

## تعیین ظرفیت باربری و نشست بر روی یک ساختار سنگی درزه دار با استفاده از روش های عددی و تجربی

جواد شریفی<sup>۱</sup>، محمد غفوری<sup>۲\*</sup>، سعید اردشیری لاجیمی<sup>۳</sup>

دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۲/۰۶

### چکیده

در این تحقیق به منظور تعیین ظرفیت باربری و نشست بر روی یک ساختار سنگی درزه دار، ابتدا روش های تجربی و عددی مرور شده و سپس جهت استخراج پارامترهای دقیق، یک ساختگاه سنگی بر روی توده سنگ های هوازه توف سبز ائوسن در استان تهران انتخاب و پارامترهای مدل از یک محیط واقعی استخراج گردید. در این راستا پس از بررسی های میدانی و آزمایش های صحرایی در محل سازه، پارامترهای سنگ بکر در آزمایشگاه تعیین و طبقه بندی مهندسی توده انجام شده است. در ادامه خواص ژئومکانیکی توده سنگ برآورد شده و در جهت تعیین ظرفیت باربری و نشست با روش های تجربی و عددی استفاده شده است. در این مطالعه با توجه به شرایط ناپیوسته سنگی از نرم افزار UDEC جهت مدل سازی عددی استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که روش های تجربی یک محدوده خاصی برای ظرفیت باربری پیشنهاد می دهند که برای کاربرد مهندسی نیاز به تصحیح داشته، در حالی که روش های عددی جزئیات بیشتری از توزیع بار در پی را ارائه می دهند. همچنین نتایج مدل سازی نشان داد که روش عددی جهت ساختارهای سنگی ناپیوسته به واقعیت و شرایط زمین نزدیکتر و نتایج آن قابل اعتمادتر است.

**کلید واژه ها:** ناپیوستگی، ظرفیت باربری، نشست، روش های عددی.

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد (jv\_sharifi@yahoo.com)

۲. استاد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد (ghafoori@um.ac.ir)

۳. دانش آموخته مهندسی عمران - خاک و پی دانشگاه تربیت مدرس

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

در مواردی که سازه بر روی بستر سنگی قرار می‌گیرد در مقایسه با بستر خاکی شرایط دستخوش تغییراتی می‌شود. دو تفاوت اصلی در میان ساختارهای سنگی و خاکی وجود دارد، نخست توانایی سنگ به پایداری در برابر بارهای زیادتر از خاک و حضور ناپیوستگی‌های موجود در سنگ که سبب شده مقاومت آن با سنگ بکر متفاوت باشد. به دلیل مقاومت فشاری و کششی مناسب سنگ سبب شده سازه‌های سبک تا متوسطی بر روی بستر سنگی قابل ساخت باشد. ولی برای سازه‌های سنگین و نیمه سنگین شرایط متفاوت است. در این صورت ممکن است که ناپیوستگی در توده سنگ سبب لغزش و شکست شالود شود و یا نشست در جهت عمود بر درزه‌ها سبب نشست کلی سازه گردد (Duncan, 2005, Saada et al., 2008).

جهت تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی با در نظر گرفتن فرضیه‌های ساده‌ای نوعی محاسبه در این زمینه ارائه شده است. برای مثال، سطح شکست سنگ از زیر پی تا طرفین آن مرکب از دو سطح مستوی فرض می‌شود و با استفاده از معیار شکست مور-کلمب ظرفیت نهایی باربری در سنگ محاسبه می‌شود (Merifield et al., 2006, Hoek, 1990). همچنین معیاری جهت تخمین ظرفیت باربری بر اساس شاخص کیفی سنگ توسط برخی محققین ارائه شده است. این مولفین پیشنهاد کردند که مقادیر ارائه شده به طور کلی و بدون در نظر گرفتن جزییات طراحی مثل ابعاد شالوده می‌باشد (Peck et al., 1974, Hoek, 1998). ظرفیت باربری بر اساس عدد نفوذ استاندارد درون‌یابی شده، براساس مقاومت بار نقطه‌ای و محاسبه ظرفیت باربری با استفاده از مقاومت تک محوری نیز ارائه شده است (Goodman, 1980, Franklin and Pearson, 1985, Serrano, 2002, Look, 2007).

با تاثیر سربار تنش‌های فشاری در لایه‌های سنگی به وجود آمده و باعث فشرده شدن آن می‌شود. فشرده‌گی توده سنگ ناشی از تغییر شکل فشاری و بسته شدن درزه و عوامل

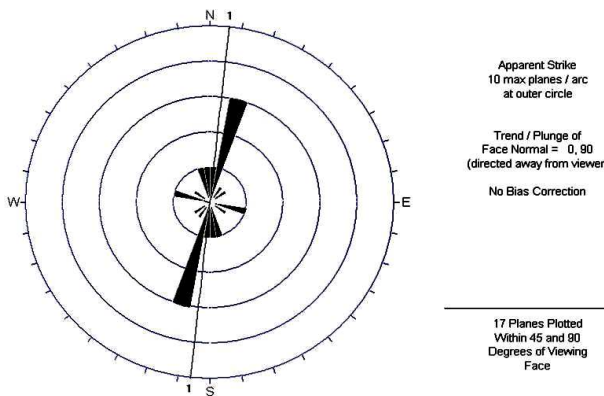
دیگر می‌باشد. در بحث نشست، مشخصات شالوده مثل صلبیت نقش مهمی در تحلیل‌های مربوطه دارد (Saada et al., 2008). در دهه‌های اخیر استفاده از روش‌ها و مدل‌های عددی در مباحث مکانیک سنگ توسعه زیادی یافته بطوری که سبب انگیزه پژوهشی محققین شده است (Jan, 1996, Waltham, 2004, Wang, 2011, Tang and Liu, 2012). اگرچه برخی از مدل‌های عددی حل کاملی را در اختیار قرار نمی‌دهند، ولی با ظهور روش‌های آنالیز حساسیت، یافتن ارتباط میان پارامترهای مختلف مقدور شده است (Souley and Homand, 1996, Zhao et al., 2008, Bayraktar et al., 2011). برخی از این مدل‌ها عبارت‌اند از روش اجزا مرزی، روش اجزا محدود، روش اجزا مجزا، روش تفاضل محدود و تحلیل تغییرشکل ناپیوستگی‌ها. همچنین مدل‌های مختلفی از مواد در نرم‌افزارهای مربوطه موجود می‌باشد که تحلیل را ساده نموده است و محققین از این نرم افزارها در تحلیل رفتار سنگ‌ها با در نظر گرفتن خواص ناپیوستگی‌ها استفاده کرده‌اند (Fahimifar et al., 2012, Eduardo et al., 2012, Lin et al., 2012).

در این تحقیق به منظور تعیین ظرفیت باربری بر روی یک ساختار سنگی درزه‌دار، ابتدا روش‌های عددی و تجربی مرور شده، سپس یک ساختار سنگی انتخاب و پارامترهای لازم از یک توده سنگ واقعی استخراج شده است. برای این مهم، بررسی‌های میدانی در محل سازه (تهران، شهر پردیس) صورت گرفته و پس از تعیین پارامترهای سنگ بکر در آزمایشگاه، طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ انجام شده است. در ادامه خواص ژئومکانیکی توده سنگ برآورد شده و در جهت تعیین ظرفیت باربری و نشست با روش‌های تجربی و عددی استفاده شده است. در این تحقیق با توجه به شرایط محیط ناپیوسته و نوع پارامترهای موجود، نرم‌افزار UDEC جهت مدل‌سازی عددی انتخاب شده است. نتایج مدل‌سازی نشان داد که روش‌های تجربی یک محدوده خاصی برای ظرفیت باربری پیشنهاد می‌دهند که برای کاربرد مهندسی نیاز به تصحیح داشته، در حالی که روش‌های عددی جزییات بیشتری از توزیع بار در پی را ارائه می‌دهند. همچنین نتایج نشان داد

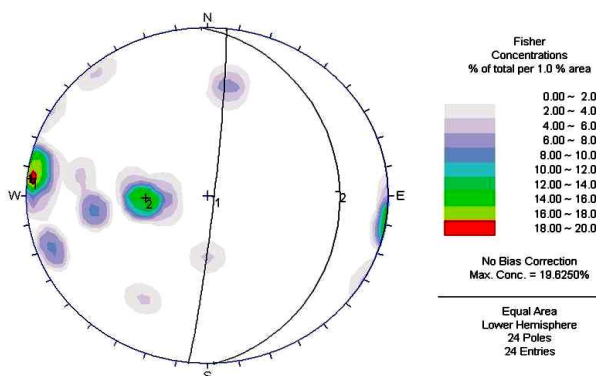
### ۳. تعیین خواص ژئومکانیکی توده سنگ

#### ۱-۳. بررسی‌های محلی و آزمایش‌های برجا

حفاری در این مطالعه ماشینی و همراه با نمونه‌گیری بوده که در سه نقطه محدوده جمعا به طول ۴۵ متر انجام شده است. از آنجایی که جنس محدوده مورد مطالعه از سنگ نیمه‌سخت بوده، جهت نمونه‌گیری از مغزه‌گیری پیوسته دولایه (مضاعف) استفاده شده است. در گمانه‌های حفر شده در این طرح، به آب زیرزمینی یا فضای خالی برخورد نشده و نمونه‌گیری تا عمق مورد نظر انجام شده است. در ادامه مشخصات درزه‌ها در محدوده مورد مطالعه برداشت، سپس وضعیت درزه‌ها، فراوانی آنها و تعداد دسته درزه‌ها تحلیل (Hudson and Priest, 1979) و به وسیله نرم‌افزار DIPS ارزیابی و مدل شده است (شکل ۲ و ۳). بررسی‌ها نشان داد که دو دسته درزه در منطقه مورد مطالعه موجود می‌باشد.



شکل ۲. جهت‌یابی دسته درزه‌ها



شکل ۳. فراوانی، امتداد و شیب دسته درزه‌ها

که روش عددی جهت ساختگاه‌های سنگی درزه‌دار به واقعیت و شرایط زمین نزدیکتر و نتایج آن قابل اعتمادتر است.

#### ۲. زمین‌شناسی و لرزه‌زمین ساخت منطقه

طرح مورد مطالعه در استان تهران و در شهر جدید پردیس واقع می‌باشد. این منطقه از نظر زمین‌شناسی در بخش مرکزی زون ساختمانی البرز قرار دارد. چینه‌شناسی منطقه شامل سنگ‌های هوازده توف سبز مربوط به دوره زمین‌شناسی ائوسن می‌باشد (درویش زاده، ۱۳۷۰). این واحد اساسا ترکیبی است از گدازه‌های آتشفشانی توف سبز و سنگ‌های آتشفشانی که رخنمون‌های بلند این دشت‌ها را تشکیل می‌دهد (شکل ۱). محدوده مورد بررسی از نظر تکتونیک و زمین‌ساخت همانند دیگر نقاط ایران فعال بوده و وجود سیستم‌های شکستگی و گسل‌های منطقه و زمین لرزه‌های معاصر شاهدهی برای این مدعی است. با توجه به نقشه پهنه‌بندی شده آیین‌نامه ۲۸۰۰ مرکز تحقیقات سازمان مسکن و شهرسازی، خطر زمین‌لرزه در منطقه مورد مطالعه در محدوده خطر نسبی زیاد قرار می‌گیرد و شتاب بیشینه طراحی در این مناطق برابر با ۰.۳۵ شتاب ثقل زمین می‌باشد (آیین‌نامه ۲۸۰۰، ۱۳۹۲).



شکل ۱. شکل شماتیک شالوده و جهت درزه‌های مورد مطالعه

## ۲-۳. بررسی های آزمایشگاهی

بر روی نمونه های اخذ شده از گمانه ها، آزمایش هایی جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی انجام شده است. آزمایش های تعیین رطوبت، وزن مخصوص، تخلخل، نفوذپذیری، جذب آب، مقاومت فشاری تک محوری، بار نقطه ای، چکش اشمیت و مقاومت کششی برزلی مطابق با استاندارد ISRM بر روی نمونه ها انجام شده است (به نقل از فهیمی فر، ۱۳۸۰، ISRM, 1981). نتایج برخی از آزمایش های انجام شده در جدول ۱ و ۲ آمده است.

## جدول ۱. برخی از خصوصیات فیزیکی سنگ بکر

شماره نمونه	جذب آب (درصد)	چگالی (تن بر مترمکعب)	تخلخل سرعت صوت (متر بر ثانیه)
۱ زیاد	۱۰/۰۱	۲/۵۱	۴۳۱۷/۰۷
۲ کم	۲/۵۰	۲/۵۴	۳۸۲۴/۹۰
۳ متوسط	۶/۲۵	۲/۵۰	۴۰۵۳/۷۶
۴ زیاد	۱۲/۸۰	۲/۴۵	۴۳۱۰/۱۱
۵ زیاد	۱۰/۲۰	۲/۴۸	۴۲۴۰/۲۱

## جدول ۲. برخی از خصوصیات مکانیکی سنگ بکر

شماره نمونه	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	سختی اشمیت (مگاپاسکال)
۱	۹/۵۰	۲/۴۰	۰/۱۰
۲	۲۰/۴۰	۴/۵۰	۰/۲۶
۳	۱۴/۶۵	۰/۹۶	۰/۱۵
۴	۵۰/۵۱	۷/۷۰	۲/۱۳
۵	۳۰/۴۸	۴/۵۶	۱/۴۲

## ۳-۳. طبقه بندی مهندسی توده سنگ

معمولا برای طبقه بندی مهندسی توده سنگ ها از نقطه نظر ژئومکانیکی از برخی روش های تجربی نظیر RMR، RQD، RSR و GSI استفاده می شود (Deere, and Miller, 1966, Patton and Deere, 1970, Jaeger, et al., 1976, Ladanyi, 1977, Hoek, 1998). در این راستا برخی از نتایج آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی لازم جهت رده بندی توده سنگ در جدول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

## جدول ۳. وضعیت فضایی درزه ها

دسته درزه ها	امتداد (درجه)	شیب (درجه)	تعداد نقاط برداشتی	تعداد درزه برداشتی
دسته یک	۲۷۶	۱۰	۱۰	۵۰
دسته دو	۲۶۸	۶۲	۱۵	۶۰

## جدول ۴. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی درزه ها

دسته درزه ها	باز شدگی (میلی متر)	زبری دیواره (متر)	فاصله داری (متر)	مواد پرشونده (مگاپاسکال)	مقاومت درزه ها
دسته یک	۴ تا ۶	۳	۳	آهک	۱۰
دسته دو	۸ تا ۱۲	۵	۰/۲۵	رس	۱۶

طبقه بندی توده سنگ محدوده مورد مطالعه بر اساس ویرایش ۱۹۸۹ رده بندی RMR انجام شده است (جدول ۵). همچنین شاخص GSI نیز برآورد شده که جزییات آن در جدول ۶ آمده است (Brady and Brown, 1985, Bieniawski, 1989, Duncan, 2005, Look, 2007).

## جدول ۵. طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR)

طبقه بندی	رده	RMR89	طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ
پارامتر	۲	۶۲	سنگ خوب

## جدول ۶. مقاومت زمین شناسی (GSI)

GSI	RMR89	توصیف مقاومت زمین شناسی
۵۵	۶۲	سنگ بلوکی

از پارامترهای مقاومت برشی مغزه سنگ برای تعیین پارامترهای برشی توده سنگ طبق معیار شکست هوک و براون استفاده شده است. پارامترهای این معیار شامل مقاومت تک محوری نمونه ها، ضریب ثابت  $m_i$  و شاخص GSI می باشد (Brady and Brown, 1985, Hoek and Brown, 1998, Duncan, 2005). ثابت ها و پارامترهای ورودی معیار هوک و براون برای توده سنگ ساخته شده در جدول ۷ ارایه شده است. این مشخصات بر اساس سنگ توف (بلوکی) با مقاومت تک محوری ۳۰ مگاپاسکال می باشد.

**جدول ۷.** ثابت‌ها و پارامترهای ورودی معیار هوک و براون

ثابت $m_i$	شاخص GSI	a	S	$m_b$
۱۰	۵۵	۰/۵۰۲	۰/۰۰۶۳	۱/۴۶۲

بر اساس امتیازات رده‌بندی RMR، تغییرات مدول الاستیسیته بر اساس روابط ۱ و ۲ در محدوده مورد مطالعه تعیین و در جدول ۸ نشان داده شده است.

$$E_m = 2RMR - 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$E_m = 10 \left( \frac{RMR-10}{40} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

**جدول ۸.** پارامترهای مکانیکی توده سنگ

توصیف سنگ	چسبندگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)
مناسب	۰/۱۴۹	۲۹	۱۵۰۰

**۴. تعیین ظرفیت باربری و نشست با روش‌های تجربی**

پس از مطالعات میدانی و بررسی‌های آزمایشگاهی، ظرفیت باربری و نشست توده سنگ تعیین شده است. روابط مختلفی برای برآورد مقاومت نهایی زمین ( $q_{ult}$ ) ارائه شده که برخی از آنها در ادامه بررسی شده است.

**۴-۱. تعیین ظرفیت باربری با استفاده از جداول و استانداردها**

یکی از اولین روابط ظرفیت باربری بر روی سنگ مربوط به روچستر می‌باشد که سنگ‌ها را به سه گروه نرم، متوسط و سخت تقسیم‌بندی نموده و ظرفیت باربری آنها به ترتیب ۱/۴، ۲/۴ و ۴/۸ مگاپاسکال تعیین کرده است. همچنین توضیحاتی در ارتباط با سازه‌ها و روش بهسازی آنها ارائه کرده است. در جدول دیگری که توسط گودمن (۱۹۸۰) پیشنهاد شده، ظرفیت باربری با توجه به شرایط زمین‌شناسی مثل نوع سنگ و سن آن ارائه شده است. اطلاعات این جدول از مشاهدات سازه‌های پایدار ساخته شده بر روی سنگ اخذ شده که در برگیرنده فاکتورهای اطمینان و حداقل نشست می‌باشد (Goodman, 1980, Hoek and Bray, 1981, Bowles, 1996).

در این روابط میزان ظرفیت باربری با توجه به چگالی شکستگی‌ها که از میزان شاخص کیفی سنگ بدست می‌آید کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به ساختار سنگی مورد بررسی، ظرفیت باربری ۲/۴ مگاپاسکال برآورده شده است.

**۴-۲. تعیین ظرفیت بر اساس شاخص کیفی سنگ**

پک و هانسن (۱۹۷۴) معیاری جهت تخمین ظرفیت باربری بر اساس شاخص کیفی سنگ ارائه دادند. این مولفین پیشنهاد کردند که مقادیر ارائه شده به طور کلی و بدون در نظر گرفتن جزئیات طراحی مثل ابعاد شالوده می‌باشد (Peck et al., 1974, Bowles, 1996). نتایج ظرفیت باربری بر اساس شاخص کیفی در جدول ۹ نشان داده شده است.

**جدول ۹. تعیین ظرفیت باربری بر اساس شاخص کیفی**

شماره گمانه	میانگین شاخص کیفی (RQD)	توصیف سنگ	ظرفیت باربری (مگاپاسکال)
BH1	٪۷۷	خوب	۶-۱۲
BH2	٪۶۹	مناسب	۶-۱۲

**۴-۳. تعیین ظرفیت باربری بر اساس مقاومت تک محوری**

محاسبه ظرفیت باربری با استفاده از مقاومت تک محوری در مواقعی استفاده می‌شود که فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها کمتر از عرض شالوده باشد و درزه‌ها نیز عمودی و نزدیک به عمودی باشد. در این راستا تعیین ظرفیت باربری از طریق مقاومت تک‌محوری انجام و سپس مقاومت نهایی طراحی در جدول ۱۰ ارائه شده است (Brady and Brown, 1985, Look, 2007).

**جدول ۱۰. تعیین ظرفیت باربری از طریق مقاومت تک‌محوری**

شماره گمانه	محدوده مقاومت (مگاپاسکال)	مقاومت نهایی طراحی (مگاپاسکال)
BH1	۳۰ تا ۸۰	۴/۵
BH2	۱۵ تا ۳۰	۳/۳

تنش حداکثر و حداقل می‌باشند. ظرفیت باربری مجاز  $q_a$  به مقاومت سنگ، فاکتور اطمینان و  $C_{f1}$  بستگی دارد (رابطه ۶). با توجه به مشخصات ساختگاه، ظرفیت باربری مجاز با استفاده از رابطه هوک و براون ۱۲ مگاپاسکال محاسبه شده است.

$$q_a = \frac{(C_{f1} s^{1/2} \sigma_{u(r)}) [1 + (ms^{-1/2} + 1)^{1/2}]}{FS} \quad (6)$$

۴-۷. تعیین ظرفیت باربری با روش حل بل (۱۹۸۶)

ظرفیت باربری سنگ‌های ضعیف با کمی درزه و لایه بندی از رابطه بل محاسبه می‌شود. این رابطه رخداد گسیختگی گوه‌ای در سنگ زیر شالوده را ارزیابی می‌کند. روش بل جهت تعیین ظرفیت باربری برای شالوده نواری، مربعی و دایره طبق رابطه ۷ استفاده می‌شود (به نقل از (Duncan, 2005, Look, 2007)). با توجه به مشخصات ساختگاه، ظرفیت باربری مجاز با استفاده از رابطه بل (روش حل بل، ۱۹۸۶) ۸/۵ مگاپاسکال محاسبه شده است.

$$q_a = \frac{(C_{f1} c N_c + C_{f2} (B \gamma_r / 2) N_\gamma + \gamma D N_q)}{FS} \quad (7)$$

که در آن B عرض شالوده (مربعی و نواری) و یا قطر (پی دایره‌ای)،  $\gamma$  مقدار دانسیته سنگ، D عمق شالوده و c مقدار چسبندگی توده سنگ می‌باشد. فاکتورهای اصلاح  $C_{f1}$  و  $C_{f2}$  به شکل شالوده بستگی دارد. پارمترهای  $N_c$ ،  $N_q$  و  $N_\gamma$  نیز فاکتورهای ظرفیت باربری می‌باشند (Duncan, 2005, Look, 2007)

۴-۷. تعیین ظرفیت باربری بر روی سنگ با دو دسته درزه

اگر سنگ دارای دو سری ناپیوستگی باشد که گوه گسیختگی رخ دهد، ظرفیت باربری ممکن است به دو دلیل کاهش یابد. نخست، جهت‌یابی ناپیوستگی‌ها که منجر به گسیختگی گوه‌ای خواهد شد و دوم وجود ناپیوستگی‌ها سبب می‌شوند که مقاومت توده سنگ کمتر از سنگ بکر باشد. این

۴-۸. تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روابط لادنی

با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه، ظرفیت باربری پی با استفاده از رابطه لادنی (رابطه ۳ و ۴) محاسبه (Duncan, 2005, Ladanyi and Roy, 1972) و در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

$$q_{ul} = q_u (N_\phi + 1) \quad (3)$$

$$N_\phi = \tan^2((\phi / 2) + 45) \quad (4)$$

که در معادلات  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $q_{ul}$  مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ می‌باشد.

جدول ۱۱. تعیین ظرفیت باربری با استفاده از رابطه لادنی

شماره گمانه	چسبندگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	ظرفیت باربری (مگاپاسکال)
BH1	۰/۱۴۹	۲۹	۱۱/۲۸
BH2	۰/۱۳۲	۲۶	۹/۳۶

۴-۵. ظرفیت باربری بر روی سنگ شکسته

تنش‌هایی که کمی پایین‌تر از ظرفیت باربری سنگ می‌باشند سبب نشست الاستیک خواهند شد. هر چند در هنگامی که بار زیاد می‌شود و فشار به ظرفیت باربری می‌رسد سبب رشد ترک‌ها و گسیختگی گوه‌ای خواهد شد. این شرایط اتساع سنگ و شکست‌های شعاعی و گسیختگی گوه‌ای را نتیجه می‌دهد، سپس حرکت گوه‌ها سبب گسیختگی ناگهانی در شالوده خواهد شد. جهت تعیین مقاومت در این سنگ‌ها از رابطه هوک و براون استفاده می‌شود که طبق رابطه ۵ مقاومت سنگ درزه‌دار بدست می‌آید.

$$\sigma_1 = (m \sigma_{u(r)} \sigma_3 + s \sigma_{u(r)}^2)^{1/2} + \sigma_3 \quad (5)$$

که m و s ثابت می‌باشند و به نوع سنگ، درجه شکستگی و خردشگی سنگ بستگی دارند و  $\sigma_{u(r)}$  مقاومت تک‌محوری فشاری سنگ بکر می‌باشد.  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  نیز به ترتیب

### ۵. تعیین ظرفیت باربری و نشست با روش‌های عددی

در یک تقسیم‌بندی کلی، روش‌های عددی را به دو گروه روش‌های پیوسته و روش‌های ناپیوسته تقسیم‌بندی می‌کنند. برخی از این روش‌ها عبارت است از روش اجزا مرزی، روش اجزا محدود، روش اجزا مجزا، روش تفاضل محدود و تحلیل تغییرشکل ناپیوستگی‌ها می‌باشد. همچنین مدل‌های مختلفی از مواد در نرم‌افزارهای مربوطه موجود می‌باشد که تحلیل را ساده نموده است. برای مثال مدل خنثی، الاستیک، خمیری دراکر- پراگر، خمیری موهر- کولمب، نرم‌شدگی- سخت‌شدگی کرنش و تسلیم دوخطی. از میان مدل‌های رفتاری ذکر شده، مدل موهر-کولمب در مسائل مکانیک سنگ مثل مدل‌سازی گسیختگی برشی سنگ سالم، درزه سنگی و توده سنگی کاربرد داشته و همچنین در مدل‌سازی سنگ‌های نیمه شکننده نیز مفید می‌باشد (Merifield et al., 2006, Fahimifar et al., 2012, Eduardo et al., 2012).

#### ۵-۱. پارامترهای عددی معیار موهر-کولمب

معیار موهر-کولمب رفتار الاستیک-پلاستیک کامل را شبیه‌سازی می‌کند. این معیار در قالبی ساده به صورت ارتباطی خطی بین تنش برشی و تنش عمود بر سطح، بر روی یک صفحه، توسط کولمب (۱۷۷۳) بر مبنای قانون شکست اصطکاکی و به صورت رابطه ۱۳ ارائه شده است (Hoek, 1990, Merifield et al., 2006).

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (13)$$

که  $\tau$  تنش برشی،  $\sigma_n$  تنش عمودی،  $c$  چسبندگی و  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد.

معیار موهر-کولمب با استفاده از تنش‌های اصلی به صورت رابطه ۱۴ نیز نشان داده می‌شود (Hoek, 1990).

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{2c \cdot \cos \phi}{\sigma_3(1 - \sin \phi)} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (14)$$

همچنین در بسیاری حالات رابطه ۱۴ به شکل رابطه ۱۵ نیز معرفی می‌شود.

$$\sigma_1 = \sigma_c + k\sigma_3 \quad (15)$$

شرایط در نهایت منجر به گسیختگی در فونداسیون به واسطه جابجایی گوه خواهد شد که از طریق روابط ۸ تا ۱۱ تنش لازم جهت گسیختگی گوه‌ای محاسبه می‌شود.

$$q_a = \frac{[\sigma_{3A} N_{\phi_1} + (c_1 / \tan \phi_1)(N_{\phi_1} - 1)]}{FS} \quad (8)$$

$$N_{\phi_1} = \tan^2(45 + \phi_1 / 2) \quad (9)$$

$$N_{\phi_2} = \tan^2(45 + \phi_2 / 2) \quad (10)$$

$$\sigma_{3A} = (q_s + \frac{\gamma B}{2} \tan \psi_1) N_{\phi_2} + (\frac{c_2}{\tan \phi_2})(N_{\phi_2} - 1) \quad (11)$$

که  $\phi_1$  و  $\phi_2$  به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی دسته درزه یک و دو می‌باشد.

با استفاده از روابط ۸ تا ۱۱ ظرفیت باربری جهت محدوده مورد مطالعه ۷/۸ مگا پاسکال تعیین شده است.

#### ۴-۱. تعیین نشست با استفاده از روابط تجربی

در شالوده‌هایی که بر روی سنگ الاستیک قرار دارد، از تئوری الاستیک جهت تعیین نشست استفاده می‌شود. این تئوری در شرایط مختلف زمین‌شناسی مثل هموزن، ایزوتروپ، سازندهای لایه‌ای و سنگ ایزوتروپ با لایه‌بندی قابل استفاده می‌باشد. وقتی که توده سنگی هموزن و ایزوتروپ باشد، نشست قائم به وسیله رابطه ۱۲ تعیین می‌شود که بر حسب شکل شالوده دارای ضرایب مختلف می‌باشد (Bowles, 1996, Duncan, 2005, Look, 2007).

$$\delta_v = \frac{C_d q B (1 - \nu^2)}{E} \quad (12)$$

که  $q$  بار فشار گسترده،  $B$  عرض شالوده،  $C_d$  پارامتری که شکل مساحت بارگذاری و جهت نقطه‌ای که نشست در آن جهت محاسبه می‌شود،  $\nu$  ضریب پواسون و  $E$  نیز مدول یانگ می‌باشد. در این تحقیق پس از محاسبه ظرفیت باربری، تنش مجاز با در نظر گرفتن نشست مجاز مورد بررسی قرار گرفته است. نشست مجاز ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

پلاستیک مقادیر غیر صفر را به خود اختصاص می‌دهند. توصیف قانون نموی هوک بر اساس مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های اصلی به صورت رابطه ۲۰ و ۲۱ می‌باشد (Hoek, 1990, Merifield et al., 2006, Saada et al., 2008).

$$\Delta\sigma_1 = \alpha_1 \Delta e_1^e + \alpha_2 (\Delta e_2^e + \Delta e_3^e) \quad (20)$$

$$\Delta\sigma_2 = \alpha_1 \Delta e_2^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_3^e)$$

$$\Delta\sigma_3 = \alpha_1 \Delta e_3^e + \alpha_2 (\Delta e_1^e + \Delta e_2^e)$$

$$\alpha_1 = K + 4 \frac{G}{3} \quad (21)$$

$$\alpha_2 = K - 2 \frac{G}{3}$$

### ۵-۲. انتخاب مدل

در تعریف رفتار مکانیکی ناپیوستگی‌ها مدل‌های ساختاری متنوعی وجود دارند که در تحلیل‌های عددی مدلی که متناسب با شرایط ناپیوستگی و نوع مساله می‌باشد انتخاب می‌شود تا نتایج بدست آمده به واقعیت نزدیکتر باشد. مدل‌های ساختاری موجود در نرم‌افزار UDEC شامل تماس نقطه‌ای، تماس صفحه‌ای، تماس صفحه‌ای با تقلیل جابجایی، تسلیم مستمر و بارتون-بندیس می‌باشد. اگرچه مدل تسلیم مستمر برای مسائل تحلیل دینامیکی ارایه شده است ولی مدل موهر-کولمب نیز نتایج مناسبی برای این نوع تحلیل ارایه می‌دهد (Jan, 1996, Tang and Liu, 2012, Lin et al., 2012). مقایسه بین دو مدل رفتاری فوق نشان دهنده وجود تفاوت‌های بسیار جزئی در نتایج تحلیل می‌باشد که در مسائل بزرگ مقیاس این اختلاف به سمت صفر میل می‌کند. از آنجا که استفاده از روش موهر-کولمب سرعت انجام محاسبات را افزایش می‌دهد (Merifield et al., 2006, Saada et al., 2008, Tang and Liu, 2012) و مطالعات پیشین بیانگر قابل قبول بودن نتایج حاصل از بکارگیری مدل فوق می‌باشد، لذا در شبیه‌سازی رفتار درزه‌ها در این تحقیق از مدل فوق استفاده شده است (شریفی و همکاران، ۱۳۹۰).

که  $k$  شیب خط و وابسته به  $\sigma_1$ ،  $\sigma_3$  و مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشد. معیار موهر-کولمب خطی است اما از آنجا که سنگ نمی‌تواند تنش‌های کششی بزرگ را تحمل کند، یک حد کششی<sup>۱</sup> در آن وجود دارد (Hoek, 1990). در معیار موهر-کولمب مقادیر زاویه اصطکاک ( $\phi$ ) و چسبندگی ( $c$ ) از روابط ۱۶ و ۱۷ محاسبه می‌شوند.

$$\sin \phi = \frac{k-1}{k+1} \quad (16)$$

$$c = \frac{\sigma_c (1 - \sin \phi)}{2 \cos \phi} \quad (17)$$

یکی از دلایلی که معیار موهر-کولمب در مسائل مکانیک سنگ بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد، توصیف ریاضیاتی ساده است که کاربرد آن را آسان کرده است. همچنین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک نسبت به سایر پارامترهایی که در مهندسی ژئوتکنیک بکار می‌رود بیشتر در دسترس می‌باشد (Bowles, 1996, Merifield et al., 2006).

در این تحقیق با توجه به شرایط محیط ناپیوسته و نوع پارامترهای موجود، نرم‌افزار UDEC جهت این مدل‌سازی انتخاب شده است. در بکارگیری این مدل از مقادیر تنش‌های اصلی  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  استفاده شده است و تنش برون صفحه‌ای<sup>۲</sup> ( $\sigma_{zz}$ ) نیز به عنوان یکی از تنش‌های فوق در نظر گرفته شده است (شریفی و همکاران، ۱۳۸۵). مقادیر تنش‌های اصلی و جهت‌های اصلی از محتویات تانسور تنش مشخص می‌گردد (رابطه ۱۸). لازم به ذکر است که تنش‌های فشاری با علامت منفی می‌باشند.

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (18)$$

مقادیر کرنش‌های اصلی وابسته  $\Delta e_1$ ،  $\Delta e_2$  و  $\Delta e_3$  بصورت رابطه ۱۹ تجزیه می‌شوند.

$$\Delta e_i = \Delta e_i^e + \Delta e_i^p \quad i=1,3 \quad (19)$$

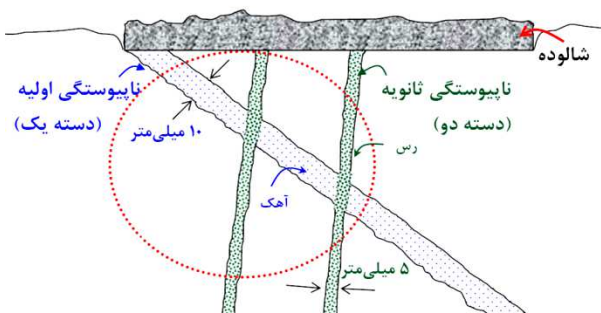
بالانویس‌های  $e$  و  $p$  به ترتیب به اجزای الاستیک و پلاستیک اشاره دارند که اجزای پلاستیک تنها در زمان جریان

1. Tension cut-off  
2. Out-of-plane stress

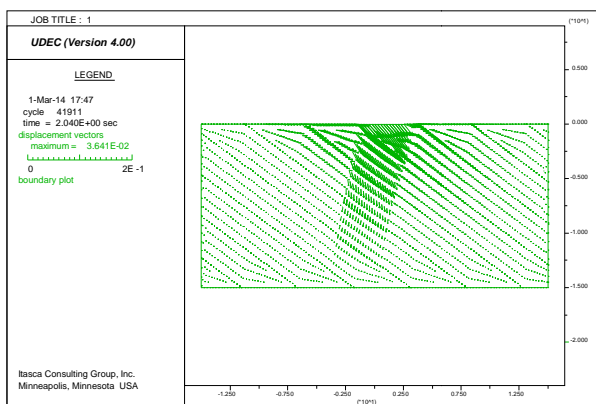


### ۳-۵. مدل‌سازی شرایط ساختگاه

مدل‌سازی با فرض حالت کرنش صفحه‌ای در حالت دو بعدی، در تقاطع عرضی عمود بر شالوده انجام شده است. همچنین در حل مدل فرض وجود شرایط کرنش صفحه‌ای نیز لحاظ شده است. شرایط مرزی زیر شالوده ثابت فرض شده و تنش‌های اولیه به صورت ثقلی و بر اساس وزن شالوده می‌باشد. در مدل فرض شده است که سنگ همگن و ایزوتروپ و از مدل گسیختگی موهر-کولمب تبعیت می‌کند. مدل ساخته شده دارای دو دسته درزه بوده و فاصله درزه‌ها در محدوده مورد بررسی تغییر نکرده است (شکل ۴ تا شکل ۶). سختی عمودی ۲۰۵ گیگاپاسکال بر متر و سختی برشی ۰.۸ گیگاپاسکال بر متر در نظر گرفته شده است. در واقع این مدل ساختاری پایه تعمیم قانون اصطکاک کولمب می‌باشد. این قانون به روشی مشابه هم در تماس بین بلوک‌های صلب و هم در تماس بین بلوک‌های تغییرشکل‌پذیر بکار می‌رود و در آن گسیختگی برشی و کششی در نظر گرفته شده است و اتساع درزه را نیز شامل می‌شود. در محدوده کشسان رفتار درز تابعی از سختی نرمال و برشی  $K_n$  و  $K_s$  آن می‌باشد. از نمو جابجایی در سطح تماس جهت محاسبه نمو الاستیک نیرو استفاده شده است.

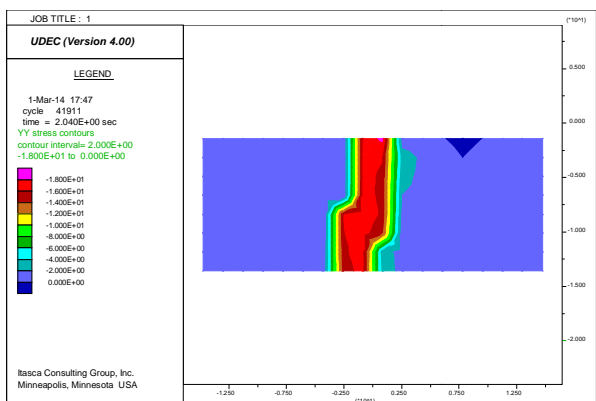


شکل ۵. جزئیات ناپیوستگی‌ها در مدل‌سازی

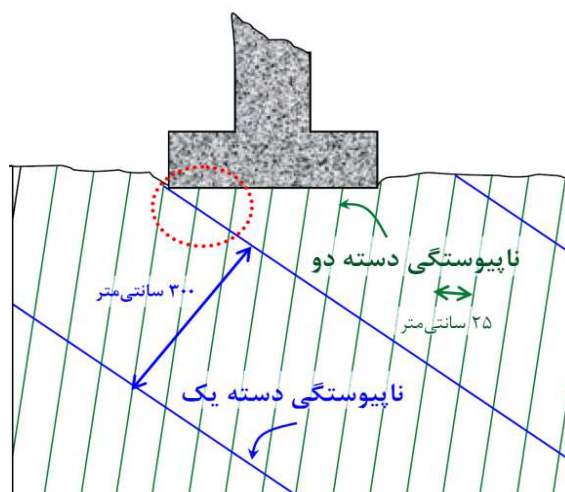


شکل ۶. مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در نرم افزار UDEC

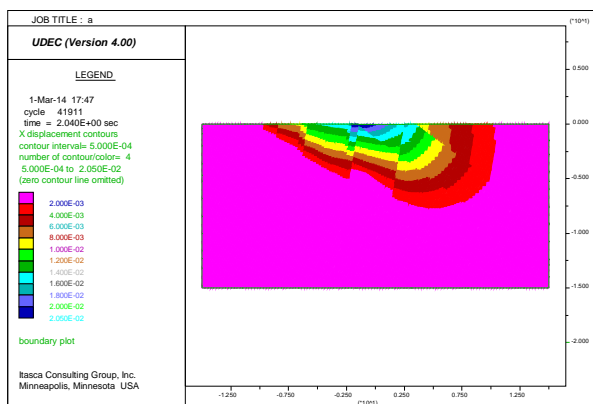
پس از مدل‌سازی هر دو دسته درز در نرم‌افزار UDEC، بارگذاری به عرض ۴ متر (عرض نوار فونداسیون) تا رسیدن به بیشینه نشست فونداسیون (۲/۵ سانتی‌متر) ادامه یافته، به طوری که نشست مذکور در تنش معادل ۱۸/۲ مگاپاسکال رخ داده است. شکل ۷ تا ۹ کانتورهای تنش، کرنش و جابجایی در جهت قائم را نشان می‌دهد.



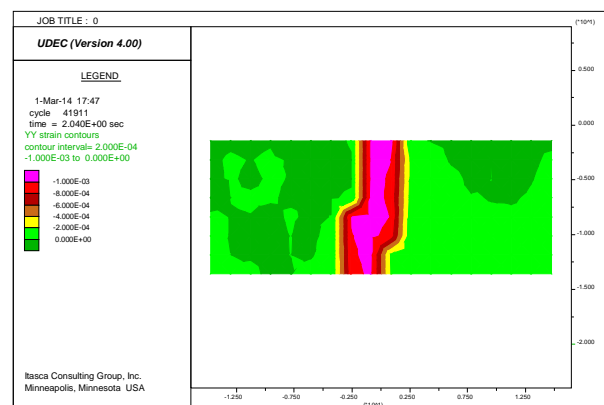
شکل ۷. کانتورهای تنش در جهت قائم



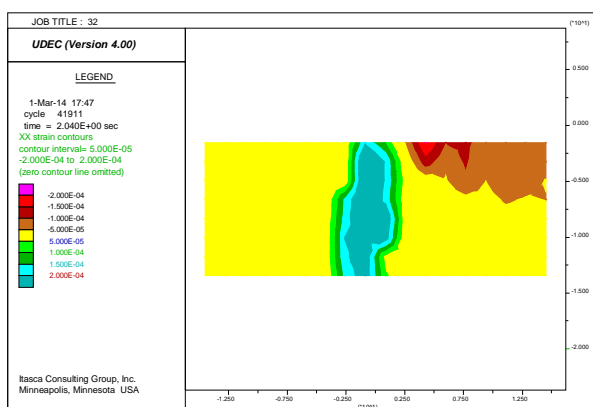
شکل ۸. شکل شماتیک شالوده و ناپیوستگی‌ها



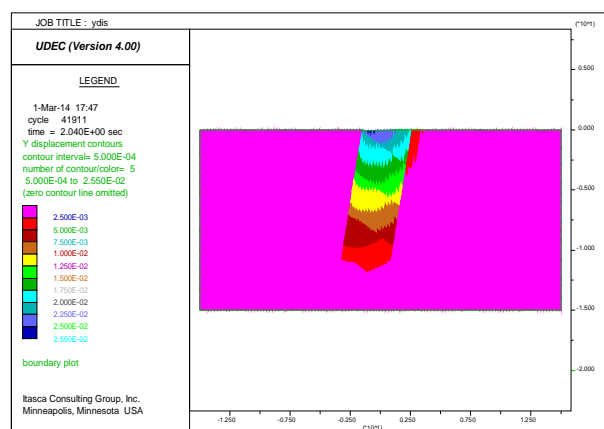
شکل ۱۰. کانتورهای جابجایی در جهت افقی



شکل ۸. کانتورهای کرنش در جهت قائم ( $\epsilon_{yy}$ )



شکل ۱۱. کانتورهای کرنش در جهت افقی ( $\epsilon_{xx}$ )



شکل ۹. کانتورهای جابجایی در جهت قائم

## ۶. نتیجه‌گیری

در بررسی‌های انجام شده در این تحقیق، ابتدا توالی لایه‌های زیر سطحی شناسایی و سپس آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی انجام شده است. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی، خواص مهندسی توده سنگ مورد طبقه‌بندی واقع شده و پارامترهای آن استخراج گردید. در این پروژه با توجه به ساختگاه سازه و پارامترهای تعیین شده، محاسبات ظرفیت باربری به روش تجربی و عددی انجام و نتایج آن ارائه شده است. نتایج نشان داد که روش‌های تجربی عمدتاً تنش محور بوده تا تغییر شکل محور و توانایی تعیین جابجایی و کرنش‌های رخ داده در اثر بارگذاری را ندارند. بنابراین آنچه برای یک سازه ساختمانی بسیار با اهمیت‌تر از تنش است، بحث تغییر شکل‌های مجاز است. در تعیین ظرفیت باربری به روش عددی، از مدل موهر- کولمب جهت تحلیل استفاده شده است. استفاده از

با توجه به مقاومت بالای سنگ بکر در هیچ نقطه از فونداسیون نشانه‌ای از خروج از فاز الاستیک و ورود به مرحله پلاستیک رویت نشد، عمده تغییر شکل‌ها به واسطه ناپیوستگی و حرکت در امتداد درزه‌ها می‌باشد. با توجه جهت اعمال بار و زاویه دسته درزه شماره دو، عمده نشست عمودی در طول این دسته درزه رخ داده است. این عامل به واسطه مسیر تنش‌های اعمالی و لغزش بر روی درزه‌های نزدیک به قائم می‌باشد. اما در دسته درزه شماره یک، بیشترین نشست و جابجایی در راستای نزدیک به افق بوده که ناشی از لغزش صفحات این دسته درزه بر روی هم می‌باشد. این عامل بر خلاف نشست و جابجایی در پی سازه ساخته شده بر روی خاک می‌باشد. با توجه به جابجایی افقی ۲ سانتی‌متری، در پی‌های خاکی این گونه لغزش افقی بر اثر بارگذاری عمودی دیده نمی‌شود. شکل ۱۰ تا ۱۱ کانتورهای جابجایی و کرنش در جهت افقی نشان داده شده است.

پیشنهاد می‌شود در مواجهه با سنگ‌های درزه‌دار و مقاوم در مباحث ظرفیت باربری، ضمن برداشت دقیق پارامترهای توده سنگ، مدل‌سازی عددی بسته به وزن ساختمان و ابعاد فونداسیون آن صورت گیرد. با توجه به اینکه در تمامی آیین‌نامه‌های ساختمانی بحث نشست مجاز مطرح گردیده و نشست افقی سازه بصورت صفر یا نزدیک به آن در نظر گرفته می‌شود، لازم است در چنین مواردی اثرات ثانویه این جابجایی‌های افقی بر سازه دیده و بررسی گردد. با توجه به احداث سازه در محیط‌های سنگی درزه‌دار شبیه شرایط ساختگاه مورد بررسی، جهت‌یابی دسته درزها و مشخصات مکانیکی آن نقش مهمی در نشست دارد. اگر چه ممکن است دسته درزها دارای پارامترهای مقاومتی مناسبی باشند، ولی بررسی و تحلیل آنها از اهمیت فوق‌العاده‌ای در بررسی تنش‌های مجاز و تغییر شکل‌های پی دارد.

روش موهر- کولمب سرعت انجام محاسبات را افزایش می‌دهد و مطالعات پیشین بیانگر قابل قبول بودن نتایج حاصل از بکارگیری مدل مذکور می‌باشد. لذا در شبیه‌سازی رفتار درزه‌ها در این تحقیق از مدل موهر- کولمب استفاده شده است. با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده و مقاومت بالای سنگ بکر، در هیچ نقطه از فونداسیون مورد مطالعه نشانه‌ای از خروج از فاز الاستیک و ورود به مرحله پلاستیک رویت نشد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های تجربی یک محدوده خاصی برای ظرفیت باربری پیشنهاد می‌دهند که برای کاربرد مهندسی نیاز به تصحیح داشته، در حالی که روش‌های عددی جزئیات بیشتری از توزیع بار در زیر پی را ارائه می‌دهند. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان داد که روش عددی جهت ساختارهای سنگی ناپیوسته به واقعیت و شرایط زمین نزدیکتر و نتایج آن قابل اعتمادتر است.

## منابع

- درویش زاده، ع.، ۱۳۷۰. زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، ص. ۸۲۳.
- شریفی، ج.، اردکانی، ع.ر.، ۱۳۹۰. بررسی تعیین ظرفیت باربری بر روی ساختار سنگی درزه‌دار، هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.
- شریفی، ج.، اسلامی، م.، اردشیری لاجیمی، س.، شریفی تشنیزی، ا.، ۱۳۸۵. تحلیل پایداری تونل انتقال آب چشمه لنگان با استفاده از روش عددی، یازدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی، مشهد، ص. ۲۶۵۶-۲۶۶۳.
- فهیمی‌فر، الف.، سروش، ح.، ۱۳۸۰. آزمایش‌های مکانیک سنگ (مبانی نظری و استانداردها)، جلد اول، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۹۲. آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ویرایش چهارم.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., 2011. Finite element model updating effects on nonlinear seismic response of arch dam-reservoir-foundation systems. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(2): 85–97.
- Bowles, J. E., 1996, *Foundation analysis and design*, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, Edition 5, pp. 1207.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*, John Wiley & Sons.
- Brady, B.H.G., Brown, E.T., 1985. *Rock Mechanics for Underground Mining*, 1st edn, Allen & Unwin: London.
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. *Engineering Classification and Index Properties of Intact Rock*. Technical Report No, AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Kirkland Air Force Base, New Mexico.
- Duncan C., Wyllie, 2005. *Foundations on Rock*, This edition published in the Taylor & Francis e-Library, pp 435
- Eduardo M., Bretas, P., José V., Lemos, 2012. 3D stability analysis of gravity dams on sloped rock foundations using the limit equilibrium method, *Computers and Geotechnics*, Volume 44, pp. 147–156
- Franklin, J.A., Pearson, D. 1985. *Rock engineering for construction of Science North*, Sudbury, Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 443–455.

- Goodman, R.E. 1980. Introduction to Rock Mechanics, Wiley, New York, pp. 305.
- Hoek, E., Bray, J. 1981. Rock Slope Engineering, 3rd edn. IMM, London.
- Hoek, E., 1990. Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek-Brown Criterion, Pergamon Press Plc.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1998. Practical Estimates Of Rock Mass Strength, Elsevier Science Ltd.
- Hudson, J.A. Priest, S.D. 1979. Discontinuities and rock mass geometry, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, 336-62.
- Imani, M., Fahimifar, A., Sharifzadeh, M., 2012. Bearing failure modes of rock foundations with consideration of joint spacing, Scientia Iranica, 19(6): 1411-1421.
- International Society for Rock Mechanics, 1981. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, Pergamon Press, UK.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., 1976. Fundamentals of Rock Mechanics, Chapman&Hall, London.
- Jan I.I., 1996. Short Descriptions of UDEC and 3DEC. Developments in Geotechnical Engineering, 79: 523-528.
- Ladanyi, B., 1977. Friction and end bearing tests on bedrock for high capacity socket design: Discussion. Canadian Geotechnical Journal, 14: 153-5.
- Lin, Y., Zhu, D., Deng, Q., He, Q., 2012. Collapse Analysis of Jointed Rock Slope Based on UDEC Software and Practical Seismic Load. Procedia Engineering, 31: 441-446.
- Look, B. G. 2007. Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables, Taylor & Francis Group, London, UK, pp 331.
- Merifield, R.S., Lyamin, A.V., Sloan, S.W., 2006. Limit analysis solutions for the bearing capacity of rock masses using the generalised Hoek-Brown criterion, Original Research Article. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(6): 920-937.
- Patton, F.D., Deere, D.U., 1970. Significant geological factors in rock slope stability, Proceeding of Symposium on Planning Open Pit Mines, Johannesburg, Balkema, Amsterdam, pp. 143-51.
- Peck, R.B., Hanson, W.E. Thornburn, T.H., 1974. Foundation Engineering, Wiley, New York, pp. 361.
- Priest, S.D. Hudson, J.A., 1976. Discontinuity spacings in rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract, 13: 135-48.
- Saada, Z., Maghous, S., Garnier, D., 2008. Bearing capacity of shallow foundations on rocks obeying a modified Hoek-Brown failure criterion, Original Research Article. Computers and Geotechnics, 35(2): 144-154.
- Serrano, A., Olalla, C., 2002. Ultimate bearing capacity at the tip of a pile in rock—part 1: theory. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(7): 833-846.
- Souley, M., Homand, F., 1996. Stability of jointed rock masses evaluated by UDEC with an extended Saeb-Amadei constitutive law. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 33(3): 233-244.
- Tang, J., Liu Y., 2012. Bearing Capacity Calculation of Rock Foundation based on Nonlinear Failure Criterion. IERI Procedia, 1: 110-116.
- Waltham, A.C., 2004. Bearing capacity of rock over mined cavities in Nottingham. Engineering Geology, 75(1): 15-31.
- Wang, J.T., 2011. Investigation of damping in arch dam-water-foundation rock system of Mauvoisin arch dam. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(1): 33-44.
- Zhao, X.B., Zhao, J., Cai, J.G., Hefny, A.M., 2008, UDEC modelling on wave propagation across fractured rock masses. Computers and Geotechnics, 35(1): 97-104.