



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۹۱ تا ۱۰۰  
Vol. 46, No. 2, Winter 2014, pp. 91- 100



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## اثر فاصله‌داری درزها بر ظرفیت باربری استاتیکی پی‌های سنگی در حالت گسیختگی سوراخ شونده

سید میثم ایمانی<sup>۱\*</sup>، احمد فهیمی‌فر<sup>۲</sup>، مصطفی شریف‌زاده<sup>۳</sup>

۱- دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت ۱۳۹۱/۱/۱۹، پذیرش ۱۳۹۳/۸/۲۷)

### چکیده

در تحقیق حاضر، روش تعیین ظرفیت باربری استاتیکی توده‌سنگ‌ها در حالت گسیختگی سوراخ شونده بررسی شده است. ظرفیت باربری برای توده‌سنگ درز‌داری حاوی یک، دو و سه دسته‌درز و به روش اجزاء مجزا تعیین شده است. همچنین با انجام تحلیل‌های گسترده، اثر فاصله‌داری درزها بر ظرفیت باربری با استفاده از عامل بی‌بعدی به نام «نسبت فاصله‌داری» بررسی شده است. بدین منظور، محدوده وسیعی از فاصله‌داری‌های مختلف برای درزها در نظر گرفته شده و تغییر ظرفیت باربری به‌ازای تغییرات فاصله‌داری ثبت شده است. با انجام این کار، مقداری از فاصله‌داری که به ازای آن وجود درزها اثر ناچیزی بر کاهش ظرفیت باربری دارد، تعیین شده است. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که به ازای نسبت فاصله‌داری کوچکتر از ۳۰، کاهش فاصله‌داری سبب کاهش ظرفیت باربری می‌شود، حال آنکه در محدوده نسبت فاصله‌داری بزرگتر از ۳۰، کاهش فاصله‌داری اثر چندانی بر ظرفیت باربری نخواهد داشت. این معیار مرز بین لزوم تحلیل مساله ظرفیت باربری به‌صورت محیط ناپیوسته با حضور درزها یا محیط پیوسته با خصوصیات معادل را مشخص می‌نماید که استفاده از آن در مسائل مربوط به پی‌های سنگی سبب کاهش قابل توجهی در زمان و هزینه تحلیل خواهد شد.

### کلمات کلیدی

ظرفیت باربری، پی سنگی، گسیختگی سوراخ شونده، فاصله‌داری، رویکرد مستقیم، رویکرد محیط معادل، اجزاء مجزا.

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: imani@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

استفاده (مستقیم یا محیط معادل) اهمیت دارد. در مسائل مرتبط با مهندسی تونل، معیارهای مختلفی توسط محققین ارائه شده است [۴]، [۹]، [۱۰] و [۱۹]. اما در مورد پی‌های سنگی توصیه‌های کمی وجود دارد که از جمله مهمترین موارد می‌توان به توصیه سرانو و اولالا [۱۵] اشاره نمود. آن‌ها با تعریف عامل بی‌بعدی تحت عنوان «نسبت فاصله‌داری» (SR)، پیشنهاد نمودند که به ازای  $SR > 60$ ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها کوچک بوده، می‌توان پی سنگی درزدار را به صورت محیطی پیوسته با خصوصیات معادل در نظر گرفت. مقدار SR از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$SR = B \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i} \quad (1)$$

که در آن،  $B$  عرض شالوده،  $S_i$  فاصله‌داری درزهای دسته  $i$  ام و  $n$  تعداد دسته‌درزها است. گفتنی است که سرانو و اولالا [۱۵] بیان کرده‌اند که معیار ارائه شده بسیار محافظه‌کارانه بوده و باید با تحلیل‌های کامل‌تر عددی تدقیق شود. همچنین در مرجع [۲] نیز بر استفاده از تحلیل‌های عددی برای تعیین محدوده مناسبی برای استفاده از رویکرد محیط معادل در توده‌سنگ‌ها تاکید شده است.

با توجه به نبود روشی مناسب برای تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ‌ها در حالت گسیختگی سوراخ شونده، در تحقیق حاضر از روش عددی اجزاء مجزا برای این منظور استفاده شده است. در این راستا، نرم‌افزار UDEC [۸] که بر مبنای این روش است، برای تحلیل تنش- تغییرمکان توده‌سنگ و رسم منحنی بار-نشست پی سنگی بکار گرفته شده است. برای رسم این منحنی، از روش اعمال تغییرمکان استفاده شده است. بدین منظور، برنامه‌ای با استفاده از زبان برنامه‌نویسی مختص این نرم‌افزار نوشته شده است که قابلیت رسم منحنی مربوطه را دارد. ظرفیت باربری نهایی با استفاده از این منحنی بدست آمده است.

با توجه به تقریب زیاد موجود در مقدار SR ارائه شده در مرجع [۱۵] به عنوان مرز بین فاصله‌داری‌های کوچک و بزرگ و لزوم ارائه محدوده دقیق‌تری برای آن، در بخش دیگری از تحقیق حاضر، اثر فاصله‌داری درزها بر ظرفیت باربری نهایی توده‌سنگ-هایی با یک، دو و سه دسته‌درز در حالت گسیختگی سوراخ شونده با استفاده از روش اجزاء مجزا بررسی شده است. در هر مورد، محدوده وسیعی برای عامل SR در نظر گرفته شده است. مقداری از SR که به ازای آن تغییرات ظرفیت باربری ناچیز می‌شود، به عنوان مرز جدایی محدوده استفاده از رویکردهای مستقیم و معادل در تحلیل پی‌های سنگی پیشنهاد شده است. همچنین اثر تغییرات عوامل اثرگذار بر ظرفیت باربری روی نتایج بدست آمده نیز با انجام تحلیل حساسیت بررسی شده است. با

سازه‌های بزرگی مانند سدها و پل‌های بزرگراه و راه‌آهن به طور معمول بر روی بسترهای سنگی ساخته می‌شوند. برای تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ‌های درزدار دو روش کلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش اول که با عنوان رویکرد مستقیم شناخته می‌شود، توده‌سنگ به صورت ترکیبی از سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها در نظر گرفته می‌شود. استفاده از این روش در مسائل مهندسی که به طور معمول با محیط‌های سنگی بزرگ و به شدت ناپیوسته سروکار دارند، بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است. در روش دوم که تحت عنوان رویکرد محیط معادل نامیده می‌شود، معادله رفتاری توده‌سنگ درزدار به صورت یک محیط همگن‌سازی شده معادل در نظر گرفته می‌شود. در این حالت محیط ناپیوسته اولیه با یک محیط پیوسته معادل جایگزین می‌شود که در نتیجه صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و هزینه تحلیل‌ها می‌شود. استفاده از این رویکرد ملزومات خاصی دارد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، کوچک بودن فاصله‌داری درزها در مقایسه با ابعاد کلی سازه واقع بر آن است.

روابط موجود برای تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ‌ها، بیشتر با فرض کوچک بودن فاصله‌داری درزها [۱۱]، [۱۲]، [۱۴]، [۱۶] - [۱۸]، [۲۰] و [۲۱] و در موارد کمی نیز با فرض بزرگ بودن فاصله‌داری درزها نسبت به ابعاد شالوده واقع بر آن ارائه شده‌اند [۶] و [۱۳]. نکته با اهمیت آن است که همه این روش‌ها فقط زمانی قابل استفاده هستند که گسیختگی پی سنگی از نوع برشی کلی باشد و در صورتی که امکان گسیختگی سوراخ شونده وجود داشته باشد، این روش‌ها دقت مناسبی ندارند. بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که بر خلاف بسترهای خاکی، ظرفیت باربری بسترهای سنگی درزدار در حالت گسیختگی سوراخ شونده تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. از آنجایی که در حالت گسیختگی سوراخ شونده تغییرشکل‌های زیادی در بستر ایجاد می‌شود، بنابراین به طور معمول ظرفیت باربری با توجه به مقدار تغییرشکل‌های ایجاد شده تعیین می‌شود که از این نکته در مورد بسترهای خاکی استفاده شده است. بنابراین در این حالت، روشی برای تعیین ظرفیت باربری مناسب خواهد بود که توانایی تعیین تغییرشکل‌ها را داشته باشد. در این راستا، روش-های عددی که توانایی تحلیل تنش- تغییرمکان و امکان در نظر گرفتن رفتارهای مختلف را دارند، ابزار مناسبی برای این منظور فراهم می‌نمایند. البته در مورد استفاده از روش‌های عددی باید توجه داشت که در توده‌سنگ‌های درزدار، با کاهش فاصله‌داری درزها و افزایش شکستگی توده‌سنگ، زمان مورد نیاز برای تحلیل مسائل با استفاده از رویکرد مستقیم بطور چشمگیری افزایش می‌یابد. بنابراین وجود معیاری برای تعیین نوع رویکرد مورد

رخ می‌دهد. در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های تعیین ظرفیت باربری که بر مبنای گسیختگی برشی کلی استوار هستند، دقت کافی ندارند.

روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری در حالت گسیختگی برشی کلی، بیش‌تر بر مبنای روش‌های تعادل حدی و تحلیل حدی استوار هستند. اما در حالت وقوع گسیختگی سوراخ شونده، به دلیل وابستگی ظرفیت باربری به تغییرشکل‌ها، تحلیل تغییرشکل‌ها برای محاسبه ظرفیت باربری لازم است. بدین منظور می‌توان از روش‌های عددی که در قالب نرم‌افزارهای مختلف ارائه شده‌اند، استفاده نمود.

برای تعیین ظرفیت باربری با استفاده از نرم‌افزارها، رسم منحنی بار-نشست برای بستر سنگی لازم است. انتخاب یک مقدار ثابت از این منحنی، به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی دشوار است. چهار روش عمده برای تعیین ظرفیت باربری با استفاده از منحنی بار-نشست وجود دارد که عبارتند از: روش‌های  $0.1B$ ، تقاطع مماسی، لگاریتمی و هیپربولیک. سه روش آخر زمانی استفاده می‌شوند که منحنی بار-نشست دارای تغییرات ناگهانی نشست به ازای مقدار مشخصی از تنش باشد. در حالت گسیختگی سوراخ شونده امکان استفاده از این سه روش وجود ندارد، چون منحنی بار-نشست به طور تقریب به‌صورت خطی است. در این حالت، می‌توان از روش  $0.1B$  برای تعیین ظرفیت باربری استفاده کرد. در این روش، تنش که سبب ایجاد نشست معادل ۱۰ درصد عرض شالوده شود، به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی انتخاب می‌شود [۳]. طبق بررسی‌های انجام شده، استفاده از این روش در تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی مناسب است [۷] و [۱۰].

### ۳- مدل‌سازی عددی

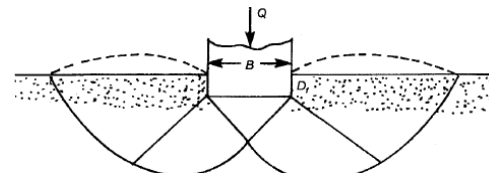
در تحقیق حاضر، از نرم‌افزار UDEC که بر مبنای روش اجزاء مجزا استوار است، استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل توده‌سنگ‌های درزدار با تعداد و فاصله‌داری‌های دلخواه برای درزها را دارد. بنابراین با استفاده از آن می‌توان درزهایی با فاصله‌داری بسیار بزرگ تا بسیار کوچک نسبت به ابعاد شالوده را مدل کرد. در این روش، محیط ناپیوسته توده‌سنگ به‌صورت بلوک‌های در کنار هم چیده شده در نظر گرفته می‌شود که از راه تماس با یکدیگر در محل درزها اندرکنش دارند.

در مدل‌های عددی ساخته شده، توده‌سنگی با یک، دو و سه دسته‌درز در نظر گرفته شده است. در حالت وجود دو دسته‌درز، دسته‌درزها عمود بر هم در نظر گرفته شده است. توده‌سنگ حاوی سه دسته‌درز مشابه حالت دو دسته‌درز بوده، با این تفاوت که دسته‌درز سوم در جهت قائم در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده

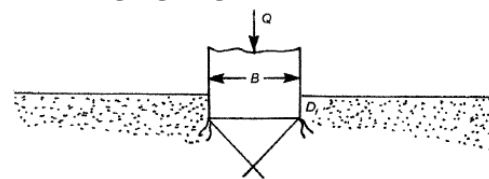
فرض نواری بودن شالوده و تداوم درزها در بعد سوم، مدل‌سازی به‌صورت دوبعدی انجام شده است.

### ۲- مبانی تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ‌ها

اولین گام در انتخاب روش مناسب برای تعیین ظرفیت باربری، تعیین نحوه ایجاد خرابی در بستر سنگی با وجود اثر بار شالوده است. در بسترهای سنگی تحت بار شالوده‌های نواری، دو نوع خرابی اصلی ممکن است ایجاد شود که شامل گسیختگی برشی کلی و گسیختگی سوراخ‌شونده (سنه‌ای، گسیختگی ناشی از تغییرشکل‌های زیاد) است. در گسیختگی برشی کلی، یک جریان خرابی از زیر شالوده آغاز شده، به اطراف توسعه یافته و در پایان به سطح زمین می‌رسد. در این حالت، توده‌سنگ اطراف شالوده دچار بالادگی خواهد شد. اگر منحنی بار شالوده-نشست برای چنین حالتی رسم شود، به ازای سطح مشخصی از تنش، تغییر ناگهانی در میزان نشست دیده می‌شود. در گسیختگی سوراخ‌شونده، گسیختگی فقط در سنگ زیر شالوده ایجاد می‌شود و توده‌سنگ اطراف شالوده چندان تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. در این حالت، تغییر مکان‌های بزرگی در زیر شالوده اتفاق می‌افتد. منحنی بار شالوده-نشست برای چنین حالتی به‌طور معمول یک خط صاف یا خطی با انحنای ناچیز است که تغییر ناگهانی در مقدار نشست آن دیده نمی‌شود. در شکل (۱) نمونه‌ای از نحوه توسعه سطوح گسیختگی در دو حالت مورد بحث نشان داده شده است.



گسیختگی برشی کلی



گسیختگی سوراخ شونده

شکل (۱): نحوه توسعه سطوح گسیختگی در زیر شالوده نواری گسیختگی سوراخ‌شونده در خاک‌ها نیز ایجاد می‌شود که به‌طور معمول خاک‌های سست با تراکم‌پذیری بالا، مستعد وقوع آن هستند. اما طبق توصیه استاندارد اروپا [۵]، یکی از موارد رخداد این گسیختگی در سنگ‌ها زمانی است که مقاومت توده‌سنگ بالا باشد. در چنین حالتی، باربری سنگ با افزایش بار شالوده افزایش می‌یابد اما هیچ جریان برشی به سمت سطح زمین در توده‌سنگ ایجاد نمی‌شود. همچنین تغییر مکان‌های بزرگی در زیر شالوده

استفاده شده است. مقدار سرعت اعمالی به مدل نیز برابر  $0.01/0$  متر بر ثانیه انتخاب شد. این مقدار، با انجام تحلیل حساسیت بر روی مقادیر مختلف سرعت به گونه‌ای انتخاب شده که علاوه بر نیاز نبودن به تلاش محاسباتی زیاد، امکان همگرا شدن جوابهای مساله وجود داشته باشد. برای رسم منحنی بار-نشست، از زبان برنامه‌نویسی مختص نرم‌افزار UDEC موسوم به FISH استفاده شده است. ساختار کلی مورد استفاده، برای محیط‌های پیوسته (نظیر خاک) در راهنمای نرم‌افزار موجود است که در تحقیق حاضر با اعمال تغییراتی در آن، این برنامه برای محیط‌های ناپیوسته (نظیر سنگ‌های درزدار) نوشته شده است. ساختار برنامه مورد بحث بدین صورت بوده که بار شالوده را به صورت مجموع نیروی عکس‌العمل قائم ناشی از تغییرمکان اعمالی در نقاط زیر شالوده بدست می‌آورد. به عبارت دیگر:

$$Q = \sum R \quad (2)$$

که در آن،  $Q$  بار شالوده و  $R$  نیروی عکس‌العمل قائم هر کدام از نقاط زیر شالوده است. به ازای هر مقداری برای تغییرمکان اعمال شده،  $Q$  متناظر با آن از رابطه (2) تعیین شده که محور قائم منحنی بار-نشست را تشکیل می‌دهد. محور افقی نیز از تغییرمکان‌های مختلف اعمالی تشکیل می‌شود.

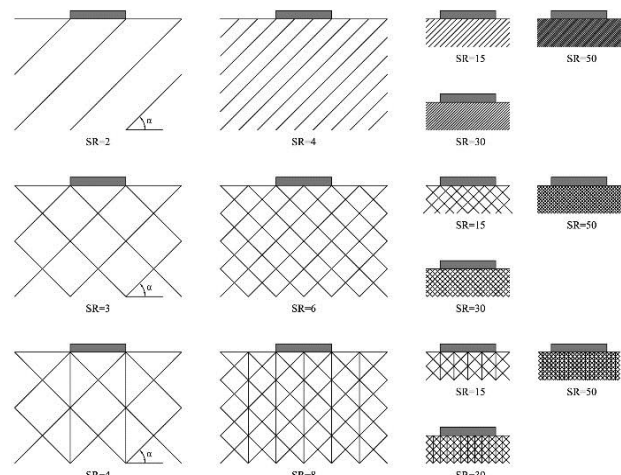
#### ۴- بحث و بررسی نتایج

##### ۴-۱- مقایسه با سایر روش‌ها

بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که تاکنون روشی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی در حالت گسیختگی سوراخ شونده ارائه نشده است و روش‌های موجود اغلب بر پایه گسیختگی برشی کلی استوارند. بنابراین برای کنترل درستی عملکرد نرم‌افزار و مراحل مدلسازی، ظرفیت باربری در حالت گسیختگی برشی کلی مورد مقایسه با روش‌های موجود قرار گرفته است. بدین منظور، خصوصیات توده‌سنگ بگونه‌ای فرض شده است که گسیختگی ایجاد شده از نوع برشی کلی باشد. خصوصیات در نظر گرفته شده عبارتند از: زاویه اصطکاک داخلی سنگ بکر برابر  $\phi_i = 35^\circ$ ، چسبندگی سنگ بکر برابر  $kPa$ ،  $c_i = 500$ ، زاویه اصطکاک داخلی درزها برابر  $\phi_z = 35^\circ$ ، چسبندگی درزها برابر  $c_z = 50 kPa$ ، سختی عمودی درزها برابر  $k_s = 50 GPa/m$  و سختی برشی درزها برابر  $k_b = 50 GPa/m$  ملاک تشخیص ایجاد گسیختگی برشی کلی، رسیدن سطوح لغزش به سطح زمین و تغییر ناگهانی مقدار نشست به ازای تنش مشخصی از شالوده است. در چنین حالتی، ظرفیت باربری را می‌توان با استفاده از منحنی بار-نشست و به کمک روشهایی که پیشتر ذکر شد، تعیین کرد. البته در این حالت الزامی به استفاده از روش  $B/10$  نبوده و از سایر روشها نیز می‌توان برای تعیین

از عامل SR، فاصله‌داری‌های مختلف برای درزها در نظر گرفته شده است. در تحلیل‌های انجام شده، دامنه وسیعی از SR در محدوده تقریبی 3 تا 50 در نظر گرفته شده است. نمایی از برخی از مدل‌های ساخته شده در شکل (2) نشان داده شده است.

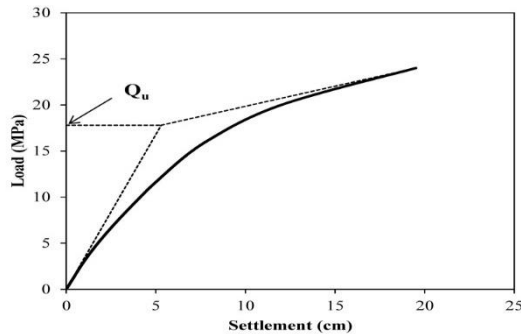
در مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار، برای به حداقل رساندن اثر مرزهای مدل بر نتایج بدست آمده، محدوده مدل از هر طرف حداقل به اندازه 7 برابر عرض شالوده در نظر گرفته شده است که چنین محدوده‌ای، سبب می‌شود اثر مرزهای مدل بر ظرفیت باربری ناچیز شود. بار شالوده به صورت گسترده در محدوده‌ای به عرض 1 متر در وسط مرز بالایی اعمال شده است. برای مرزهای طرفین مدل‌ها، جابجایی در راستای افقی و برای مرز کف مدل‌ها، جابجایی در راستای قائم برابر صفر در نظر گرفته شده است. بلوک‌های سنگی ایجاد شده در اثر تقاطع درزها نیز به صورت بلوک‌های شکل‌پذیر و مدل رفتاری مورد استفاده برای سنگ بکر و درزها از نوع مور کولمب در نظر گرفته شده است.



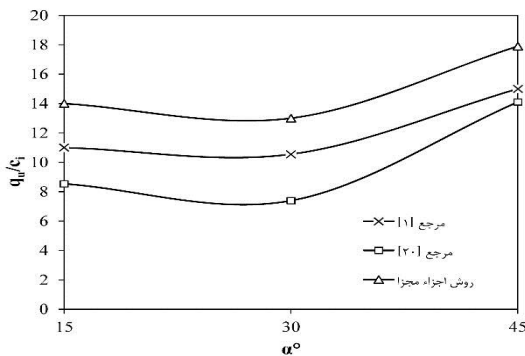
شکل (2): شماتیکی از برخی از مدل‌ها با فاصله‌داری‌های مختلف

مراحل تحلیل مدل‌ها به این صورت بوده که پس از تعریف هندسه مدل و اختصاص دادن خصوصیات مناسب برای مصالح، شرایط مرزی مورد نظر تعریف شده و مدل تا رسیدن به تعادل اولیه (شرایط برجا) اجرا شده است. سپس تغییرمکان‌های ایجاد شده ناشی از تعادل اولیه صفر شده است. بعد از آن باید منحنی بار-نشست رسم شود. برای این کار، دو روش کلی وجود دارد که شامل روش اعمال بار و روش اعمال تغییرمکان است. در روش اعمال بار، به ازای مقادیر مختلف بارگذاری شالوده، نشست‌ها خوانده شده و منحنی مربوطه رسم می‌شود. در روش اعمال تغییرمکان، در محل شالوده سرعت افزایشی اعمال می‌شود و بار معادل آن به ازای هر مقدار تغییرمکان ناشی از سرعت اعمالی ثبت می‌شود. در پایان، با استفاده از اطلاعات بدست آمده می‌توان نمودار بار-نشست را رسم کرد. در این تحقیق از روش دوم،

مقداری اختلاف با دو روش دیگر می‌شود، چون روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری از منحنی بار-نشست، روش‌هایی تقریبی هستند. در تحقیق حاضر از بین این چهار روش، متداول-ترین روش که به طور معمول در عمل کاربرد دارد، مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۳): منحنی بار-نشست برای حالت  $\alpha=45^\circ$  و نحوه تعیین ظرفیت باربری به روش لگاریتمی



شکل (۴): مقایسه نسبت  $q_u/c_i$  به روش‌های مختلف

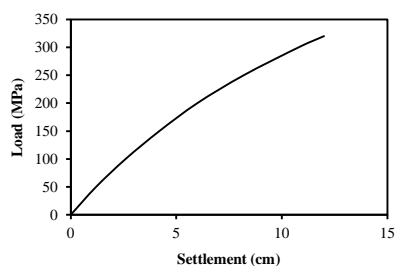
#### ۴-۲- تغییرات ظرفیت باربری نسبت به SR

با بررسی تغییرات ظرفیت باربری نسبت به SR در مدل‌های عددی ساخته شده، اثر فاصله‌داری درزها بر ظرفیت باربری بررسی شده است. با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر فاصله‌داری درزها بر ظرفیت باربری در حالت گسیختگی سوراخ شونده است، در این قسمت خصوصیات توده-سنگ بگونه‌ای فرض شده است که گسیختگی سوراخ شونده در سنگ بستر ایجاد شود. این خصوصیات عبارتند از: زاویه اصطکاک داخلی سنگ بکر برابر  $\phi_i = 35^\circ$ ، چسبندگی سنگ بکر برابر  $c_i = 20 \text{ MPa}$ ، زاویه اصطکاک داخلی درزها برابر  $35^\circ$ ، چسبندگی درزها برابر  $c_j = 2 \text{ MPa}$  و سختی‌های نرمال و برشی درزها برابر  $k_n = k_s = 100 \text{ GPa/m}$  برای تشخیص وقوع گسیختگی سوراخ شونده، منحنی بار-نشست و بردارهای جابجایی توده‌سنگ بستر مورد توجه قرار گرفته است. همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، در حالت وقوع گسیختگی سوراخ شونده، منحنی بار-نشست تقریباً خطی بوده و هیچ جریان گسیختگی برشی به طرفین شالوده ایجاد نمی‌شود، بلکه سطوح

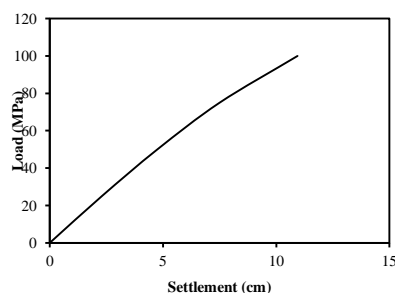
ظرفیت باربری استفاده کرد. از بین روش‌های ذکر شده، روش لگاریتمی در عمل کاربرد بیشتری دارد و در تحقیق حاضر از آن استفاده شده است. در این روش، از دو انتهای منحنی بار-نشست دو خط مماس خارج می‌شود که تنش متناظر با محل تقاطع این دو خط، بیانگر ظرفیت باربری نهایی خواهد بود.

ظرفیت باربری بدست آمده از روش اجزاء مجزا در حالت گسیختگی برشی کلی، با مقادیر بدست آمده از روش اجزاء محدود ارائه شده توسط آل حسین و همکاران [۱] و روش مرز پایین تحلیل حدی ارائه شده توسط ساتکلایف و همکاران [۲۰] مقایسه شده است. با توجه به اینکه در دو روش ذکر شده، توده-سنگی همگن و ناهمسان با دو دسته‌درز و با فاصله‌داری بسیار کوچک برای درزها در نظر گرفته شده است، لذا نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی مربوط به حالت وجود دو دسته‌درز با کم‌ترین مقدار فاصله‌داری درزها ( $SR=50$ ) برای مقایسه انتخاب شده‌اند. در شکل (۳)، منحنی بار-نشست بدست آمده از روش اجزاء مجزا برای حالت  $\alpha=45^\circ$  نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، به ازای سطح مشخصی از بار شالوده، نشست بستر بطور ناگهانی تغییر نموده است. همچنین بررسی بردارهای جابجایی ایجاد شده در زیر شالوده، بیانگر رسیدن سطوح لغزش به سطح زمین است. با رسم دو خط مماس بر ابتدا و انتهای منحنی شکل (۳)، ظرفیت باربری نهایی ( $q_u$ ) به طور تقریب برابر  $17/9$  مگاپاسکال بدست می‌آید. با استفاده از همین روند، ظرفیت باربری برای حالت‌های  $\alpha=15^\circ$  و  $\alpha=30^\circ$  نیز بدست آمده است. در پایان، مقایسه نسبت بی‌بعد  $q_u/c_i$  بدست آمده از روش-های مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. طبق این شکل، روند تغییرات نسبت  $q_u/c_i$  بدست آمده از همه روش‌ها تقریباً مشابه، ولی مقدار بدست آمده از روش اجزاء مجزا بیشتر از سایر روش‌ها است. از عوامل اصلی این اختلاف می‌توان به نحوه در نظر گرفتن درزها در سه روش مورد بررسی اشاره کرد. همان‌طور که گفته شد، در روش اجزاء مجزا، درزها بطور مستقیم در مدل‌های عددی در نظر گرفته می‌شوند، حال آنکه دو روش دیگر بر مبنای همگن‌سازی توده‌سنگ درزدار (جایگزین کردن محیطی پیوسته به جای توده‌سنگ ناپیوسته اولیه) استوارند. این مساله سبب می‌شود که در روش اجزاء مجزا، اثر متقابل سنگ بکر و درزها بر یکدیگر در نظر گرفته شود، حال آنکه روش‌های مبتنی بر همگن‌سازی توده‌سنگ بدون چنین قابلیت‌هایی هستند. اثر متقابل سنگ بکر و درزها موجب افزایش ظرفیت باربری خواهد شد که روش‌های تحلیلی امکان در نظر گرفتن این افزایش را ندارند. البته گفتنی است که روش مورد استفاده برای تعیین ظرفیت باربری در تحقیق حاضر (روش لگاریتمی) نیز خود سبب ایجاد

است. برای همه مدل‌های مورد بررسی، مقادیر مختلفی از SR در محدوده تقریبی ۳ تا ۵۰ در نظر گرفته شده است. وضعیت قرارگیری درزها بگونه‌ای فرض شد که همواره از دو لبه شالوده درزی عبور نماید. برای هر یک از نمونه‌های ساخته شده، ظرفیت باربری با استفاده از روش  $0.1B$  محاسبه شده است. تغییرات نسبت  $q_{II}/c_i$  در مقابل SR در شکل (۷) نشان داده شده است. طبق این شکل، در محدوده  $SR < 30$ ، کاهش فاصله‌داری سبب کاهش ظرفیت باربری توده‌سنگ می‌شود. به ازای مقادیر  $SR > 30$ ، تغییرات فاصله‌داری درزها اثر چندانی بر ظرفیت باربری نهای ندارد. این مطلب نشان می‌دهد که در حالت  $SR > 30$ ، بدلیل افزایش تعداد درزها، سنگ ناپیوسته در عمل به یک محیط پیوسته معادل تبدیل شده که در نتیجه ظرفیت باربری، تأثیرپذیری بیشتری از وجود درزها ندارد. بنابراین می‌توان مقدار  $SR = 30$  را مرز اثرگذاری و نبود اثرگذاری فاصله‌داری درزها بر ظرفیت باربری توده‌سنگ‌های درزدار دانست.



شکل (۵): بردارهای جابجایی و نمودار بار - نشست برای حالت  $\alpha = 45^\circ$  و  $SR = 6$

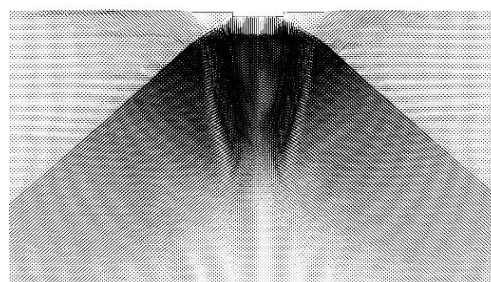
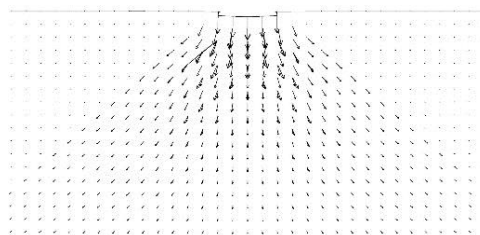


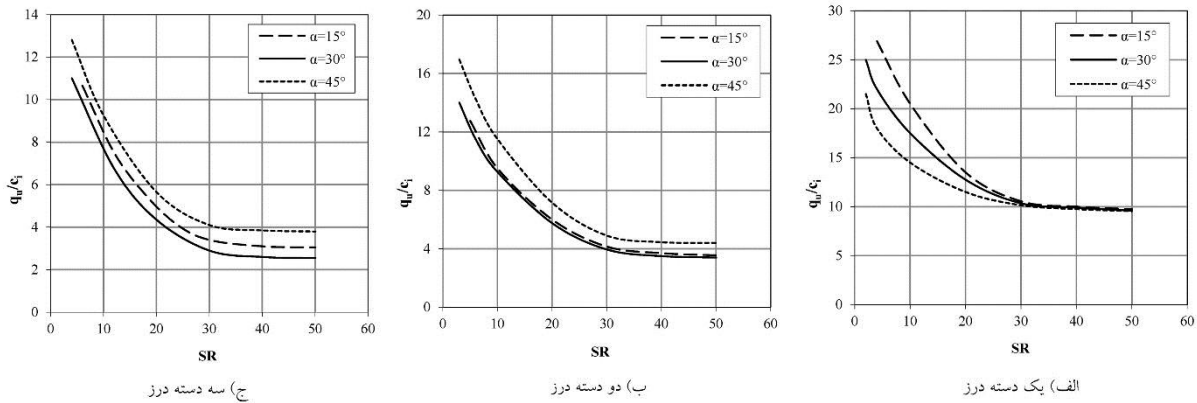
شکل (۶): بردارهای جابجایی و نمودار بار - نشست برای حالت  $\alpha = 45^\circ$  و  $SR = 40$

گسیختگی در زیر شالوده متمرکز خواهند شد. نمونه‌ای از منحنی بار - نشست و بردارهای جابجایی بدست آمده از تحلیل - های عددی برای  $SR = 6$  در شکل (۵) و برای  $SR = 40$  در شکل (۶) نشان داده شده است. با انجام تحلیل حساسیت گسترده‌ای در بخش‌های بعدی این تحقیق، میزان وابستگی نتایج بدست آمده به خصوصیات فرضی برای توده‌سنگ تعیین شده است.

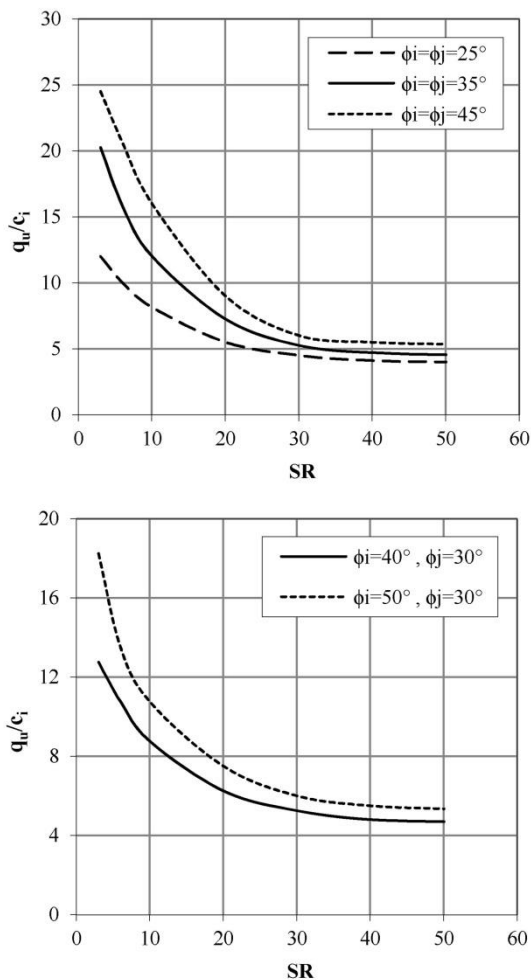
#### ۴-۲-۱- توده‌سنگ با یک تا سه دسته‌درز

توده‌سنگ‌هایی با یک تا سه دسته‌درز طبق شکل (۲) در نظر گرفته شده است. در حالت وجود یک دسته‌درز، شیب‌هایی معادل  $15^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $45^\circ$  با افق برای دسته‌درز در نظر گرفته شده است. در حالت وجود دو دسته‌درز، شیب‌هایی معادل  $15^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $45^\circ$  با افق برای دسته‌درز اول در نظر گرفته شده و دسته‌درز دوم عمود بر دسته‌درز اول فرض شده است. توده‌سنگ حاوی سه دسته‌درز مشابه حالت دو دسته‌درز در نظر گرفته شده است، با این تفاوت که دسته‌درز سوم به صورت قائم فرض شده





شکل (۷): تغییرات  $q_u/c_i$  بر حسب SR



شکل (۸): اثر  $\phi_j$  و  $\phi_i$  بر  $q_u/c_i$  در SRهای مختلف

### ۵- تحلیل حساسیت محدوده پیشنهاد شده SR نسبت به مشخصات توده‌سنگ

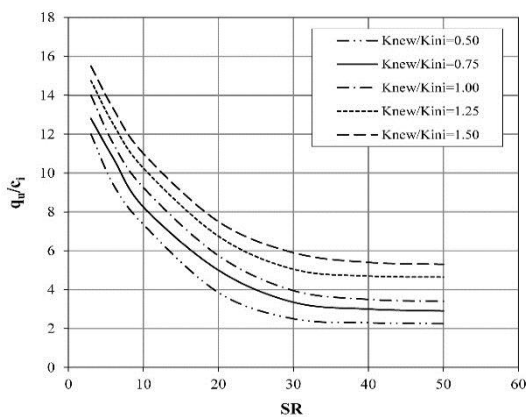
به علت وابستگی نتایج بدست آمده از روش عددی به خصوصیات فرضی اولیه برای سنگ بکر و درزها، لازم است تحلیل‌های حساسیت مختلفی برای مشخصات اثرگذار بر نتایج انجام شود. با توجه به تعداد زیاد تحلیل‌های انجام شده، فقط نتایج مربوط به توده‌سنگ با دو دسته‌دراز و  $\alpha=30^\circ$  در این قسمت ارائه شده است. تحلیل‌های انجام شده در حالت یک و سه دسته‌دراز و سایر زوایای  $\alpha$  نشان‌دهنده برقرار بودن نتیجه کلی بدست آمده در این بند برای این حالات است.

#### ۵-۱- اثر زاویه اصطکاک داخلی

برای بررسی اثر زاویه اصطکاک داخلی سنگ بکر و درزها بر محدوده پیشنهاد شده برای SR، تحلیل‌های جدیدی با فرض  $\phi_i = \phi_j = 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$  و  $\phi_j = 30^\circ$  و  $\phi_i = 40^\circ$  و  $\phi_i = 50^\circ$  و در حالت ثابت ماندن سایر مشخصات طبق آنچه فرض شده بود، انجام شده که نتیجه در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که عدد SR=30 به عنوان مرز اثر فاصله‌داری بر ظرفیت باربری، به زاویه اصطکاک سنگ بکر و درزها وابسته نیست.

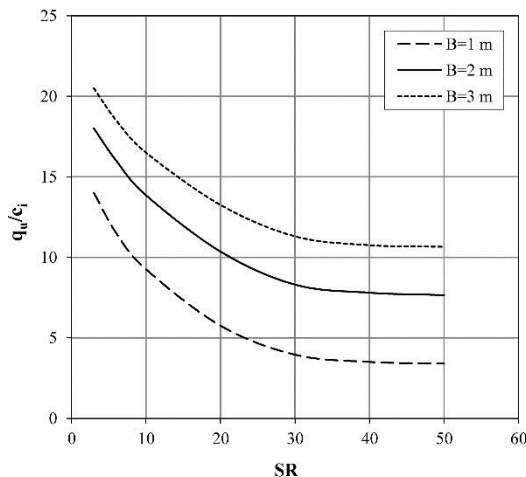
#### ۵-۲- اثر چسبندگی

برای بررسی اثر چسبندگی سنگ بکر و درزها بر محدوده پیشنهاد شده برای SR، تحلیل‌هایی با فرض نسبت‌های 0/3، 0/5، 0/1،  $c/c_i = 0/1$ ، فرض شده که سایر مشخصات طبق قبل باقی بمانند. نتیجه تحلیل‌ها که در شکل (۹) نشان داده شده، بیانگر نبود اثرگذاری نسبت چسبندگی‌ها بر مرز عدم اثرگذاری فاصله‌داری بر ظرفیت باربری است.

شکل (۱۱): اثر سختی‌های نرمال و برشی بر  $q_u/c_i$  در SR های مختلف

#### ۵-۵- اثر عرض شالوده

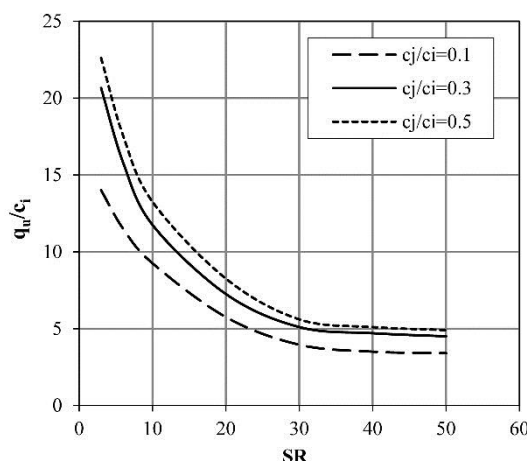
همانطور که پیش‌تر ذکر شد، تحلیل‌های انجام شده با نرم-افزار UDEC برای شالوده‌ای نواری به عرض ۱ متر انجام شده است. برای بررسی اثر عرض شالوده بر محدوده بدست آمده برای SR، تحلیل‌هایی برای عرض‌های ۲ و ۳ متر برای شالوده انجام شده است. در این حالت‌ها، فاصله‌داری درزها بگونه‌ای انتخاب شد تا مقادیر SR در همان محدوده تقریبی ۳ تا ۵۰ باقی بماند. منحنی تغییرات  $q_u/c_i$  در مقابل SR، برای عرض‌های مختلف شالوده در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

شکل (۱۲): اثر عرض شالوده بر  $q_u/c_i$  در SR های مختلف

#### ۶- نتیجه‌گیری

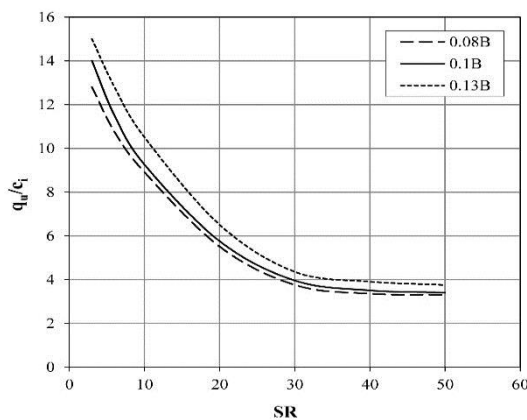
در تحقیق حاضر، روش تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی در حالت گسیختگی سوراخ شونده مورد بررسی قرار گرفت. اهمیت این بحث از آنجا ناشی می‌شود که روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی، برای حالت گسیختگی برشی کلی صادق بوده و امکان استفاده مناسب از آنها در حالت گسیختگی سوراخ شونده وجود ندارد.

با توجه به ایجاد تغییر شکل‌های زیاد در حالت گسیختگی سوراخ شونده، می‌توان با انتخاب معیار تغییرشکلی، ظرفیت

شکل (۹): اثر  $c_j/c_i$  بر  $q_u/c_i$  در SR های مختلف

#### ۵-۳- اثر مقدار نشست در حالت گسیختگی

در تعیین ظرفیت باربری، فرض شده بود که گسیختگی به ازای نشست معادل ۱۰ درصد عرض شالوده رخ دهد. در این قسمت نشست‌هایی معادل  $0.08B$  و  $0.13B$  به‌عنوان میزان نشست در حالت گسیختگی در نظر گرفته شده است و نتیجه تحلیل در شکل (۱۰) ارائه شده است. نتایج، نشان‌دهنده عدم اثرگذاری معیار نشست حالت نهایی در مقدار اثرگذاری فاصله‌داری بر ظرفیت باربری نهایی است.

شکل (۱۰): اثر مقدار نشست در بار نهایی بر  $q_u/c_i$  در SR های مختلف

#### ۵-۴- اثر سختی‌های نرمال و برشی

در این قسمت مقادیر  $k_n$  و  $k_s$  جدید ( $k_{new}$ ) از  $0.5$  تا  $1.5$  برابر مقادیر اولیه ( $k_{ini}$ ) و با گام  $0.25$  برابر تغییر داده شد (سایر مشخصات بدون تغییرند) و ظرفیت باربری نهایی در هر حالت بدست آمد که نتایج در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این شکل بیانگر نبود اثرپذیری  $SR=30$  از سختی‌های نرمال و برشی درزها است.



وابسته نیست.

## ۷- مراجع

Alehossein, H., Carter, J. P. and Booker, J. R. "Finite element analysis of rigid footings on jointed rock", 3rd International Conference on Computational Plasticity, Barcelona, Spain, pp. 935- 945, 1992.

Bobet, A., Fakhimi, A., Johnson, S., Morris, J., Tonon, F. and Yeung M. R., "Numerical Models in Discontinuous Media: Review of Advances for Rock Mechanics Applications", J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 135(11), pp. 1547- 1561, 2009.

Briaud, J. L. and Jeanjean, P. "Load Settlement Curve Method for Spread Footings on Sand", Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE. Vol. 2, pp. 1774- 1804, 1994.

Deere, D. and Miller, R. D., "Engineering Classification and Index Properties for intact Rock", University of Illinois, Tech. Rep. AF WL-TR-116, 1966.

Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvas, M., Ovesen, N. K., Orr, T. and Schuppener, B., "Designer's Guide to EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical Design- General Rules", 1<sup>st</sup> ed. London, Thomas Telford Ltd, 2004.

Imani, M., Fahimifar, A. and Sharifzadeh, M. "Upper Bound Solution for the Bearing Capacity of Submerged Jointed Rock Foundations", Rock Mech. Rock Eng. 45, pp. 639- 646, 2012.

Imani, M., Sharifzadeh, M., Fahimifar, A. and Haghparast, P., "A Characteristic Criterion to Distinguish Continuity of Rock Masses Applicable to Foundations", 45<sup>th</sup> US Rock Mech/ Geomech. Symposium, San Francisco, USA, ARMA-11- 508, 2011.

Itasca Consulting Group, Inc. UDEC: Universal distinct element code, Version 3.1., Minneapolis, MN, USA, 2000.

Ki-Bok Min, "Fractured Rock Masses as equivalent continua- a numerical study", Ph.D. dissertation, Dept. Land and Water Resource Engrg., KTH, Stockholm, Sweden, 2004.

Maghous, S., Bernaud, D., Freard, J. and Garnier, D., "Elastoplastic behavior of jointed rock masses as homogenized media and finite element analysis", Int. J. Rock Mech. Min Sci. 45, pp. 1273- 1286, 2008.

باربری نهایی را بدست آورد. در تحقیق حاضر، تغییرشکل متناظر با حالت نهایی برابر ده درصد عرض شالوده انتخاب شده است که بررسی منابع مختلف نشان‌دهنده مناسب بودن استفاده از این معیار در مورد پی‌های سنگی است. با رسم منحنی بار- نشست پی با استفاده از برنامه تهیه شده، ظرفیت باربری نهایی به ازای فاصله‌داری‌های مختلفی از درزها بدست آمده است. نتیجه تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که به ازای نسبت فاصله-داری (SR) کوچکتر از ۳۰، کاهش فاصله‌داری درزها منجر به کاهش ظرفیت باربری نهایی خواهد شد. این مطلب از آنجا ناشی می‌شود که کاهش فاصله‌داری درزها سبب خردشدگی بیشتر در توده‌سنگ و در نتیجه کاهش سختی آن خواهد شد که در این حالت، نشست‌های بزرگتری به وقوع خواهد پیوست. چون در عمل، برای تعیین ظرفیت باربری در حالت گسیختگی سوراخ شونده از معیار نشست استفاده می‌شود (مشابه تحقیق حاضر)، بنابراین با افزایش نشست، ظرفیت باربری کاهش خواهد یافت. اما به ازای نسبت فاصله‌داری بزرگتر از ۳۰، کاهش فاصله‌داری اثر ناچیزی بر ظرفیت باربری خواهد داشت، چون در این حالت، توده‌سنگ به محیطی به شدت شکسته تبدیل شده است که درزها در همه جا حضور دارند و توده‌سنگ در عمل به محیطی پیوسته و یکدست تبدیل شده است.  
دو نکته با اهمیت این تحقیق عبارتند از:

### اهمیت بررسی احتمال وقوع گسیختگی سوراخ شونده

ممکن است در عمل، گسیختگی سوراخ شونده زودتر از گسیختگی برشی کلی رخ داده، حاکم بر طرح شود. بنابراین در صورتی که بدون کنترل پتانسیل وقوع گسیختگی سوراخ شونده، از روابط مبتنی بر گسیختگی برشی کلی استفاده شود، ظرفیت باربری بدست آمده در خلاف جهت اطمینان خواهد بود.

### محدوده استفاده از رویکرد مستقیم در مدلسازی مساله

#### ظرفیت باربری

با توجه به اینکه با کاهش فاصله‌داری درزها، تحلیل‌های عددی بسیار وقت‌گیر خواهد شد، لذا وجود معیاری برای تشخیص نبود نیاز مدلسازی درزها موجب صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و هزینه انجام تحلیل خواهد شد. چنین معیاری در مورد مسائلی نظیر مهندسی تونل در منابع موجود است ولی در مورد پی‌ها توصیه مناسبی وجود ندارد. طبق نتایج بدست آمده از این تحقیق، بیشترین نسبت فاصله‌داری‌ای که مدلسازی مستقیم درزها ضروری است،  $SR=30$  است. استفاده از این معیار سبب صرفه‌جویی قابل توجهی در وقت و هزینه تحلیل‌ها خواهد شد. گفتنی است که این معیار به خصوصیات سنگ بکر و درزها

1998. Merifield, R. S., Lyamin, A. V. and Sloan, S. W. "Limit analysis solutions for the bearing capacity of rock masses using the generalised Hoek-Brown criterion", *Int. J. Rock. Mech. Mining. Sci.*, 43, pp. 920- 937, 2006. [۱۱]
- Serrano, A. and Olalla, C. "Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass, Part II: Determination procedure", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 35(3), pp. 325- 348, 1998. [۱۷]
- Singh, M. and Rao, K. S. "Bearing Capacity of Shallow Foundations in Anisotropic Non-Hoek-Brown Rock Masses", *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE*, 130(12), pp. 1347- 1349, 2004. [۱۸]
- Prakoso, W. A. and Kulhawy, F. H., "Bearing Capacity of Strip Footings on Jointed Rock Masses", *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE*, 130(12), pp. 1347- 1349, 2004. [۱۲]
- Stille, H. and Palmstrom, A. "Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations", *Tunnelling and Underground Space Technology*. 23, pp. 46- 64, 2008. [۱۹]
- Sutcliffe, D. J., Yu, H. S. and Sloan, S. W. "Lower bound solutions for bearing capacity of jointed rock", *Comput. Geotech.*, 31, pp. 23- 36, 2004. [۲۰]
- Rock Foundations, U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design, EM 1110-1-2908, Nov. 1994. [۱۳]
- Yang, X. L. and Yin, J. H. "Upper bound solution for ultimate bearing capacity with a modified Hoek-Brown failure criterion", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 42, pp. 550- 560, 2005. [۲۱]
- Saada, Z., Maghous, S. and Garnier, D. "Bearing capacity of shallow foundations on rocks obeying a modified Hoek-Brown failure criterion", *Comput. Geotech.*, 35(2), pp. 144- 154, 2008. [۱۴]
- Serrano, A. and Olalla, C. "Allowable Bearing Capacity of Rock Foundations Using a Non-linear Failure Criterium", *Int. J. Rock Mech. Min Sci.* 33(4), pp. 327- 345, 1996. [۱۵]
- Serrano, A. and Olalla, C. "Ultimate bearing capacity of an anisotropic discontinuous rock mass, Part I: Basic modes of failure", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 35 (3), pp. 301- 324, [۱۶]