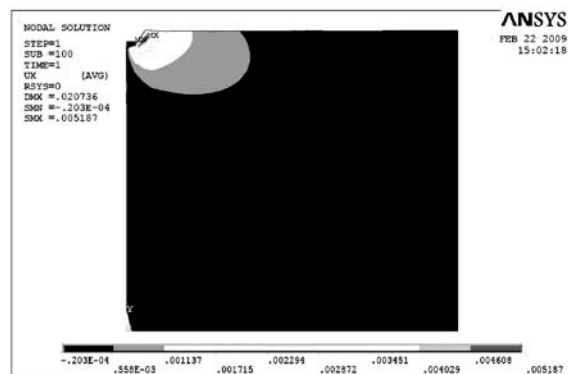


ب) شالوده به عرض ۲۰ متر.

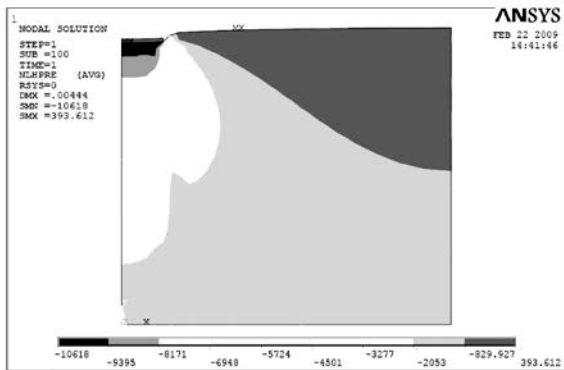
شکل ۷. کانتور تغییر شکل قائم.



الف) شالوده به عرض ۲ متر؛

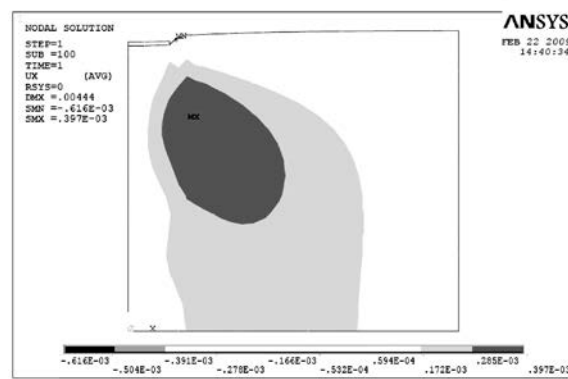


الف) شالوده به عرض ۲ متر؛



ب) شالوده به عرض ۲۰ متر.

شکل ۱۰. کانتور تنش هیدرواستاتیک (حجمی).



ب) شالوده به عرض ۲۰ متر.

شکل ۸. کانتور تغییر شکل افقی.

نیست - شیب متوسط در محدوده‌ی اطراف شالوده (تا فاصله‌ی ۲۰ متری از مرکز شالوده) حدود ۵/۰° قابل اندازه‌گیری است - در حالی که برای شالوده‌یی به عرض ۲۰ متر، این مقدار حدود ۴/۰° برآورد می‌شود. با بزرگ‌تر شدن ابعاد شالوده میزان نشست زیر شالوده نسبت به اطراف آن تفاوت فاحش می‌یابد، به طوری که نشست اطراف در مقایسه با نشست زیر شالوده قابل چشم‌پوشی است و این به مفهوم تمرکز تغییر شکل‌ها است. در این حالت تغییر شکل شالوده تقریباً یکنواخت شده و مستقل از صلیبیت شالوده خواهد بود.

مطابق مدل پیشنهادی در این مقاله (روش حلقه‌های پیوسته‌ی نرم‌شونده) برای پیش‌بینی و تفسیر نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی، وقوع پدیده‌ی تمرکز تغییر شکل منجر به آزادسازی تنش (باربرداری) در بخش‌هایی از محوطه می‌شود. هنگامی که یک شالوده‌ی بزرگ تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، ابتدا رفتار زمین زیر و اطراف شالوده و نیز کل سیستم دچار تغییر شکل می‌شود. با افزایش میزان بارگذاری، ستون خاک زیر شالوده وارد محدوده‌ی رفتار خمیری می‌شود و در نتیجه توان باربری این بخش افزایش می‌یابد که منجر به تمرکز و افزایش تنش در این ناحیه می‌شود، و در نهایت تغییر شکل و نشست بیشتر می‌شود. این در حالی است که رفتار بخش‌های خارج از زیر شالوده (زمین طرفین شالوده) به صورت کشسان و در حال باربرداری است، بنابراین می‌توان استنباط کرد که زمین خارج از زیر شالوده‌ی بزرگ تأثیر چندانی در باربری شالوده ندارد. چنان که اشاره شد، خواص و رفتار زمین زیر شالوده‌ی بزرگ از یک طرف و حجم مؤثر زمین در باربری با شالوده‌ی کوچک متفاوت است، یعنی ماتریس سختی سیستم نیز باید تغییر کند که این تغییر به صورت توأم است، و متأسفانه این موضوع تاکنون در تحلیل مسائل دیده نشده است. به بیان ساده‌تر خواص و پارامترهای رفتاری زمین واقع در زیر شالوده‌ی بزرگ با زمین زیر شالوده کوچک متفاوت است حتی اگر جنس و نوع زمین یکسان باشد، پس باید آزمایش‌های تعیین خواص و پارامترهای رفتاری زمین متناسب با شرایط واقعی طراحی و انجام شود.

### نتیجه‌گیری

وقوع پدیده‌ی تمرکز تغییر شکل‌ها در مرز مشترک بین زمین اطراف شالوده و ستون خاک زیر شالوده‌ی بزرگ، و نیز تفاوت الگوی خرابی در این شالوده‌ها با الگوهای خرابی متداول که برای شالوده‌های کوچک توسط ترقاقی و دیگران پیشنهاد شده است، از جمله دستاوردهای مهم این تحقیق است. توجه به تغییرات ایجادشده در محوطه‌ی زیر شالوده در ارتباط با بخش‌های دارای رفتار سخت‌شونده، بخش‌های دارای رفتار نرم‌شونده و اندرکنش‌ها سه رکن اصلی بدنه‌ی ماتریس سختی را تشکیل می‌دهند. حاصل این تحقیق فهم و تحلیل این ماتریس سختی و ارکان آن است. در این ارتباط توجه به تغییر ماهیت و تفاوت رفتاری زمین وقتی که زیر شالوده‌ی کوچک یا بزرگ قرار می‌گیرد، پیش‌بینی و انجام آزمایش‌های مناسب در شناسایی زمین و نهایتاً انتخاب شیوه‌ی مناسب بهسازی برای زمین زیر شالوده با توجه به ابعاد آن از اهمیت ویژه‌ی برخوردار می‌شود. ضمناً موضوع کنترل نشست با توجه به افزایش عمق نفوذ تنش در شالوده‌های بزرگ در مقایسه با شالوده‌های کوچک از اهمیت بیشتری برخوردار است. البته باید توجه داشت که مسئله باید به صورت سه‌بعدی برای تحلیل عددی مدل‌سازی و بررسی شود. پیشنهاد می‌شود برای ادامه‌ی کار، مدل‌سازی در مقیاس آزمایشگاهی و عملی به منظور تعیین تغییرات در پارامترهای اشاره شده انجام شود که این موضوع مستلزم صرف هزینه و زمان خواهد بود.

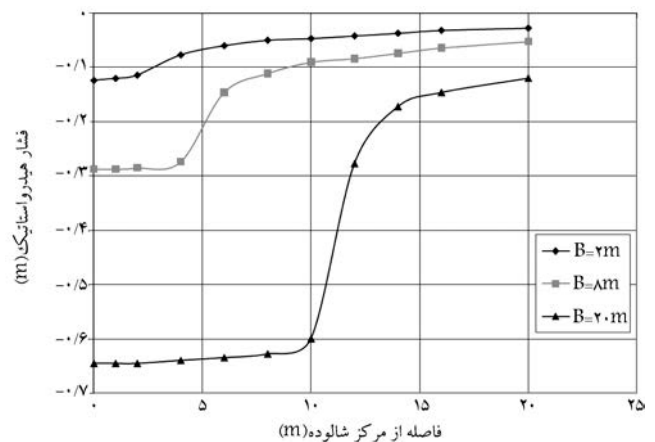
دارد. این بخش عموماً شامل ناحیه‌ی کوچکی از زمین زیر و اطراف شالوده می‌شود که همانند گوه‌یی صلب روی مابقی زمین می‌لغزد.

### تحلیل نتایج با توجه به مدل پیشنهادی

در شالوده‌های کوچک، زمین زیر و اطراف شالوده هر دو با هم دچار تغییر شکل گسترده (خرابی) می‌شوند. این امر با بررسی وضعیت تنش‌ها و کرنش‌های برشی خمیری در زمین زیر و اطراف شالوده‌ی کوچک کاملاً ملموس است که با نظریه و الگوی خرابی ترقاقی به خوبی هماهنگی دارد. بخشی که تنش‌ها و کرنش‌های بزرگ در آن قابل ملاحظه است، حجم کوچکی از زمین زیر شالوده را تشکیل می‌دهد. اما در شالوده‌های بزرگ، تغییر شکل‌های زمین عمدتاً محدود به زمین زیر شالوده می‌شود، اگرچه عمق نفوذ تنش و کرنش‌ها افزایش قابل ملاحظه‌یی دارد. در واقع بین زمین زیر شالوده و اطراف آن یک سطح لغزش ایجاد می‌شود. این نوع الگوی خرابی با الگوی خرابی ارائه‌شده توسط ترقاقی برای شالوده‌های کوچک (منفرد و نواری) متفاوت است. بنابراین روابط ظرفیت باربری موجود که با توجه به آنالیز حد (الگوی خرابی ترقاقی) به دست آمده‌اند، برای شالوده‌های بزرگ نمی‌توانند معتبر باشند.

مطابق نتایج حاصل از تحلیل، الگوی خرابی در خاک زیر شالوده‌ی بزرگ به صورت درونی است (ستونی از خاک زیر شالوده دچار خرابی می‌شود) و لذا تورم و حرکت خاک در اطراف شالوده مشاهده نمی‌شود. این الگوی خرابی با آنچه که ترقاقی برای شالوده‌های کوچک (عرض محدود) روی خاک‌های با تراکم متوسط و زیاد ارائه کرده متفاوت است. افزایش فشار جانبی (محصورکننده) در زمین زیر شالوده باعث تغییر خواص رفتاری زمین از حالت ترد به حالت نرم و خمیری سخت‌شونده می‌شود، و افزایش باربری فشاری در این ناحیه در مقایسه با نواحی خارج از زیر شالوده باعث می‌شود تا ستونی از خاک بسیار مقاوم (با تنش محصورکننده‌ی زیاد) در زیر شالوده تشکیل شود.

از سوی دیگر عمق تأثیر تنش فشاری در زیر شالوده افزایش می‌یابد و باعث تغییر حجم مؤثر زمین در باربری و نشست می‌شود، و بنابراین نشست بزرگ‌تر توجیه‌پذیر و قابل انتظار است. این در حالی است که مطابق الگوی خرابی متداول، تنش در خاک زیر و اطراف شالوده توزیع می‌شود و لذا عمق نفوذ تنش کاهش می‌یابد (تشکیل حباب‌های تنش) که این موضوع در کاهش نشست شالوده‌ی کوچک تحت بارگذاری یکنواخت بسیار حائز اهمیت است. چنان که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تفاوت نشست در زمین زیر و اطراف شالوده با ابعاد کوچک (عرض ۲ متر) خیلی قابل توجه



شکل ۱۱. منحنی نشست (تغییر شکل قائم) در خاک زیر شالوده.

## پانوشت

1. localization
2. coupled
3. Terzaghi
4. Meyerhof
5. Hansen
6. stress level
7. size effect
8. compatibility equations contact
9. interface element
10. contact slide & large deformation
11. uncontained behavior
12. initial gap

## منابع

1. Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. McGraw- Hill, New York, p. 1175 (1996).
2. Nagtegaal, J.C.; Parks, D.M. and Rice, J.R. "On numerically accurate finite element solutions in the fully plastic range", *Computational Methods in Applied Mechanics Engineering*, **4**, pp. 113-135 (1974).
3. Toh, C.T. and Sloan, S.W. "Finite element analysis of isotropic and anisotropic soils with a view to correctly predicting impending collapse", *Int. J. Analytical Methods in Geomechanics*, **4**, pp. 1-2 (1980).
4. Sloan, S.W. and Randolph, M.F. "Numerical prediction of collapse loads using finite element methods", *Int. J. Num. & Analy. Methods in Geomech.*, **6**, pp. 47-76 (1974).
5. Katsutoshi, Ueno et. al. "Prediction of ultimate bearing capacity of surface footings with regard to size effect", *Soils and Foundations*, **38**(3), pp. 165-178 (1998).
6. Katsutoshi Ueno et.al. "Reappraisal of size effect of bearing capacity from plastic solution", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 275-281 (March 2001).
7. Fanyu, Zhu et.al. "Scale effect of strip and circular footings resting on dense sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 613-621 (July 2001).
8. Junhwan, Lee et.al. "Bearing capacity of circular footings under surcharge using state-dependent finite element analysis", *Computers and Geotechnics*, **32**, pp. 445-457 (2005).
9. Zienkiewicz, O.C., *The Finite Element Method in the 1990's*, first edition, October 1991, with Occasion of his 70th Birthday, edited By: E. Onate, J. Periaux, A. Samuelsson (1991).
10. Amirshahkarami, S.A., *Soil-Structure Interaction Note*, Lecture in Department of Civil Engineering, Tehran Polytechnic University (1978-2007).
11. ANSYS. *Structural Nonlinearities Manual*, Swanson Analysis System, Houston, PA (1995).
12. Khazaie, J. and Amirshahkarami, A. "Mat foundations size effect in soil density behavior regard to the elasto-plastic models (Shahkarami Model)", *Proceeding of the 3th Iranian Rock Mechanics Conference*, Amir-kabir University, Tehran, Iran (Octobers 2007).
13. Amirshahkarami, A.; Khazaie, J.; Mehdiabadi, M. and Nomeiri, M. "Numerical analysis interaction of falakolafak's castle & foundation improvement", *Proceeding of the 3th Iranian Rock Mechanics Conference*, Amir kabir University, Tehran, Iran (Octobers 2007).

Archive