

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

بررسی تأثیر پرکننده‌ها و زبری سطوح درزه‌ها بر مقاومت سنگ‌های درزه‌دار

ارائه دهنده:

مسعود زارع نقدهی

اساتید راهنما:

دکتر سید رحمان ترابی

دکتر رضا خالوکاکائی

استاد مشاور:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

شهریور ۱۳۸۶

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

- 1) **Zare Naghadehi, M.**, Torabi, S. R. & KhaloKakaie, R. 2007. *Studying the Effect of Mechanical Properties of Discontinuities on the Slope Stability in Part of Angouran Open Pit Mine, IRAN*. Proceedings of the 7th International Scientific Conference SGEM. p. 58. (Published)
- 2) **Zare Naghadehi, M.**, Torabi, S. R. & KhaloKakaie, R. *The Effect of Natural Filling Material on the Shear Strength of Rock Discontinuities and Stability of Slopes; Case Study: Rock Slopes at Khosh Yeylagh Main Road*. The 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes. June 30 ~July 4, 2008, Xi'an, China. (Abstract Approved and Manuscript Submitted)
- 3) **Zare Naghadehi, M.**, Torabi, S. R., KhaloKakaie, R. & Jalali S. M. E. *Experimental Investigation of Parallel Influence of Surface Roughness and Infill Material on the Peak and Residual Shear Strength of Natural Rock Joints*. 1th International Conference on Geotechnical Engineering. March 28-30, 2008. Tunis, Tunisia. (Abstract Approved)
- 4) **Zare Naghadehi, M.** & Torabi, S. R. *The Effect of Moisture on the Stability of Rock Slopes; An Experimental Study on Rock Slopes of Khosh Yeylagh Main Road, Iran*. 1st International Conference on Transportation Geotechnics 25-27 August 2008 University of Nottingham, UK. (Abstract Approved)
- 5) **Zare Naghadehi, M.**, Torabi, S. R., KhaloKakaie, R. & Jalali S. M. E. *A New Empirical Model to Prediction the Shear Strength of Natural Infilled Rock Joints under Constant Normal Load (CNL) Conditions*. Submitted to Journal of Engineering Geology. (Under Referee)

تقدیم به

روح پاک پدرم...

و

دستان پرمهر مادر عزیزم.

تقدیر و تشکر

از تمام کسانی که به نحوی مرا در انجام و به اتمام رساندن این پایان‌نامه یاری نمودند، کمال تشکر و سپاس را دارم. در ابتدا از استاد راهنمای اولم جناب آقای دکتر ترابی که وظیفه راهنمایی و نظارت بر مراحل تحقیق را به نحو احسن به انجام رساندند، نهایت تشکر را دارم. همچنین از استاد راهنمای دوم و مشاورم آقایان دکتر کاکایی و دکتر جلالی به دلیل زحماتشان تشکر می‌کنم. از مسئولین آزمایشگاه‌های مکانیک سنگ و کانه‌آرایی آقایان مهندس زیاری و مهندس کبیریان به خاطر همکاری‌های بی‌دریغ سپاسگزارم. از مهندس شروین رحیم‌زاده به دلیل کمک‌های بسیار در بخش تحلیل‌های آماری، مهندس کامران مرادی برای کمک در ارائه ایده‌های نو و مهندس بهشاد جدیری و مهندس امیر زنده‌دل به خاطر همیاری‌های فکری نهایت تقدیر و تشکر را دارم.

در انتها نیز از مانیاس ناگی دانشجوی دکترای دانشگاه ولنگنگ استرالیا به دلیل راهنمایی‌های بسیار در بخش طراحی آزمایش و کمک در حل مشکلات به وجود آمده بسیار سپاسگزارم.

چکیده

تقریباً تمامی سنگ‌ها به جز در اعماق بسیار زیاد، به طور طبیعی دارای شکستگی‌ها و درزه‌هایی هستند که رفتار مکانیکی آن‌ها اغلب توسط همین درزه‌های درون سنگ و پارامترهای مربوط به آن نظیر شکل، اندازه، وجود پرکننده، تعداد، نحوه توزیع و مقاومت نقاط تماس بین دیواره‌ها کنترل می‌شود. در این میان، تاثیر پرکننده‌ها بر مقاومت درزه‌ها و در نهایت تضعیف توده‌سنگ بسیار چشمگیر می‌باشد. از آنجا که در اکثر قریب به اتفاق موارد، شکست سنگ در محل به علت برش است، بنابراین مقاومت برشی سنگ به عنوان اصلی‌ترین معیار مقاومتی در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق تاثیر همزمان دو پارامتر زبری سطح درزه و حضور ماده پرکننده در فصل مشترک سطوح بر مقاومت برشی درزه‌های سنگی طبیعی به صورت تجربی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور پس از بررسی‌های اولیه، شیب‌های سنگی واقع در جاده ارتباطی شاهرود- آزادشهر به عنوان منطقه مورد نظر انتخاب شد و با انجام نمونه‌برداری‌های سنگی- خاکی و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه مکانیک سنگ، آزمایش‌های مقاومت برشی در شرایط مختلف بار عمودی و پرکننده بر روی نمونه‌ها انجام گردید. در انتها پس از تحلیل نتایج حاصله، با انجام کار آماری بر روی داده‌های آزمایشگاهی و مقایسه پارامترهای آماری مختلف حاصل از برازش توابع گوناگون بر این داده‌ها، با در نظر گرفتن حداقل خطاها، یک معیار تجربی برای پیش‌بینی رفتار و تخمین مقاومت برشی درزه‌های پرشده ارائه شد که با انجام اعتبارسنجی تجربی، دقت مدل تا حد بسیاری تایید گردید. از بررسی‌های اولیه چنین نتیجه‌گیری شد که مدل پیشنهادی تا حد بسیاری قادر است با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به زبری سطح درزه، رفتار برشی درزه پرشده در شرایط بارگذاری سطحی را پیش‌بینی نماید.

کلمات کلیدی: سنگ‌های درزه‌دار، مقاومت برشی، زبری سطح درزه، مواد پرکننده، معیار تجربی.

الف.....	چکیده.....
ب.....	فهرست مطالب.....
ز.....	فهرست شکل‌ها.....
م.....	فهرست جداول.....
س.....	فهرست علائم و نشانه‌ها.....

فصل اول: کلیات

۲.....	۱-۱- مقدمه.....
۴.....	۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده.....
۱۲.....	۱-۳- تحقیقات مرتبط در حال انجام.....
۱۲.....	۱-۴- اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام آن.....
۱۴.....	۱-۵- سازماندهی پایان‌نامه.....

فصل دوم: رفتار مکانیکی محیط‌های سنگی درزه‌دار

۱۸.....	۱-۲- مقدمه.....
۱۹.....	۲-۲- آزمایش‌های بررسی خواص مکانیکی درزه‌ها.....
۱۹.....	۲-۲-۱- آزمایش برش مستقیم برجا.....
۲۱.....	۲-۲-۲- آزمایش برش مستقیم در آزمایشگاه.....
۲۲.....	۲-۲-۳- آزمایش برش سه محوری در آزمایشگاه.....
۲۳.....	۲-۳- خواص تغییرشکل پذیری درزه‌ها.....

۳۱	۴-۲- معیارهای مقاومت برشی درزه‌ها
۳۱	۲-۴-۱- خاستگاه مقاومت برشی
۳۲	۲-۴-۲- معیار پانتون
۳۴	۲-۴-۳- معیار بارتون
۳۵	۲-۴-۴- معیار تجربی جی گر
۳۷	۲-۴-۵- معیار تجربی لادانی و آرچامبولت

فصل سوم: نقش مواد پرکننده و زبری سطح در رفتار درزه‌ها

۴۲	۳-۱- مقدمه
۴۳	۳-۲- انواع پرکننده‌ها و مشخصات آن‌ها
۴۴	۳-۳- نقش پرکننده‌ها در تعیین مقاومت برشی درزه‌ها
۴۶	۳-۴- عوامل کنترل کننده مقاومت برشی درزه‌های پر شده
۴۸	۳-۴-۱- نوع و ضخامت ماده پرکننده
۵۵	۳-۴-۲- اندرکنش سطح سنگ- ماده پرکننده
۵۶	۳-۴-۳- زبری سطح درزه و شرایط مرزی مواد پرکننده
۵۹	۳-۴-۴- تاثیر شرایط زهکشی
۵۹	۳-۴-۵- تاثیر سختی خارجی (سختی دستگاه برش)
۶۰	۳-۴-۶- تاثیر مقیاس

فصل چهارم: معرفی منطقه مورد مطالعه

۶۲	۱-۴- مقدمه
۶۲	۲-۴- انتخاب منطقه نمونه برداری
۶۵	۳-۴- معرفی منطقه خوش بیلاق
۶۵	۱-۳-۴- موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه
۶۷	۲-۳-۴- ریخت شناسی و ارتفاعات موجود در منطقه
۶۸	۳-۳-۴- سازندهای تشکیل دهنده منطقه برداشت نمونه
۶۸	۱-۳-۳-۴- سازند پادها (D_p)
۶۹	۴-۳-۴- گسل های موجود در منطقه
۷۰	۵-۳-۴- زمین شناسی ساختمانی و تکتونیک منطقه

فصل پنجم: مطالعات آزمایشگاهی

۷۲	۱-۵- مقدمه
۷۲	۲-۵- مراحل انجام کارهای آزمایشگاهی
۷۴	۳-۵- آماده سازی نمونه ها
۷۶	۴-۵- اندازه گیری زبری سطح درزه ها
۸۳	۵-۵- مواد پرکننده
۸۳	۱-۵-۵- نمونه برداری، آنالیز و آماده سازی خاک
۸۵	۲-۵-۵- اضافه کردن پرکننده ها به سطوح درزه ها

۸۹	..... ۵-۶- تعیین مقاومت برشی مستقیم نمونه‌ها
۹۲	..... ۵-۷- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل جواب‌ها
۹۴	..... ۵-۷-۱- نمودارهای تنش برشی- جابجائی برشی
۹۸	..... ۵-۷-۲- نمودارهای تنش برشی- تنش عمودی
۱۰۲	..... ۵-۷-۳- مروی بر نتایج به دست آمده
فصل ششم: ارائه معیار تجربی جدید برای تخمین مقاومت برشی درزه های پر شده	
۱۰۴	..... ۶-۱- مقدمه
۱۰۵	..... ۶-۲- مروی بر معیارهای ارائه شده قبلی
۱۰۵	..... ۶-۲-۱- معیار لاما
۱۰۶	..... ۶-۲-۲- معیار فین وچ
۱۰۷	..... ۶-۲-۳- معیار دتولدو و دفریتاس
۱۰۹	..... ۶-۲-۴- معیار پاپالیانگاس
۱۱۱	..... ۶-۳- ارائه یک معیار تجربی جدید بر پایه مطالعات آزمایشگاهی انجام شده
۱۱۲	..... ۶-۳-۱- داده‌های آزمایشگاهی مورد نظر
۱۱۴	..... ۶-۳-۲- بررسی توابع مختلف از نظر قابلیت برآزش بر داده‌های آزمایشگاهی
۱۲۰	..... ۶-۳-۳- به دست آوردن معادله معیار پیشنهادی بر اساس بهترین برآزش
۱۲۵	..... ۳-۴-۶- اعتبارسنجی تجربی مدل ارائه شده

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۷- جمع‌بندی مطالب و نتیجه‌گیری ۱۳۲

۲-۷- پیشنهادات ۱۳۶

فهرست منابع

فهرست منابع فارسی ۱۴۰

فهرست منابع انگلیسی ۱۴۰

پیوست الف

الف-۱- تعیین JRC با استفاده از مدل‌های استاندارد ۱۴۷

الف-۲- تعیین JRC با استفاده از سطح شیب‌دار (Tilt Test) ۱۴۹

الف-۳- تعیین JRC در صحرا ۱۵۰

الف-۴- تعیین JRC با استفاده از Z_2 ۱۵۱

الف-۵- استفاده از هندسه فرکتال در تعیین زبری درزه ۱۵۲

- شکل ۱-۱- فلوجارت روش انجام کار و مراحل مختلف پروژه..... ۱۶
- شکل ۱-۲- آزمایش برش مستقیم برجا (Wittke, 1990) ۲۰
- شکل ۲-۲- شماتیک جعبه برش قابل حمل و اجزای تشکیل‌دهنده آن (Selvadurai & Yu, 2005) ۲۱
- شکل ۳-۲- آزمایش برش سه محوری برای تعیین مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها (Brady & Brown, 1993) ۲۲
- شکل ۴-۲- منحنی‌های تنش برشی- جابجائی برشی، الف- منحنی واقعی تنش برشی- جابجائی برشی تحت تنش عمودی ثابت، ب- منحنی ایده‌آل شده تنش برشی- جابجائی برشی تحت تنش عمودی ثابت (Saeb & Amadei, 1992) ۲۵
- شکل ۵-۲- دامنه‌ای از مقادیر مختلف K_s (Barton, 1976) ۲۷
- شکل ۶-۲- مدل‌های رفتار برشی درزه؛ الف- مدل با سختی برشی ثابت، ب- مدل با تغییر مکان برشی ماکزیمم ثابت (Barton, 1973) ۲۸
- شکل ۷-۲- مفهوم اتساع در درزه‌های سنگی در تنش عمودی پائین (Morris, 2003) ۲۹
- شکل ۸-۲- پوش شکست دو خطی برای سطوح در معیار پاتون (Patton, 1966) ۳۳
- شکل ۹-۲- معیار دوخطی پاتون برای مقاومت برشی درزه‌ها (Hoek, 2000) ۳۳
- شکل ۱۰-۲- طبقه‌بندی زبری و پیش‌بینی مقاومت برشی برای درزه‌های غیرصفحه‌ای (Barton, 1973) ۳۵
- شکل ۱۱-۲- رابطه تجربی مقاومت برشی جی‌گر (Jeager, 1979) ۳۶
- شکل ۱۲-۲- رابطه مقاومت برشی لادانی و آرچامبولت برای درزه‌های زبر (Ladanyi & Archambault, 1970) ۴۰
- شکل ۱۳-۲- مقایسه معیارهای مقاومت برشی درزه‌ها در انتقال از اتساع به برش (Grasselli, 2001) ۴۰

- شکل ۱-۳- مقاومت برشی درزه پرشده با میکا تحت تنش عمودی ۷۴۶ کیلوپاسکال با نسبت‌های t/a مختلف (Goodman, 1970)..... ۴۹
- شکل ۲-۳- مقاومت برشی درزه‌های پرشده با کائولن تحت تنش عمودی ۸/۶۸ مگاپاسکال با زوایای ناهمواری مختلف (Ladanyi & Archambault, 1977)..... ۵۰
- شکل ۳-۳- تغییرات مقاومت برشی درزه‌های پرشده با کائولن با افزایش نسبت t/a ، تحکیم یافته در تنش عمودی ۳۵۰ کیلوپاسکال (Lama, 1978)..... ۵۱
- شکل ۴-۳- تاثیر نسبت t/a بر مقاومت برشی حداکثر درزه‌ها (Phien-Wej et al, 1990)..... ۵۲
- شکل ۵-۳- نمودارهای تنش برشی- جابجائی برشی برای نسبت‌های مختلف t/a (Papaliangas et al, 1993)..... ۵۳
- شکل ۶-۳- تغییرات تنش برشی حداکثر با نسبت‌های مختلف t/a در شرایط CNL (Papaliangas et al,) (1993)..... ۵۳
- شکل ۷-۳- تغییرات مقاومت برشی درزه و خاک پرکننده با نسبت ضخامت نسبی t/a در تنش عمودی ۱ مگاپاسکال (DeToledo & DeFreitas, 1993)..... ۵۴
- شکل ۸-۳- تمرکز تنش در درزه پرشده (DeToledo & DeFreitas, 1993)..... ۵۶
- شکل ۹-۳- سطح تماس درزه سنگی- ماسه، الف- سطح زبر، ب- سطح صاف و تاثیر ضعیف‌کنندگی درزه (DeToledo & DeFreitas, 1993)..... ۵۸
- شکل ۱-۴- نمونه‌ای از رخساره شیب‌های سنگی واقع در گردنه خوش‌بیلاق..... ۶۴
- شکل ۲-۴- نمونه‌ای از پرشدگی مشاهده شده در درزه‌های منطقه الف- درزه بسته، ب- درزه باز شده..... ۶۴
- شکل ۳-۴- موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن (مؤسسه جغرافیایی ایران، ۱۳۸۰)..... ۶۶

شکل ۵-۱۵- جعبه برش مورد استفاده به همراه تجهیزات مربوط به آن، (الف) جعبه برش، (ب) سیستم هیدرولیکی اعمال بارهای قائم و برشی، (ج) سیستم نیوماتیکی CNL، (د) گیج برای قرائت جابجائی برشی در حین آزمایش	۹۱
شکل ۵-۱۶- شکل ایده‌آل نمودارهای مربوط به مقاومت برشی درزه‌ها، الف- نمودار تنش برشی- جابجائی برشی، ب- نمودار مقاومت برشی-تنش عمودی (پوش مقاومت برشی) (Barton, 1976)	۹۳
شکل ۵-۱۷- نمودار تنش برشی- جابجائی برشی مربوط به پرکننده ماسه- رسی، الف- تنش عمودی ۰/۲۵ مگاپاسکال، ب- تنش عمودی ۰/۵ مگاپاسکال، ج- تنش عمودی ۰/۷۵ مگاپاسکال، د- تنش عمودی ۱ مگاپاسکال	۹۵
شکل ۵-۱۸- نمودار تنش برشی- جابجائی برشی مربوط به پرکننده ماسه‌ای، الف- تنش عمودی ۰/۲۵ مگاپاسکال، ب- تنش عمودی ۰/۵ مگاپاسکال، ج- تنش عمودی ۰/۷۵ مگاپاسکال، د- تنش عمودی ۱ مگاپاسکال	۹۶
شکل ۵-۱۹- نمودار تنش برشی- جابجائی برشی مربوط به پرکننده رسی، الف- تنش عمودی ۰/۲۵ مگاپاسکال، ب- تنش عمودی ۰/۵ مگاپاسکال، ج- تنش عمودی ۰/۷۵ مگاپاسکال، د- تنش عمودی ۱ مگاپاسکال	۹۷
شکل ۵-۲۰- نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب تنش عمودی (پوش مقاومت برشی) برای پرکننده ماسه- رسی با ضخامت‌های مختلف	۹۹
شکل ۵-۲۱- نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب تنش عمودی (پوش مقاومت برشی) برای پرکننده ماسه‌ای با ضخامت‌های مختلف	۹۹

شکل ۵-۲۲- نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب تنش عمودی (پوش مقاومت برشی) برای پرکننده رسی با	
ضخامت‌های مختلف.....	۱۰۰
شکل ۶-۱- نحوه تغییر مقاومت برشی با میزان پرکننده موجود در مدل فین ویج (Phien-Wej et al, 1990).....	۱۰۶
شکل ۶-۲- معیار ارائه شده توسط دتولدو و دفریتاس برای مقاومت درزه‌های پر شده (DeToledo &	
..... (DeFreitas, 1993)	۱۰۸
شکل ۶-۳- مدل ارائه شده توسط پاپالیانگاس و همکارانش برای تخمین مقاومت برشی درزه‌های پر شده	
..... (Papaliangas et al, 1993)	۱۱۱
شکل ۶-۴- داده‌های آزمایشگاهی اولیه مربوط به درزه‌های پر شده با مخلوط طبیعی ماسه- رس	۱۱۳
شکل ۶-۵- داده‌های آزمایشگاهی اولیه مربوط به درزه‌های پر شده با ماسه.....	۱۱۳
شکل ۶-۶- داده‌های آزمایشگاهی اولیه مربوط به درزه‌های پر شده با رس.....	۱۱۴
شکل ۶-۷- منحنی‌های برازش شده تابع گویا مربوط به پرکننده مخلوط طبیعی ماسه-رس.....	۱۲۱
شکل ۶-۸- منحنی‌های برازش شده تابع گویا مربوط به پرکننده ماسه‌ای.....	۱۲۱
شکل ۶-۹- منحنی‌های برازش شده تابع گویا مربوط به پرکننده رسی.....	۱۲۲
شکل ۶-۱۰- مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط گودمن (۱۹۷۰) و محاسبه شده با مدل ارائه شده	
.....	۱۲۶
شکل ۶-۱۱- شکل ۶-۱۱- مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط لاما (۱۹۷۸) و محاسبه شده با مدل	
جدید.....	۱۲۷

- شکل ۶-۱۲- مقایسه سه سری از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط فین وج (۱۹۹۰) و محاسبه شده با مدل جدید..... ۱۲۷
- شکل ۶-۱۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط دتولدو و دفريتاس (۱۹۹۳) و محاسبه شده با مدل جدید..... ۱۲۸
- شکل ۶-۱۴- نمونه‌ای از محدوده پیش‌بینی مدل برای پرکننده ماسه- رسی تحت تنش قائم ۰/۲۵ مگاپاسکال.. ۱۲۹
- شکل الف-۱- پروفیل زبری و مقادیر JRC مربوط به آن (Barton & Choubey, 1977)..... ۱۴۸
- شکل الف-۲- تعیین JRC با استفاده از سطح شیب‌دار ۱۴۹
- شکل الف-۳- تعیین مقدار JRC در صحرا (Barton & Bandis, 1982)..... ۱۵۰

جدول ۱-۱- خلاصه‌ای از مهم‌ترین تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر روی تاثیر پرکننده‌ها.....	۱۱
جدول ۱-۳- تاثیر شرایط مرزی بر مقاومت درزه‌های پرشده (Kanji, 1974).....	۵۷
جدول ۱-۵- اطلاعات اولیه مربوط به نمونه‌ها.....	۸۰
جدول ۲-۵- نتایج مربوط به آزمایش چکش اشمیت.....	۸۱
جدول ۳-۵- نتایج مربوط به آزمایش سطح شیب‌دار و تعیین ضریب زبری سطح درزه.....	۸۲
جدول ۴-۵- معادلات به دست آمده برای پوش‌های مقاومت برشی درزه‌های پرشده با توجه به معیار مور-	
کولمب در نسبت‌های t/a مختلف.....	۱۰۱
جدول ۱-۶- مقدار پارامتر SSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه- رسی.....	۱۱۶
جدول ۲-۶- مقدار پارامتر R-Square برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه- رسی.....	۱۱۶
جدول ۳-۶- مقدار پارامتر RMSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه- رسی.....	۱۱۷
جدول ۴-۶- مقدار پارامتر SSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه‌ای.....	۱۱۷
جدول ۵-۶- مقدار پارامتر R-Square برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه‌ای.....	۱۱۸
جدول ۶-۶- مقدار پارامتر RMSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه‌ای.....	۱۱۸
جدول ۷-۶- مقدار پارامتر SSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده رسی.....	۱۱۹
جدول ۸-۶- مقدار پارامتر R-Square برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده رسی.....	۱۱۹
جدول ۹-۶- مقدار پارامتر RMSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده رسی.....	۱۲۰
جدول ۱۰-۶- مقادیر ضرایب ثابت پیشنهادی در مدل ارائه شده مربوط به انواع پرکننده‌های آزمایش شده.....	۱۲۴
جدول ۱۱-۶- مقادیر RMSE مربوط به هریک از مقایسه‌ها و میانگین کل آن‌ها.....	۱۲۸

جدول الف-۱- رابطه بین J_r و JRC برای نمونه‌های ۲۰۰ میلی‌متری و ۱۰۰۰ میلی‌متری (Barton &

۱۴۸..... (Choubey, 1977

A	مساحت سطح برش در آزمایش برش برجا
a	ارتفاع متوسط ناهمواری‌ها (زبری متوسط درزه)
a_s	مساحت تحت برش دندانها
b	شیب نمودار تجربی جی‌گر
C	چسبندگی سطح درزه
c	ضریب ثابت
C_D	چسبندگی ناپیوستگی در برش سه محوری
C_j	عرض از مبدا پوش مقاومت برشی جی‌گر
F	نیروی موازی با جهت لغزش درزه
i	زاویه شیب دندانهای سطح درزه
k_n	سختی نرمال درزه
k_s	سختی برشی درزه
k_1 و k_2	ضرایب ثابت
m	تعداد نمونه‌گیری‌ها
N	نیروی عمودی در آزمایش برش برجا
n	نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی سنگ بکر
P	اختلاف عرض از مبدا نقاط روی خط مجانب و مقاومت‌های برشی
R	عدد واجهش چکش اشمیت برای سنگ هوانزده خشک
r	عدد واجهش چکش اشمیت برای دیواره درزه اشباع شده
S_R	مقاومت برشی سنگ بکر
T	نیروی برشی در آزمایش برش برجا
t	ضخامت ماده پرکننده
t_{crit}	ضخامت بحرانی ماده پرکننده
t/a	ضخامت نسبی پرکننده
U_p	جابجایی برشی در نقطه مقاومت حداکثر
U_r	جابجایی برشی در مقاومت ماندگار
V^0	نرخ اتساع در مقاومت برشی حداکثر
Δx	فاصله نمونه‌گیری‌ها
Z_2	ریشه متوسط مربع مشتق اول پروفیل
α	زاویه تمایل سطح شیب‌دار در لحظه لغزش
α_1	زاویه نیروی برشی در آزمایش برش برجا
μ	ضریب اصطکاک
v	جابجایی عمودی
Δv	افزایش جزئی در جابجایی عمودی

σ_c	مقاومت فشاری سنگ
σ_3	تنش جانبی در آزمایش سه محوری
σ_n	تنش قائم وارد بر درزه
σ_T	تنش انتقالی
τ	مقاومت برشی سطح درزه
τ_p	مقاومت برشی حداکثر سطح درزه
τ_r	مقاومت برشی ماندگار سطح درزه
τ_{max}	حداکثر مقاومت برشی درزه خالی
τ_{min}	کمترین مقاومت برشی با ضخامت پرکننده بحرانی
$\Delta\tau_p$	مقدار کاهش مقاومت ناشی از حضور پرکننده
τ_p / σ_n	مقاومت برشی نرمالایز شده درزه پر شده
$(\tau_p / \sigma_n)_{clean}$	مقاومت برشی نرمالایز شده درزه خالی
ϕ_b	زاویه اصطکاک پایه سطح درزه
ϕ_D	زاویه اصطکاک ناپیوستگی در برش سه محوری
ϕ_r	زاویه اصطکاک ماندگار سطح درزه
ϕ_u	زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه
ASTM	انجمن آزمایش‌ها و مصالح امریکا
CNL	بار قائم ثابت
CNS	سختی قائم ثابت
ISRM	انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ
JCS	مقاومت فشاری دیواره درزه
JRC	ضریب زبری سطح درزه
PFA	خاکستر آتشفشانی سائیده شده
RMS	روش ریشه متوسط مربع
RMSE	مجذور میانگین مربعات خطاها
R-Square	مربع همبستگی میان داده‌ها
SF	تابع ساختاری
SSE	مجموع مربعات خطا
WAM	روش پنجره میانگین ریز زاویه

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

از مکانیک سنگ به عنوان علمی یاد می‌شود که با خصوصیات سنگ‌ها و روش‌های مورد نیاز برای طراحی ساختارهای سنگی سر و کار دارد. فرآیند طراحی در سنگ از نظم مربوط به خود برخوردار می‌باشد که به هیچ وجه شبیه به سایر مواد و تحلیل‌های مهندسی مربوط به آن‌ها نیست. به دلیل اینکه ساختارهای سنگی، مدل‌های متفاوت و انواع مختلفی از شکست را می‌توانند تجربه کنند، تعیین مقاومت آن‌ها علاوه بر اندازه‌گیری دقیق، نیازمند قضاوت‌های آگاهانه نیز می‌باشد. تقریباً تمامی سنگ‌ها - به جز در اعماق بسیار زیاد- به طور طبیعی دارای شکستگی‌ها و درزه‌هایی هستند که رفتار مکانیکی آن‌ها اغلب توسط همین درزه‌های درون سنگ کنترل می‌شود. بنابراین برای تعیین خصوصیات سنگ‌ها، به بررسی دقیق انواع سست‌شدگی‌ها در آن‌ها نیازمندیم.

از آنجا که در اکثر قریب به اتفاق موارد، شکست سنگ در محل به علت برش است، بنابراین در اینجا نیز مقاومت برشی سنگ به عنوان معیار مقاومت آن در نظر گرفته شده است. با توجه به رفتار مکانیکی، یکی از مهم‌ترین اثرات یک شکستگی در توده‌سنگ، کاهش مقاومت برشی آن در جهت موازی با صفحه شکستگی می‌باشد. شکل، اندازه، وجود پرکننده، تعداد، نحوه توزیع و مقاومت نقاط

تماس بین دیواره‌های درزه، خصوصیات مکانیکی آن را کنترل می‌کنند. بنابراین انتخاب یک معیار مقاومت برشی بخصوص برای درزه‌های سنگ، مستلزم درک درست و دقیقی از مفاهیم پایه‌ای شکست برشی می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که این انتخاب نیازمند آگاهی از فاکتورهایی است که بر خصوصیات مقاومت برشی توده‌سنگ تأثیر می‌گذارند. در حقیقت هدف کلی و اصلی چنین تحقیقی گسترش این آگاهی‌ها و نیز درک صحیح از موضوع مقاومت برشی درزه‌ها و بررسی برخی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی آن است.

روش معمول در طراحی سازه‌های سنگی و تحلیل پایداری توده‌های سنگی اغلب با موقعیت‌سنجی، برداشت و به نقشه در آوردن ناپیوستگی‌های موجود و ارزیابی مقاومت و رفتار تغییرشکل پذیری آن‌ها آغاز می‌شود. تعیین پارامترهای مکانیکی درزه‌های سنگی صرفاً نه یک مسئلهٔ تحلیلی بلکه مستلزم کارهای تجربی است که بایستی به صورت سازمان‌یافته و گسترده انجام پذیرد (Welideniya, 2005). در این میان می‌توان از پرکنندهٔ درزه‌ها به عنوان یکی از موثرترین پارامترها یاد کرد که مطالعهٔ نحوهٔ تأثیر آن از اهمیت وافری برخوردار است. در این تحقیق سعی شده است تأثیر همزمان دو پارامتر مهم زبری سطح درزه و حضور پرکننده در فصل مشترک سطوح به صورت تجربی و آزمایشگاهی مطالعه و بررسی گردد.

در این فصل ابتدا مروری بر کارها و تحقیقات انجام شدهٔ قبلی و در حال انجام داشته و سپس به تشریح بیشتر اهداف و ضرورت انجام این تحقیق پرداخته خواهد شد. در انتهای فصل نیز سازماندهی کلی پایان‌نامه آورده شده و مراحل مختلف پروژه به صورت یک فلوجارت نشان داده شده است.

۱-۲- مروری بر کارهای انجام شده

پس از اینکه پاتون^۱ در سال ۱۹۶۶ معیار دوخطی خود را در مورد رفتار برشی سطوح ناپیوستگی‌های سنگی ارائه داد (Patton, 1966)، دید وسیع‌تری نسبت به درزه‌های سنگی و خواص و اثرات آن‌ها در توده‌سنگ‌ها به وجود آمد. از آن پس محققان بسیاری در مورد خصوصیات درزه‌ها و نقش آن‌ها در رفتار سنگ‌ها به تحقیق پرداختند. این موضوع در مورد مسئله مواد پرکننده نیز صادق بوده است، به طوری که از سال ۱۹۶۷ تاکنون تقریباً ۳۱ مورد تحقیق مستقل بر روی مسائل مختلف مربوط به مواد پرکننده انجام شده است. این پایان‌نامه در واقع سی و دومین کار تجربی منظم و سازمان‌یافته در این زمینه به شمار می‌رود که دارای دو نوآوری اصلی نسبت به پژوهش‌های مشابه می‌باشد. در مورد نوآوری‌های این تحقیق در فصول بعد به تفصیل به بحث پرداخته شده است.

در ادامه سعی شده کارهای انجام شده در گذشته بر حسب سال انجام آن‌ها به اختصار بیان شوند.

- ۱۹۶۷: در این سال برنایکس^۲ برای اولین بار به صورت بسیار ابتدایی مفهوم مواد پرکننده درزه‌ها را بیان نمود (Bernaix, 1967).
- ۱۹۶۸: رومرو^۳ طی کاری مشابه با برنایکس مفاهیم را گسترش داد (Romero, 1968).
- ۱۹۶۹: یورنیوس^۴ و فاگرستروم^۵ یک سری تست‌های آزمایشگاهی بر روی مارل‌های گچی (سنگ متوسط تا نرم) پر شده با بنتونیت تحت شرایط بار نرمال ثابت انجام دادند. این تست‌های برشی در وضعیت خشک نمونه و پرکننده و با نرخ جابجایی‌های برشی ۰/۷ - ۰/۶

¹ Patton

² Bernaix

³ Romero

⁴ Eurenus

⁵ Fagerstrom

میلی‌متر در دقیقه انجام شد. این تحقیق نشان می‌داد که نتایج حاصل از تست‌های

آزمایشگاهی و برجا مطابقت خوبی با هم داشته‌اند (Eurenius & Fagerstrom, 1969).

• ۱۹۷۰: گودمن^۱ با انجام تست برش مستقیم بر روی درزه‌های دندان‌اره‌ای پرشده با پودر

میکا به مقایسه مقاومت درزه با مقاومت خود پرکننده پرداخت (Goodman, 1970). در این

سال تحقیقات دیگری نیز توسط کولسون^۲ و همچنین اشنیتزر و اشنایدر^۳ انجام گردید

(Coulson, 1970; Schnitter & Schneider, 1970).

• ۱۹۷۱: تولینوف و مولوکوف^۴ پرکننده‌های درزه‌ها را با توجه به منشأ آن‌ها به پنج گروه اصلی

طبقه‌بندی کردند. کار آن‌ها تست‌های آزمایشگاهی را نیز شامل می‌شد (Tulinov &

Molokov, 1971).

• ۱۹۷۲: در این سال کلارک^۵ و میرهوف^۶ تحقیقاتی در زمینه تنش‌های وارده بر خاک‌ها و

میزان خرابی برشی درزه‌های پرشده انجام دادند (Clark & Meyerhof, 1972).

• ۱۹۷۴: بارتون^۷ نقش پرکننده‌ها و به خصوص اثر ضخامت آن‌ها را با مطالعه بر روی خاک

رس مورد بررسی قرار داد (Barton, 1974). مطالعات بارتون در این سال‌ها تأثیر بسیاری در

پیشرفت طبقه‌بندی مواد پرکننده داشت. کانجی^۸ مطالعات مشابهی روی مقاومت درزه‌های

پرشده انجام داده و آن‌ها را با مقاومت خود پرکننده مقایسه کرد. وی همچنین آزمایش‌هایی

¹ Goodman

² Coulson

³ Schnitter & Schneider

⁴ Tulinov & Molokov

⁵ Clark

⁶ Meyerhof

⁷ Barton

⁸ Kanji

برای بررسی تأثیر صفحه اندرکنش خاک-سنگ ترتیب داد (Kanji, 1974).

- ۱۹۷۷: لادانی^۱ و آرچامبولت^۲ با استفاده از رس کائولینی آزمایش‌های برش مستقیم بر روی بلوک‌های بتنی انجام دادند (Ladanyi & Archambault, 1977). نتایج آن‌ها بسیار شبیه به نتایج گودمن (۱۹۷۰) ولی با جزئیات کامل‌تر بود.
- ۱۹۷۸: لاما^۳ یک سری آزمون‌های آزمایشگاهی روی مدل درزه‌های پرشده با کائولن انجام داد. او در این آزمایش‌ها از گچ سخت برای شبیه‌سازی سنگ استفاده کرد. اولین رابطه تجربی برای پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های پرشده طی این تحقیق ارائه شد (Lama, 1978).
- ۱۹۷۹: کوتتر^۴ و راوتنبرگ^۵ در مورد مقاومت برشی درزه‌های پرشده با رس تحقیق کردند. تاکید آن‌ها بر تأثیر پرکننده‌ها روی مقاومت برشی ماندگار^۶ بود (Kutter & Rautenberg, 1979).
- ۱۹۸۱: وانه^۷ و همکارانش سعی در تعیین یک حد بحرانی برای ضخامت پرکننده و تأثیر آن بر تنش برشی حداکثر داشتند (Wanhe et al, 1981). همچنین سان^۸ بر روی بلوک‌های بتنی پرشده با ماسه رسی و رس ماسه‌ای با ضخامت‌های متغیر، آزمایش‌های برش تحت

^۱ Ladanyi

^۲ Archambault

^۳ Lama

^۴ Kutter

^۵ Rautenberg

^۶ Residual Shear Strength

^۷ Wanhe

^۸ Sun

تنش‌های نرمال مختلف انجام داد. سطح خرابی در سطح تماس بالایی یا پایینی و یا ترکیبی از هر دو سطح مشاهده شد (Sun, 1981).

- ۱۹۸۵: بارلا^۱ و همکارانش با طراحی و ساخت ابزاری متفاوت برای برش سنگ، شیوه جدیدی از تست‌های برشی بر روی درزه‌های مصنوعی پر شده را ارائه کردند (Barla et al, 1985).
- ۱۹۸۹: در این سال زو^۲ طی پایان‌نامه دکترای خود، به بررسی رابطه بین تنش و تغییرشکل سطوح سنگی در حین برش پرداخت. وی در این تحقیق تأثیر پرکننده‌ها را نیز مطالعه کرد (Xu, 1989).
- ۱۹۹۰: در این سال بیشترین تحقیقات در زمینه تأثیر پرکننده‌ها و زبری سطوح درزه‌های سنگی انجام شد. پاپالیانگاس^۳ و همکارانش تأثیر پرکننده‌های مختلف از جمله خاکستر آتشفشانی سائیده شده^۴، پودر مرمر^۵ و کائولین را بر روی مدل‌های درزه مورد مطالعه قرار دادند (Papaliangas et al, 1990).
- فین وج^۶ و همکارانش آزمایش‌های برشی مستقیم بر روی نمونه‌های گچی دندان‌اره‌ای پر شده با بنتونیت خشک انجام دادند. این تحقیق از گستردگی قابل قبولی برخوردار بوده و به ارائه معیار مقاومتی انجامید (Phien-Wej et al, 1990).
- ارل^۷ بیان کرد که افزایش مواد پرکننده، زاویه اصطکاک را کاهش داده و چسبندگی را

¹ Barla

² Xu

³ Papaliangas

⁴ Pulverized Fuel Ash (PFA)

⁵ Marble Dust

⁶ Phien-Wej

⁷ Ehrle

افزایش می‌دهد. مدل فیزیکی که مورد استفاده قرار گرفته بود از مخلوط رزین اپوکسی^۱، ماسه و عمل‌آورنده^۲ درست شده بود. مقاومت فشاری تک محوره متوسط نمونه‌ها حدود ۱۶۰ مگاپاسکال بود و ضریب زبری درزه (JRC) از ۰ تا ۱۰ تغییر می‌کرد. رس مصنوعی متشکل از ماسه، کائولینیت، گچ و آب به عنوان پرکننده به کار رفته بود (Ehrle, 1990).

پیرا^۳ تأثیر اندازه ذرات بر مقاومت درزه‌های صفحه‌ای پر شده را مورد بررسی قرار داد. وی برای طبقه‌بندی پرکننده‌ها از آنالیز سرندي استفاده کرد (Pereira, 1990a). او در همین سال و در تحقیقی دیگر از ماسه به عنوان پرکننده بین دو بلوک گرانیتی صاف استفاده نمود و بیان کرد که به علت غلطش دانه‌های ماسه، سطح خرابی در مرزهای جسم ایجاد می‌شود. وی در این سال تأثیر اندازه ذرات پرکننده بر زاویه اصطکاک درزه‌ها را نیز مورد مطالعه قرار داد (Pereira, 1990b).

• ۱۹۹۳: دتولدو^۴ و دفریتاس^۵ نتایج آزمایش‌های برش چرخشی^۶ خود را روی ماسه‌سنگ پنریت^۷ و رس گاولت^۸ ارائه دادند. درزه‌ها در دو سطح مختلف تنش، تحکیم یافته و در تنش نرمال ۱ مگاپاسکال بریده شدند. در این تحقیق، مکانیسم برش نیز مورد توجه قرار گرفته بود. محققین در انتها، یک معیار کلی برای رفتار برشی درزه‌های پر شده ارائه نمودند (DeToledo & DeFreitas, 1993).

¹ Epoxy Resin

² Curing Agent

³ Pereira

⁴ De Toledo

⁵ De Freitas

⁶ Ring Shear Tests

⁷ Penrith

⁸ Gault

پاپالیانگاس و همکارانش آزمایش‌های مفصلی روی درزه‌های گچی-سیمانی مدل که با کائولن، پودر مرمر و خاکستر آتشفشانی سائیده شده (PFA) پر شده بودند، انجام دادند (Papaliangas et al, 1993). آن‌ها طی این مطالعه، مدل تجربی خود را برای تخمین مقاومت برشی درزه‌های مدل پرشده که در سال ۱۹۹۰ ارائه داده بودند، اصلاح کردند. با این وجود، این مدل نیز دارای ایرادات عمده‌ای بود.

- ۱۹۹۵: دتولدو و دفریتاس طی تحقیقی دیگر، تأثیر همزمان ضخامت پرکننده و درجهٔ تحکیم^۱ آن را در رفتار تغییرشکل پذیری درزه‌ها مورد بررسی قرار دادند (DeToledo & DeFreitas, 1995).
- ۱۹۹۶: چنگ^۲ و همکارانش صفحات سنگ- بتن پرشده با مخلوط جانستون^۳ (مخلوط پودر مادستون، سیمان و آب) را در شرایط سختی نرمال ثابت مورد مطالعه قرار دادند (Cheng et al, 1996).
- ۱۹۹۷: پیرا با استفاده از ماشین برش چرخشی، آزمایش‌هایی روی نمونه‌های ماسه‌سنگ پنزیت پرشده با ماسه انجام داد. در این مطالعه از ماسه با منشأ رودخانه‌ای متشکل از دانه‌هایی با ابعاد ۰/۴ تا ۱/۱۸ میلی‌متر به عنوان پرکننده استفاده شده بود (Pereira, 1997).

¹ Degree of Consolidation

² Cheng

³ Johnstone

- ۱۹۹۹: ایندراراتنا^۱ و همکارانش در این سال تحقیقات خود را بر روی مقاومت برشی درزه‌های پرشده تحت شرایط سختی نرمال ثابت آغاز نمودند. این کار مستلزم طراحی و ساخت دستگاه برش بزرگ مقیاسی بود که برای اولین بار توسط وی و همکارانش انجام گردید (Indraratna et al, 1999).
 - ۲۰۰۰: ایندراراتنا و هیک^۲ تحقیقات گسترده‌ای روی رفتار برشی درزه‌ها در شرایط سختی نرمال ثابت انجام دادند (Indraratna & Haque, 2000).
 - ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵: ایندراراتنا و ولیدینیا^۳ رفتار برشی درزه‌های گرافیتی پرشده را به صورت جامع و گسترده مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیقات از دستگاه برش بزرگ مقیاس طراحی شده در سال ۱۹۹۹ استفاده شد (Indraratna & Welideniya, 2003). در نهایت ولیدینیا توانست مدل تخمین مقاومت برشی درزه‌های پرشده را برای معادن زیرزمینی گرافیت سریلانکا ارائه دهد (Welideniya, 2005).
 - ۲۰۰۶: دنگ^۴ و همکارانش با در نظر گرفتن برخی پارامترهای جدید و استفاده از داده‌های منتشر شده در گذشته، رفتار برشی و نرمال درزه‌های پرشده را مورد بررسی قرار دادند (Deng et al, 2006).
- از میان سوابق ذکر شده در بالا، مهم‌ترین تحقیقات آزمایشگاهی به همراه سال انجام، نوع درزه مورد استفاده و نوع پرکننده آزمایش شده به صورت خلاصه در جدول ۱-۱ آورده شده است.

¹ Indraratna

² Haque

³ Welideniya

⁴ Deng

جدول ۱-۱- خلاصه‌ای از مهم‌ترین تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر روی تأثیر پرکننده‌ها

نوع پرکننده	نوع درزه آزمایش شده	سال انجام تحقیق	محقق
بنتونیت	لایه‌بندی مارل گچی	۱۹۶۹	یورنیوس و فاگرستروم
پودر میکا	گچ پلاستر دندان‌اره‌ای	۱۹۷۰	گودمن
ماسه، رس و خرده‌سنگ	مارل و ماسه‌سنگ صفحه‌ای	۱۹۷۱	تولینوف و مولکوف
کائولینیت و ایلیت	بازالت، سنگ آهک صیقلی و دندان‌اره‌ای	۱۹۷۴	کانچی
کائولینیت، سیلت	بتن دندان‌اره‌ای	۱۹۷۷	لادانی و آرچامبولت
کائولینیت	ژئپس سخت با درزه کششی	۱۹۷۸	لاما
ماسه و رس	ماسه‌سنگ دندان‌اره‌ای	۱۹۷۹	کوئر و راوتنبرگ
ماسه و رس	بتن صفحه‌ای	۱۹۸۱	سان و همکاران
سیلت رسی	مصنوعی	۱۹۸۵	بارلا و همکاران
رس گاولت	ماسه‌سنگ صاف و دندان‌اره‌ای	۱۹۸۹	زو
کائولین، پودر مرمر و PFA	گچ پلاستر و سیمان قالب‌گیری شده	۱۹۹۰	پاپالیانگاس و همکاران
بنتونیت	گچ پلاستر دندان‌اره‌ای	۱۹۹۰	فین وج و همکاران
رس مصنوعی	مدل اختلاطی	۱۹۹۰	ارل
ماسه و رس سیلتی	گرانیت صفحه‌ای	۱۹۹۰	پریرا
رس گاولت	ماسه‌سنگ پنریت صفحه‌ای و دندان‌اره‌ای	۱۹۹۳	دتولدو و دفریتاس
خاکستر آتشفشانی	مدل‌های گچی-سیمانی	۱۹۹۳	پاپالیانگاس و همکاران
مخلوط جانستون	صفحات سنگ-بتن	۱۹۹۶	چنگ و همکاران
ماسه با منشأ رودخانه‌ای	ماسه‌سنگ پنریت صفحه‌ای	۱۹۹۷	پریرا
ماسه و رس	گچ نرم صفحه‌ای	۱۹۹۹	ایندراراتنا و همکاران
بنتونیت تجاری	مدل گچی	۲۰۰۰	ایندراراتنا و هیک
بنتونیت و گرافیت	مدل گچی دندان‌اره‌ای	۲۰۰۳ و ۲۰۰۵	ایندراراتنا و ولیدینیا

۳-۱- تحقیقات مرتبط در حال انجام

هم‌اکنون ماتیاس ناگی^۱ در دانشگاه ولنگنگ^۲ استرالیا طی پایان‌نامه دکترای خود در مراحل نهایی بررسی تأثیر فشار منفذی^۳ آب بر روی رفتار برشی درزه‌های سنگی طبیعی پرشده می‌باشد (Nagy, 2007). شایان ذکر است مراحل انجام تحقیق و روند آزمایشات صورت گرفته توسط ناگی و آن‌چه در پایان‌نامه اخیر انجام شده است، بسیار مشابه به هم می‌باشند.

۴-۱- اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام آن

بررسی معیارهای مختلف سنگ‌های درزه‌دار مبین آن است که پارامترهای متعددی در مقاومت درزه‌ها دخیل می‌باشند. درزه‌ها تحت شرایط مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. پایداری سازه‌های سنگی در توده‌سنگ‌های درزه‌دار به میزان زیادی به رفتار برشی و به طور عمده به زاویه اصطکاک سطوح ناپیوستگی‌های موجود در آن‌ها و در مرحله بعد به کیفیت و میزان حضور مواد پرکننده بستگی دارد. از آنجا که از نظر فیزیکی و مکانیکی، میزان حضور مواد پرکننده در درزه به مقدار زیاد به فضای موجود در درزه و نیز فضای ایجاد شده ناشی از جابجایی عمودی در اثر جابجایی افقی بستگی دارد و از آنجا که میزان این جابجایی‌های عمودی به نوبه خود به شدت و مرتبه زبری سطح درزه وابسته است، شناخت تأثیر بار عمودی و نوع زبری بر میزان دخالت ماده پرکننده در مقاومت برشی و اصطکاک از اهمیت بسزایی برخوردار خواهد بود.

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، تلاش‌های زیادی به منظور ارائه یک مدل جامع و کاربردی

¹ Mathias Nagy

² University of Wollongong

³ Pore Pressure

برای تخمین و پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های پرشده انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، تحقیقات بسیاری به کمک مدل‌سازی فیزیکی و انجام آزمایش‌های مختلف بر روی مدل‌های مصنوعی ساخته شده از مواد مختلف و سنگ‌ها با زبری‌های ایجاد شده در آزمایشگاه (مانند سطوح زبر دندانه‌اره‌ای و سطوح صاف و صفحه‌ای) انجام شده است. ولی معیاری که بتواند از دقت کافی برخوردار بوده و مقبولیت عمومی را کسب کند و نیز در تمام موارد قابل استفاده باشد، تاکنون ارائه نشده است. علت این امر تفاوت خصوصیات سنگ‌ها در مناطق مختلف و شرایط گوناگون سطحی و زیرزمینی می‌باشد. لذا به دست آوردن مدلی جامع، عام و قابل کاربرد در تمام شرایط نسبتاً غیرممکن به نظر می‌رسد.

با این حال، به عقیده نویسنده، مدل‌سازی رفتار سنگ‌ها هیچگاه نخواهد توانست به اندازه بررسی تجربی نمونه‌های سنگی طبیعی کارآمد بوده و به حالت واقعی نزدیک باشد. با توجه به بررسی سوابق انجام شده، خلأ ناشی از کار آزمایشگاهی بر روی درزه‌های سنگی طبیعی احساس شد. علت این کمبود، می‌تواند نیاز به تعداد بالای نمونه برداشت شده و سختی نسبی روند کار بوده باشد. از این رو در این پایان‌نامه سعی شده است با انتخاب هدفمند و آگاهانه یک منطقه خاص به عنوان منطقه نمونه‌برداری و ایجاد یک جامعه آماری با تعداد بالای نمونه، به بررسی تجربی و آزمایشگاهی تأثیر همزمان پرکننده‌ها و زبری سطوح درزه‌ها بر مقاومت برشی آن‌ها پرداخته شود. از طرفی تاکنون در هیچ تحقیقی خاک خود منطقه به عنوان پرکننده درزه‌ها در تست‌های آزمایشگاهی به کار نرفته است که به دلیل اهمیت آن در اعتبار مدل ناحیه‌ای ارائه شده، در تحقیق اخیر به آن توجه می‌شود. همین امر ضرورت انجام چنین مطالعه‌ای را در قالب یک پایان‌نامه بیش از پیش نمایان می‌سازد. بایستی توجه داشت که سابقه چنین مطالعاتی در این ابعاد در کشورمان زیاد نمی‌باشد. لذا ضرورت انجام

تحقیقات و طرح‌هایی از این دست بسیار احساس می‌گردد.

از اهداف اولیه تحقیق حاضر می‌توان به ایجاد دید وسیع‌تر نسبت به تغییرات مقاومت و پایداری توده‌سنگ‌های درزه‌دار در مجاورت مواد پرکننده اشاره کرد. هدف نهایی متصور، ارائه یک معیار تجربی برای پیش‌بینی و تخمین مقاومت برشی درزه‌های پرشده در مناطق مشابه با منطقه مورد مطالعه می‌باشد که تأثیر هر دو پارامتر زبری سطح درزه و میزان پرشدگی را شامل باشد.

ضمناً از نتایج چنین بررسی‌هایی می‌توان در انواع پروژه‌های سطحی و پاره‌ای از پروژه‌های زیرزمینی^۱ استفاده کرد، بدین صورت که بتوان با اطلاع از شرایط محلی سنگ‌ها و پرشدگی آن‌ها پایداری سازه‌های سنگی را تخمین زد. موارد قابل استفاده در سطح زمین عبارتند از پروژه‌هایی نظیر دیواره‌های سنگی تشکیل شده در پله‌های معادن روباز و ترانشه‌های راه که امکان جابجایی بلوک‌ها و سقوط آن‌ها به پائین وجود دارد که در این موارد به علت احتمال پرشدگی بیشتر در اثر باران‌های موسمی و جریان‌های سطحی، این کاربرد بیشتر نمایان است. همچنین در سازه‌هایی نظیر سدها، ساختمان‌ها و پل‌ها که پی ساختگاه آن‌ها از توده‌سنگ‌های درزه‌دار تشکیل شده است و یا در دیواره‌ها و سقف تونل‌های زیرزمینی می‌توان از آن استفاده نمود.

۱-۵- سازماندهی پایان‌نامه

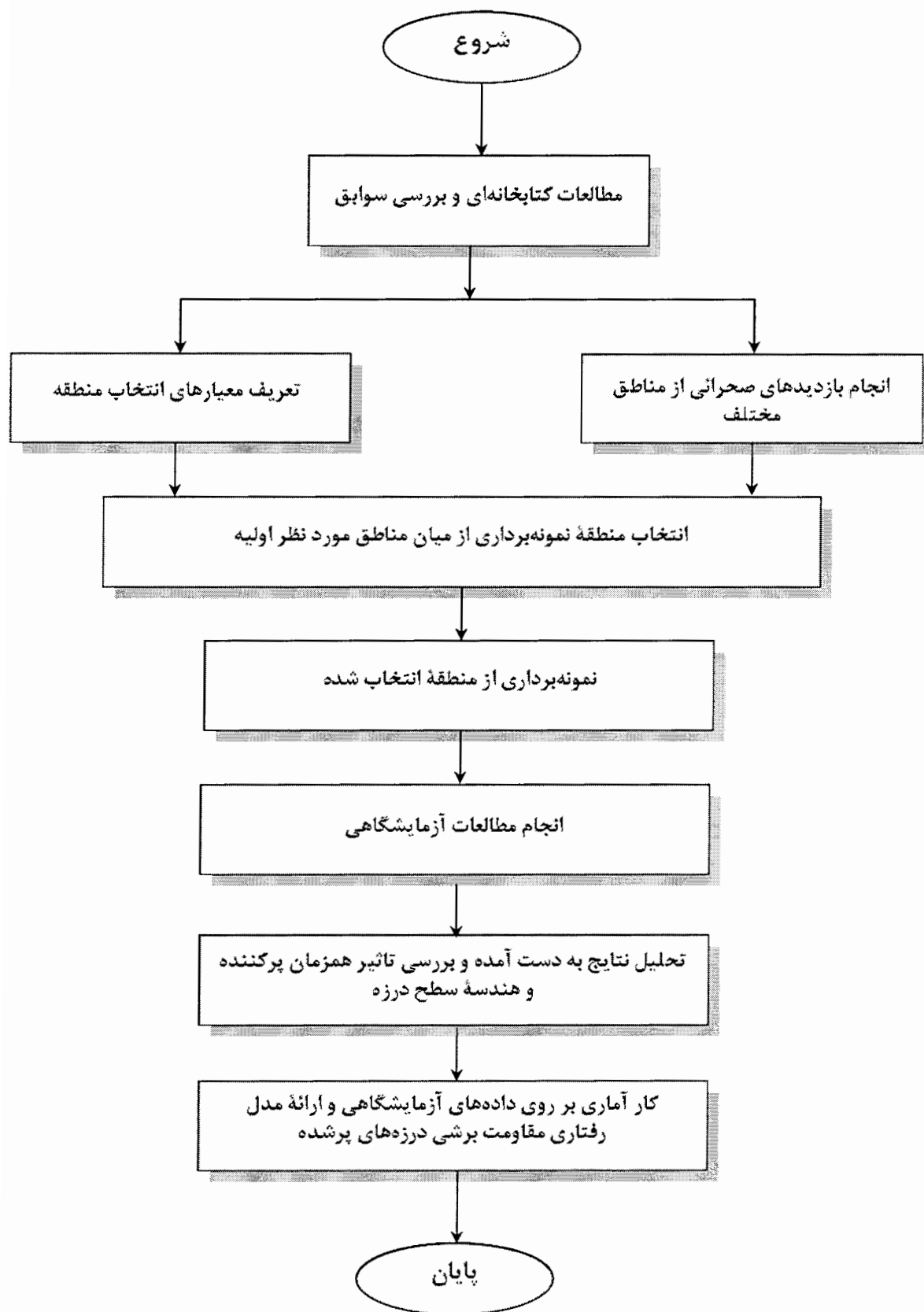
پایان‌نامه حاضر مشتمل بر هفت فصل می‌باشد. فصل اول شامل مقدمه، مروری بر کارهای

انجام شده قبلی، اهداف پایان‌نامه، ضرورت انجام طرح و سازماندهی پایان‌نامه می‌باشد. در فصل دوم

^۱ علت عدم ذکر تمام پروژه‌های زیرزمینی، شرایط خاص و متفاوت بارگذاری توده سنگ‌ها در زیر زمین می‌باشد. به طوری که در اعماق زیاد، به دلیل اعمال بارهای عمودی بیشتر، شرایط بارگذاری به گونه‌ای است که ابزار متفاوتی را برای آزمایش درزه‌ها می‌طلبد. در فصل بعد در این مورد به تفصیل بحث شده است.

مطالب ضروری در مورد رفتار مکانیکی محیط‌های سنگی درزه‌دار و خواص تغییرشکل پذیری درزه‌ها بیان شده و سپس معروف‌ترین معیارهای مقاومت برشی سنگ‌ها معرفی شده است. در فصل سوم به بررسی تئوری تأثیر مواد پرکننده و زبری سطوح بر مقاومت برشی درزه‌ها پرداخته شده است. فصل چهارم به تشریح موقعیت جغرافیایی منطقه، راه‌های دسترسی، مشاهدات صحرایی، زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه می‌پردازد. فصل پنجم مطالعات آزمایشگاهی را در بر می‌گیرد. در این فصل ابتدا مراحل مختلف انجام کارهای آزمایشگاهی بیان شده و پس از توضیح کامل تمامی این مراحل، نتایج به دست آمده تحلیل شده است. در فصل ششم پس از مروری بر مدل‌های ارائه شده توسط محققین مختلف در گذشته، بر پایه نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی و کار آماری بر روی داده‌ها، یک مدل تجربی جدید برای پیش‌بینی و تخمین مقاومت برشی درزه‌های سنگی پرشده ارائه می‌شود و در انتهای فصل نیز اعتبارسنجی تجربی به صورت اولیه به منظور سنجش نسبی صحت مدل پیشنهادی انجام می‌گیرد. در فصل هفتم، مطالب جمع‌بندی شده و با توجه به نتایج حاصله، پیشنهادهای به منظور انجام مطالعه و بررسی بیشتر در آینده ارائه شده است.

شکل ۱-۱ روش انجام کار و مراحل مختلف تحقیق حاضر را به صورت یک فلوجارت نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱- فلوچارت روش انجام کار و مراحل مختلف پروژه

فصل دوم

رفتار مکانیکی محیط‌های سنگی درزه‌دار

۲-۱- مقدمه

توده‌های سنگی که در طبیعت یافت می‌شوند، توده‌هایی همگن و یکنواخت نیستند. این توده‌ها دارای عوارض طبیعی (مانند صفحات لایه‌بندی، چین‌خوردگی، مناطق برشی، گسل، درزه‌ها و...) و عوارض مصنوعی (ایجاد درزه و شکاف حاصل از بارگذاری‌های مصنوعی مثل آتشکاری، حفاری و...) می‌باشند.

درزه‌های سنگی معمول‌ترین نوع عوارض ساختاری هستند که در توده‌های سنگی مشاهده می‌شوند. وضعیت فیزیکی و رفتار مکانیکی درزه‌ها در توده‌های سنگی می‌تواند دارای دامنه بسیار وسیعی باشد. درزه‌ها در طبیعت به صورت تازه یا هوازده، جفت شده یا جفت نشده، خالی و یا پر شده از مواد پرکننده دیده می‌شوند (Grasselli, 2001).

از آنجایی که اکثر سازه‌ها مانند تونل‌ها و شیروانی‌های سنگی در توده‌های سنگی احداث می‌شوند، ناگزیر شناخت رفتار (مکانیکی) توده‌سنگ برای طراحی مطمئن‌ترین اهمیت را در علم مکانیک سنگ دارد.

در این فصل با مرور مختصری بر آزمایش‌های روی درزه‌های سنگی، خواص تغییرشکل پذیری و

مقاومت برشی درزه‌ها شرح داده خواهد شد. در انتها نیز به معروف‌ترین معیارهای مقاومت برشی درزه‌های سنگی اشاره می‌شود.

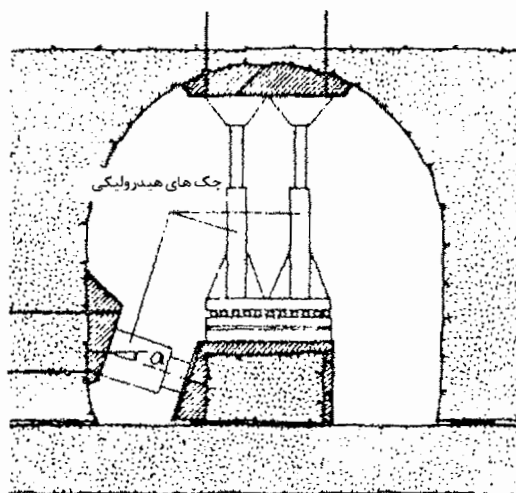
۲-۲- آزمایش‌های بررسی خواص مکانیکی درزه‌ها

درزه‌ها تحت شرایط مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در اینجا بررسی رفتار مکانیکی یک درزه مدنظر است. رفتار درزه‌های اصلی در توده‌سنگ نقش مهمی در بررسی پایداری توده دارد. پرواضح است که شکل سطح درزه‌ها با توجه به مقیاس آن‌ها متفاوت خواهد بود. برای ارزیابی مقاومت برشی درزه‌ها با توجه به مقیاس و نوع کاربرد، آزمایش‌های درزه‌ها به سه گروه تقسیم می‌شود که در ادامه تشریح می‌گردند.

۲-۲-۱- آزمایش برش مستقیم برجا^۱

نمونه‌ای به شکل مقطع مربع یا دایره در کارگاه از سنگ بستر (در مواردی نیز از بتن) جدا می‌شود و در راهرو یا اتاقک آزمایش قرار می‌گیرد (شکل ۲-۱). این نمونه با نیروی عمودی N بارگذاری شده و هم‌زمان با نیروی T و با زاویه α_1 از افق به جلو رانده می‌شود. اندازه قطعه مربع یا دایره به ظرفیت جک‌های هیدرولیکی مورد استفاده برای نیروهای عمودی و برشی بستگی دارد. همچنین سطح مقطعی از درزه که می‌تواند به عنوان نمونه شاخص از کل درزه باشد، در انتخاب اندازه قطعه موثر است (Wittke, 1990).

¹ In-Situ Shear Test



شکل ۱-۲- آزمایش برش مستقیم برجا (Wittke, 1990)

آزمایش‌های برش برجا معمولاً روی سطوحی به اندازه ۰/۵ تا ۱ متر مربع انجام می‌گیرد. تنش‌های عمودی (σ_n) و برشی (τ) که روی سطح عمل می‌کنند، با توجه به نیروهای اندازه‌گیری شده و با استفاده از فرمول‌های ذیل تعیین می‌شوند (ISRMI¹, 1979):

$$\tau = \frac{TC \cos \alpha_1}{A} \quad (1-2)$$

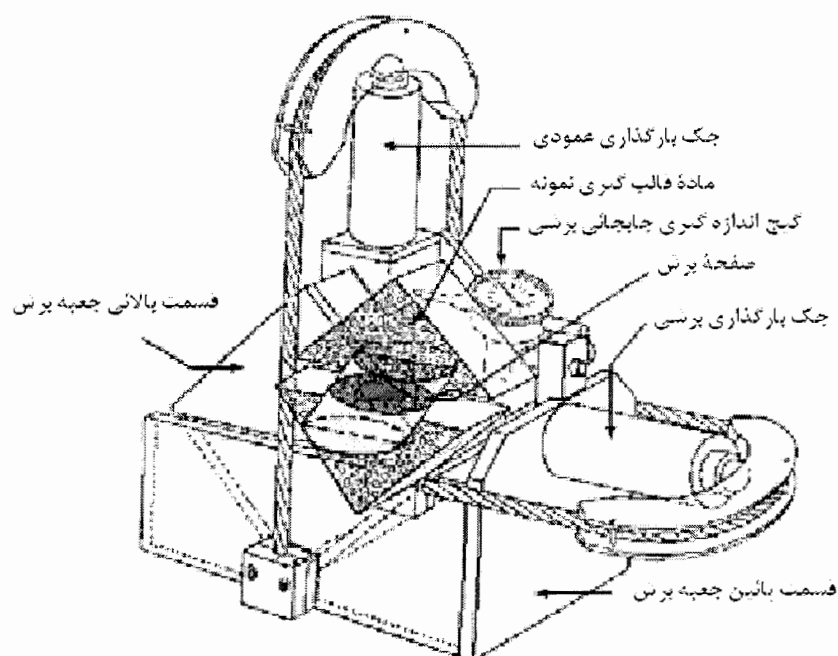
$$\sigma_n = \frac{N + T \sin \alpha_1}{A} \quad (2-2)$$

مساحت سطح برش A در واقع با افزایش جابجائی برشی کاهش می‌یابد. تنش‌های عمودی و برشی در یک نمودار به صورت تابعی از جابجائی برشی رسم می‌شوند. مقادیر مقاومت برشی نهائی و ماندگار از نمودارهای مذکور بدست آمده و سپس به صورت تابعی از تنش عمودی رسم می‌گردند. جزئیات دستورالعمل آزمایش برش مستقیم برجا در روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ آورده شده است.

¹ International Society for Rock Mechanics

۲-۲-۲- آزمایش برش مستقیم^۱ در آزمایشگاه

یکی از رایج‌ترین روش‌هایی که برای اندازه‌گیری مقاومت برشی درزه‌ها در توده‌سنگ به کار می‌رود، آزمایش برش مستقیم می‌باشد. در آزمایش برش مستقیم در آزمایشگاه معمولاً سطح درزه به موازات راستای نیروی برشی وارد بر نمونه می‌باشد. نوعی از این دستگاه، دستگاه برش قابل حمل^۲ است که با استفاده از آن، در محل نیز می‌توان نمونه‌های مغزه‌ای و بلوکی را تحت آزمایش قرار داد. نحوه تهیه نمونه و آزمایش توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1978) و همچنین توسط چندی از محققین (Hoek & Bray, 1981; Hencher & Richards, 1989) تشریح شده است. در شکل ۲-۲ تصویری از دستگاه جعبه برش همراه با قسمت‌های تشکیل‌دهنده آن آورده شده است.



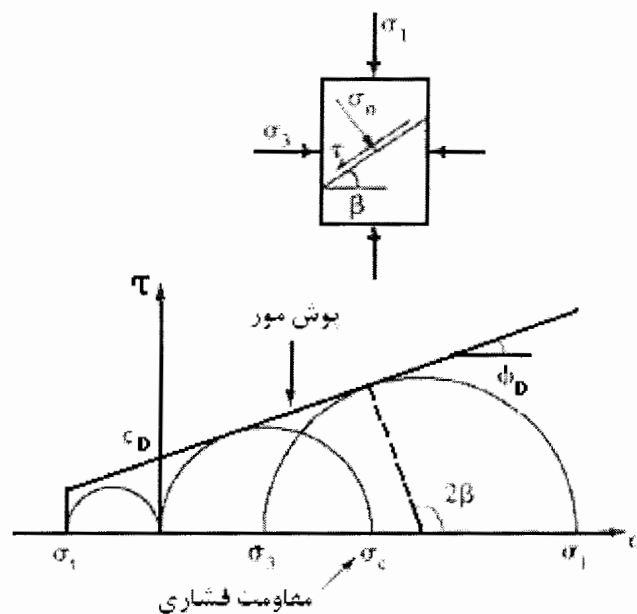
شکل ۲-۲- شماتیک جعبه برش قابل حمل و اجزای تشکیل‌دهنده آن (Selvadurai & Yu, 2005)

¹ Direct Shear Test

² Portable Shear Box

۲-۲-۳- آزمایش برش سه محوری^۱ در آزمایشگاه

روش دیگر تعیین مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها، بررسی مغزه‌های دارای ناپیوستگی با استفاده از آزمایش برش سه محوری می‌باشد. در این آزمایش، نمونه مورد بارگذاری سه محوری قرار می‌گیرد، به طوری که تنش σ_3 در اطراف نمونه شروع شده و تنش اصلی σ_1 در جهت محور نمونه شروع به افزایش می‌کند تا زمانی که شکست اتفاق بیفتد. معمولاً نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش دارای درزه‌ای هستند که با محور نمونه زاویه‌ای بین ۲۵ تا ۴۰ درجه می‌سازد. محفظهٔ دستگاه آزمایش شرایط مناسبی را برای آزمایش مقاومت برشی درزه‌ها در شرایط وجود آب و بررسی فشار آب منفذی ایجاد می‌کند. این آزمایش را نیز می‌توان در شرایط زهکشی و غیر زهکشی انجام داد (Hudson & Harrison, 1997).



شکل ۲-۳- آزمایش برش سه محوری برای تعیین مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها (Brady & Brown, 1993)

^۱ Triaxial Shear Test

تنش‌های برشی و عمودی را که در شکست روی ناپیوستگی عمل می‌کنند، می‌توان از روی دایره مور به صورت شکل ۲-۳ نشان داد. زمانی که آزمایش با تنش‌های جانبی σ_3 مختلف انجام شد، پوش شکست به صورتی که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، با پارامترهای C_D (چسبندگی) و ϕ_D (زاویه اصطکاک) قابل ترسیم می‌باشد (ISRM, 1981).

از آنجا که نمونه‌های آزمایشگاهی معمولاً دارای قطر ۳ الی ۵ سانتی‌متر بوده و مساحت مقطع ناپیوستگی مورد بررسی کوچک است، نتایج آزمایشگاهی فقط برای تعیین مقاومت برشی ناپیوستگی‌های صفحه‌ای قابل استفاده هستند. آزمایش سه محوری این مزیت را بر آزمایش برش مستقیم دارد که توزیع تنش برشی یکنواخت‌تری در طول درزه ایجاد خواهد کرد و همچنین در طول آزمایش می‌توان شرایط فشار منفذی را کنترل نمود. از معایب این آزمایش نیز می‌توان به مشکلات ایجاد شرایط انتهایی مناسب نمونه اشاره کرد (Brady & Brown, 1993).

۲-۳- خواص تغییرشکل پذیری درزه‌ها

رفتار تغییرشکل پذیری یک توده سنگی درزه‌دار به میزان زیادی تحت تأثیر تغییرشکل پذیری درزه‌های آن قرار گرفته و مدول تغییرشکل توده‌های سنگی به طور قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با توده‌سنگ سالم که درزه‌ها بعداً در آن به وجود آمده است، کاهش می‌یابد. مشخصات تغییرشکل پذیری توده‌سنگ به جهت درزه‌ها نسبت به جهت بارگذاری، وضعیت تنش‌های برجا، اندازه نسبی فاصله بین درزه‌ها و اندازه محدود بارگذاری بستگی دارد (Indraratna & Haque, 2000).

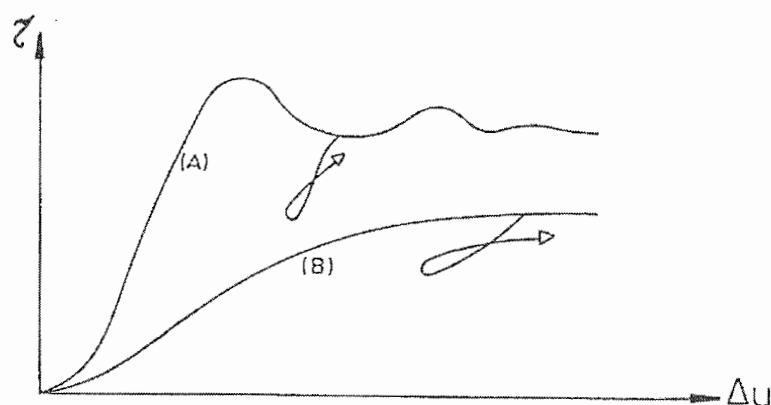
در ادامه به بررسی رفتار تغییرشکل پذیری درزه‌ها پرداخته می‌شود که در اینجا تنها تغییرشکل

پذیری برشی درزه‌ها مد نظر بوده است.

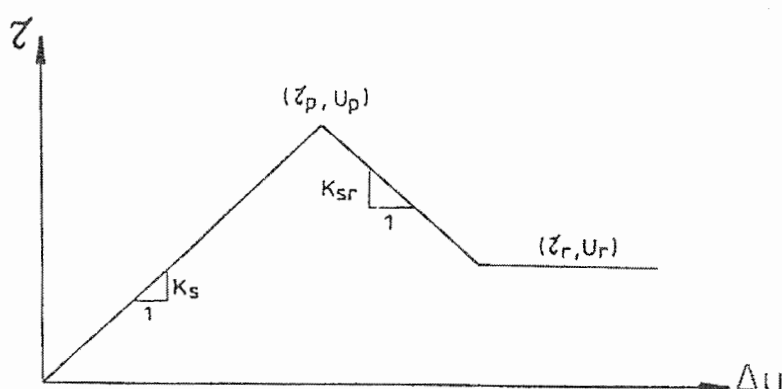
محققین بسیاری منحنی‌های رفتار تغییرات تنش برشی - جابجائی برشی در یک درزه را در حالت تنش عمودی ثابت تشریح کرده‌اند (Barton, 1976; Goodman, 1976; Hudson & Harrison, 1997). از بررسی درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها تحت تنش عمودی ثابت، منحنی‌های رفتاری که در شکل ۲-۴ نمایش داده شده است، به دست می‌آید (Saeb & Amadei, 1992).

منحنی (A) در شکل ۲-۴-الف مربوط به رفتار برشی درزه‌های زبر و عاری از مواد پرکننده و منحنی (B) مربوط به رفتار برشی درزه‌های پر شده از مواد نرم می‌باشد. لازم به ذکر است که منظور از درزه‌های تمیز، درزه‌هایی هستند که بین سطوح تماس آن‌ها اثری از هوازدگی و مواد رسی دیده نمی‌شود و سطح بین دو دیواره درزه کاملاً تمیز می‌باشد. در درزه‌های پر، سطح بین دو دیواره درزه در اثر هوازدگی و متلاشی شدن ماده سنگی و یا توسط مواد نرم دیگر پر شده است. همان طور که در منحنی (A) دیده می‌شود، در اثر جابجائی برشی کوچکی، تنش برشی به طور ناگهانی با یک شیب تقریباً ثابت افزایش می‌یابد تا به نقطه اوج یا حداکثر خود برسد. بعد از آن، در صورت ادامه جابجائی برشی، یک افت ناگهانی در تنش مشاهده می‌شود و این افت تا رسیدن تنش به مقداری که آن را تنش باقیمانده یا ماندگار^۱ می‌نامیم، ادامه می‌یابد. از این پس با افزایش تغییر شکل برشی، تغییرات چندانی در میزان تنش ماندگار صورت نمی‌گیرد و تنش تقریباً مقدار ثابتی خواهد داشت.

^۱ Residual Stress



(الف)



(ب)

شکل ۲-۴- منحنی‌های تنش برشی- جابجائی برشی؛ الف- منحنی واقعی تنش برشی- جابجائی برشی تحت تنش عمودی ثابت، ب- منحنی ایده‌آل شده تنش برشی- جابجائی برشی تحت تنش عمودی ثابت (Saeb & Amadei, 1992)

لازم به ذکر است که میزان افت تنش از مقدار اوج تا مقدار تنش ماندگار بستگی به میزان تنش عمودی وارد بر درزه خواهد داشت. بدین صورت که هر چه مقدار تنش عمودی بیشتر باشد، میزان افت تنش کمتر خواهد شد و اگر تنش عمودی به مقاومت نهائی دیواره درزه نزدیک‌تر شود، نسبت تنش ماندگار به تنش حداکثر به عدد یک میل خواهد کرد و در تنش‌های پایین نسبت تنش ماندگار به تنش حداکثر به حدود ۰/۳ نیز می‌رسد.

منحنی (B) نمایانگر رفتار برشی یک درزه پر می‌باشد که در آن نقطه حداکثر تنش مشاهده نمی‌شود

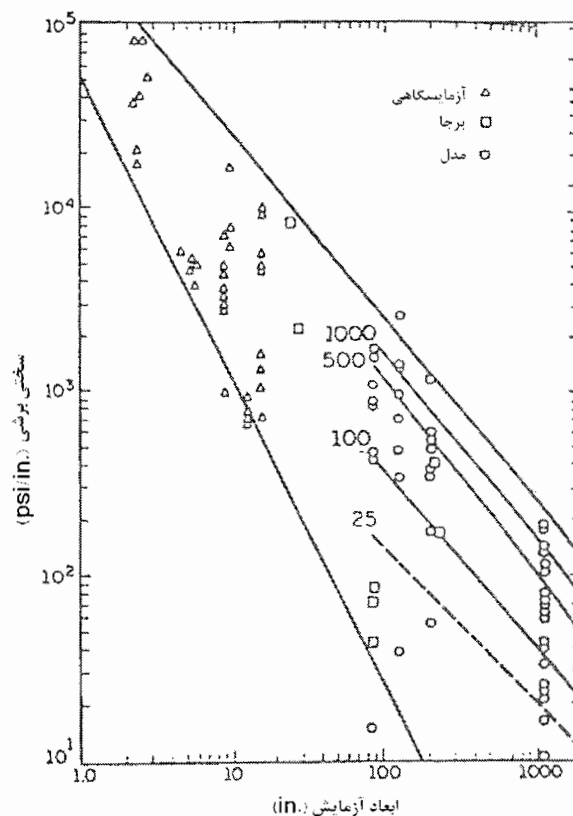
و دارای شیب ثابتی نیز نیست و با افزایش تغییرشکل برشی این شیب نیز تغییر می‌کند. همچنین شیب این منحنی بسیار ملایم‌تر از شیب منحنی (A) است. این نوع رفتار برشی مربوط به حضور مواد پرکننده در درزه می‌باشد. در صورتی که در چنین درزه‌هایی رطوبت مواد پرکننده گرفته شود، به جای منحنی (B) می‌توان انتظار داشت منحنی شبیه به (A) به دست آید، ولی در صورت مرطوب کردن مجدد مواد پرکننده منحنی (B) مشاهده خواهد شد (Pereira, 1990a).

همان طور که در شکل ۲-۴-الف مشاهده می‌شود، در اثر باربرداری و بارگذاری مجدد، منحنی باربرداری و بارگذاری در منحنی (A)، به موازات شیب اولیه منحنی و در منحنی (B)، به موازات شیب منحنی در نقطه باربرداری خواهد بود.

به منظور ایده‌آل کردن رفتار برشی درزه‌ها می‌توان منحنی را همان طور که در شکل ۲-۴-ب نمایش داده شده، به طور ساده‌تر به صورت مدل چندخطی توصیف کرد. این مدل دارای یک قسمت خطی با شیب Ks می‌باشد و نشانگر ناحیه‌ای است که درزه در آن رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهد (Ks سختی برشی درزه نامیده می‌شود). این ناحیه به نقطه τ_p برابر با حداکثر تنش برشی که درزه می‌تواند تحمل کند، محدود می‌گردد. قسمت بعدی منحنی نیز افت تنش را به میزان τ_r که همان تنش ماندگار درزه می‌باشد، محدود می‌کند و همان قسمتی است که درزه رفتار پلاستیک داشته و دندانها خرد می‌شوند. در انتهای این ناحیه که سطح تنش به حد تنش ماندگار کاهش یافته است، تغییرشکل نیز به تغییرشکل U_r می‌رسد (Saeb & Amadei, 1992).

در مورد Ks که بیانگر شیب قسمت الاستیک منحنی رفتار درزه می‌باشد، باید گفت درزه‌هایی که از منحنی رفتاری (B) تبعیت می‌کنند اغلب دارای شیبی کمتر از شیب درزه‌هایی هستند که از منحنی

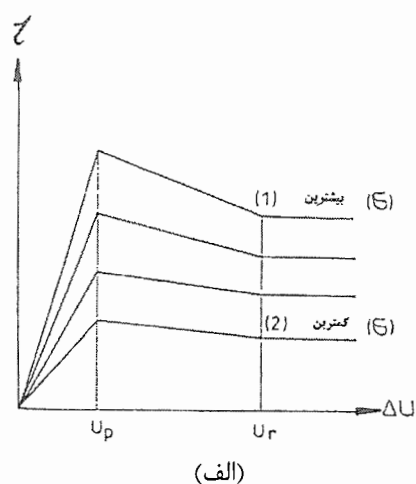
رفتاری (A) پیروی می‌کنند و به طور کلی بایستی متذکر شد که این مقدار برای درزه‌های مختلف، مقدار مشخص و شناخته‌شده‌ای نیست و باید مقدار آن را برای استفاده در آنالیز درزه‌ها حدس زد. همچنین به منظور اندازه‌گیری این مقدار توسط آزمایش‌های برجا باید دقت کافی به عمل آید، زیرا میزان به دست آمده بستگی به روش آزمایش خواهد داشت، یعنی مقدار به دست آمده برای K_s به نوع و روش آزمایش حساس می‌باشد. شکل ۲-۵ دامنه‌ای از مقادیر K_s به دست آمده توسط بارتون را نشان می‌دهد.



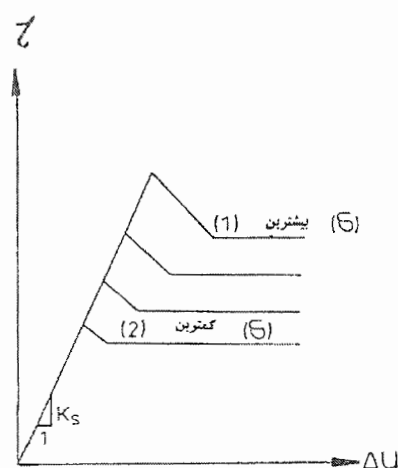
شکل ۲-۵- دامنه‌ای از مقادیر مختلف K_s (Barton, 1976)

تمامی پارامترهای تعریف شده در مدل درزه به میزان زیادی تحت تأثیر مقدار تنش عمودی بوده و حساس به آن می‌باشند، زیرا مقادیر آن‌ها با تغییر تنش موثر بر درزه تغییر می‌کند.

تغییرات مقادیر U_p (تغییرشکل برشی در تنش حداکثر) و K_S (شیب قسمت رفتار الاستیک درزه) در شکل ۶-۲ با دو مدل نشان داده شده است. مدل برشی شکل ۶-۲-الف مدلی است با سختی برشی ثابت در تنش‌های عمودی مختلف، که تنش برشی حداکثر متناسب با تنش عمود بر درزه می‌باشد. در مقابل، مدل شکل ۶-۲-ب دارای سختی برشی متغیر و تنش حداکثر متفاوت با تنش عمود بر درزه می‌باشد، در حالی که مقدار تغییرشکل حداکثر و ماندگار برای تنش‌های عمودی مختلف درزه یکسان است (Barton, 1973).



(الف)



(ب)

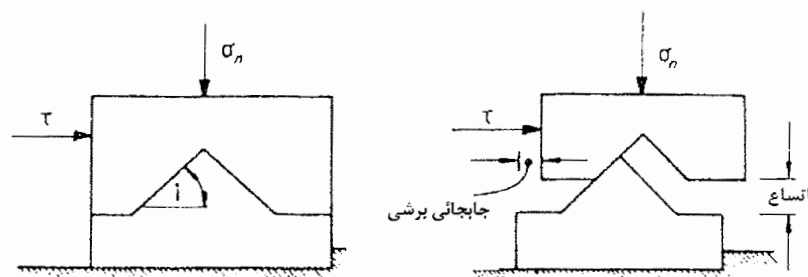
شکل ۶-۲-مدل‌های رفتار برشی درزه؛

الف-مدل با سختی برشی ثابت، ب-مدل با تغییر مکان برشی ماکزیمم ثابت (Barton, 1973)

در ادامه، دو مفهوم اساسی در مورد تغییر شکل درزه‌های سنگی شامل اتساع^۱ و شرایط بارگذاری^۲ تشریح می‌گردند.

• اتساع

اتساع پدیده‌ای است که هنگام جابجائی برشی یک درزه با دیواره‌های دنداندار و زبر بوجود می‌آید و باعث می‌شود که در اثر جابجائی برشی، جابجائی قائم نیز در درزه به وجود آید (Morris, 2003). در شکل ۷-۲ مدل ساده‌ای از مفهوم اتساع درزه‌ها آورده شده است.



شکل ۷-۲- مفهوم اتساع در درزه‌های سنگی در تنش عمودی پائین (Morris, 2003)

افزایش جزئی جابجائی برشی U در طول درزه تولید افزایش جزئی در جابجائی قائم Δv می‌کند که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود (Morris, 2003):

$$\Delta v = \tan i \cdot \Delta U \quad (3-2)$$

Δv : میزان اتساعی است که به جابجائی برشی U و $\tan i$ بستگی دارد.

$\tan i$: بیانگر اثر زاویه زبری در اتساع می‌باشد و به تنش عمودی بستگی دارد ($\tan i$ از جنس اصطکاک بوده و به نیروی عمودی بستگی دارد).

¹ Dilation

² Loading Conditions

• تأثیر شرایط بارگذاری

زمانی که دو سطح زبر یک درزه سنگی در اثر نیروهای برشی و نرمال (قائم) در حال لغزش بر روی هم هستند، بسته به شرایط محیطی، دو حالت از نظر مکانیک سنگی می‌تواند روی دهد.

حالت اول وضعیتی است که درزه تحت یک بار قائم ثابت قرار داشته و پدیده اتساع در هنگام لغزش در آن رخ می‌دهد. در این حالت، سطوح درزه در حین جابجائی افقی (برشی)، تا حدی جابجائی‌های قائم را نیز تحمل می‌کنند. شرایط بارگذاری در این حالت با نام بار نرمال ثابت (CNL^1) شناخته می‌شود. چنین وضعیتی در شیب‌های سنگی جاده‌ها و معادن روباز و یا در سقف و دیواره‌های تونل‌های زیرزمینی قابل مشاهده است (Indraratna & Haque, 2000).

حالت دوم در اعماق بسیار زیاد و زمانی که بار قائم روی درزه به حدی زیاد است که اجازه جابجائی قائم و اتساع را به آن نمی‌دهد، اتفاق می‌افتد. در این حالت، درزه در وضعیت سختی نرمال ثابت (CNS^2) قرار گرفته و بار قائم وارد بر آن افزایش می‌یابد (Welideniya, 2005). این پدیده باعث افزایش مقاومت برشی درزه‌ها می‌گردد، به طوری که مقاومت برشی و همین‌طور جابجائی برشی یک درزه در شرایط CNS بالاتر از مقاومت آن در شرایط CNL می‌باشد (Van Sint Jan, 1990). سختی نرمال درزه (k_n) با نسبت بار نرمال وارد بر درزه (σ_n) بر جابجائی قائم درزه (v) تعریف می‌گردد (Indraratna et al, 1999):

$$k_n = \frac{\sigma_n}{v} \quad (4-2)$$

میزان افزایش بار قائم در شرایط CNS نیز برابر با $k_n \cdot \Delta v$ می‌باشد.

¹ Constant Normal Load

² Constant Normal Stiffness

۲-۴- معیارهای مقاومت برشی درزه‌های سنگی

۲-۴-۱- خاستگاه مقاومت برشی

اگر دو جسم با سطح تقریباً صفحه‌ای با هم در تماس باشند و قطعه بالائی نیروی عمودی N به سطح تماس وارد کند و نیروی F نیز به موازات سطح تماس در جهت لغزش بر قطعه بالائی وارد شود، رابطه F و N می‌تواند به صورت زیر نوشته شود (Jeager & Cook, 1979):

$$F = \mu N \quad (۵-۲)$$

در این رابطه μ ضریب اصطکاک نامیده می‌شود. ضریب μ به طبیعت مصالح و صیقلی بودن سطح و وضعیت سطوح تماس و همچنین به A و N بستگی دارد (A سطح تماس بر حسب مربع واحد طول است). با تقسیم طرفین معادله ۲-۵ به سطح A داریم:

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (۶-۲)$$

در اینجا σ_n تنش قائم در طول سطح تماس و τ تنش برشی لازم است که بایستی برای شروع لغزش به سطح وارد شود. در بین سطح دو جسم تعداد نقاط تماس زیادی ممکن است وجود داشته باشد که میزان بار وارده به این نقاط بسیار متفاوت است. ممکن است در بعضی نقاط تغییرشکل‌ها پلاستیک و در سایر نقاط الاستیک باشد (Jeager & Cook, 1979).

به این ترتیب اهمیت بالای تأثیر اصطکاک در تولید مقاومت برشی آشکار می‌گردد. در ادامه به معروف‌ترین معیارهای ارائه شده برای مقاومت برشی درزه‌های سنگی پرداخته می‌شود.

۲-۴-۲- معیار پاتون

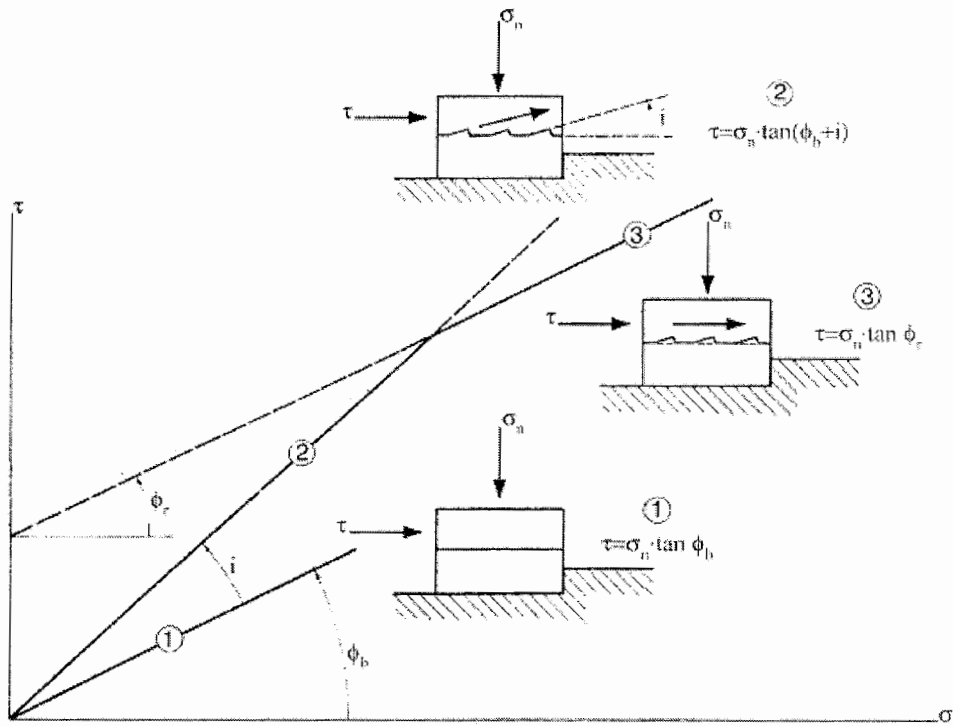
مقاومت برشی یک درزه، به مقدار حداکثر تنش برشی که در یک آزمایش برش مستقیم با تنش عمودی ثابت به دست می‌آید، اطلاق می‌شود. لذا اگر آزمایش در چندین تنش عمودی مختلف انجام شود و برای هر تنش عمودی مقدار این حداکثر به دست آید، از به هم پیوستن این نقاط، پوش مقاومت برشی آن درزه در تنش‌های عمودی مختلف می‌تواند ترسیم گردد.

پاتون با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌هایی با زبری دندان‌وار منظم تحت تنش‌های قائم مختلف، یک معیار دو خطی برای مقاومت برشی درزه‌ها پیشنهاد نمود که در رابطه ۷-۲ و ۸-۲ ارائه شده است (Patton, 1966):

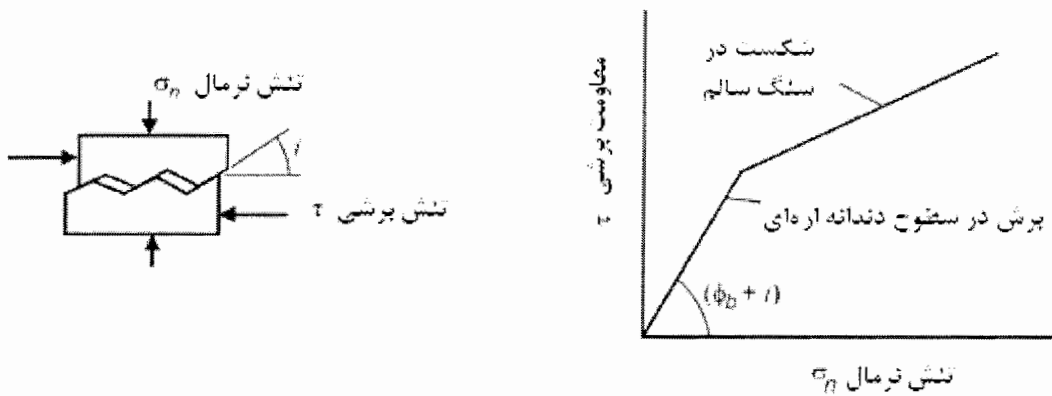
$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (7-2)$$

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan(\phi_b) \quad (8-2)$$

معادله اول بیانگر حالت لغزش و حرکت دندان‌ها بر روی یکدیگر و معادله دوم معرف بریده شدن دندان‌ها می‌باشد. در این معادلات c چسبندگی، ϕ_b زاویه اصطکاک پایه و i زاویه شیب دندان‌ها است. شکل‌های ۸-۲ و ۹-۲ پوش شکست و معیار دوخطی پاتون را برای مقاومت برشی درزه‌ها نشان می‌دهند.



شکل ۸-۲- پوش شکست دو خطی برای سطوح در معیار پاتون (Patton, 1966)



شکل ۹-۲- معیار دوخطی پاتون برای مقاومت برشی درزه‌ها (Hoek, 2000)

۲-۴-۳- معیار بارتون

بارتون مطالعات درزه‌ها را دنبال کرد و با آزمایش‌های گوناگون بر روی سنگ‌های مختلف درزه‌دار از جمله سنگ آهک و گرانیت در نهایت به این نتیجه رسید که در ترازهای پائین تنش عمودی، برای بررسی مقاومت برشی درزه، زوایای زبری مرتبه دوم هم حائز اهمیت می‌شوند. در صورتی که در تنش‌های عمودی زیاد، زبری مراتب دوم و سوم اهمیت چندانی ندارند. زوایایی که نمایانگر ناهمواری‌های اصلی و عمده سطوح ناپیوستگی هستند، به عنوان زبری مرتبه اول در نظر گرفته می‌شوند. پستی و بلندی‌های کوچک که روی سطوح ناپیوستگی و هماهنگ با زبری‌های مرتبه اول وجود دارد و معمولاً زوایای بیشتری نسبت به زبری نوع اول دارند، زبری مرتبه دوم نامیده می‌شوند. بارتون در نهایت مدل زیر را برای مقاومت برشی درزه ارائه داد (Barton, 1973):

$$\tau = \sigma_n \tan\left(\phi_b + JRC \log \frac{JCS}{\sigma_n}\right) \quad (9-2)$$

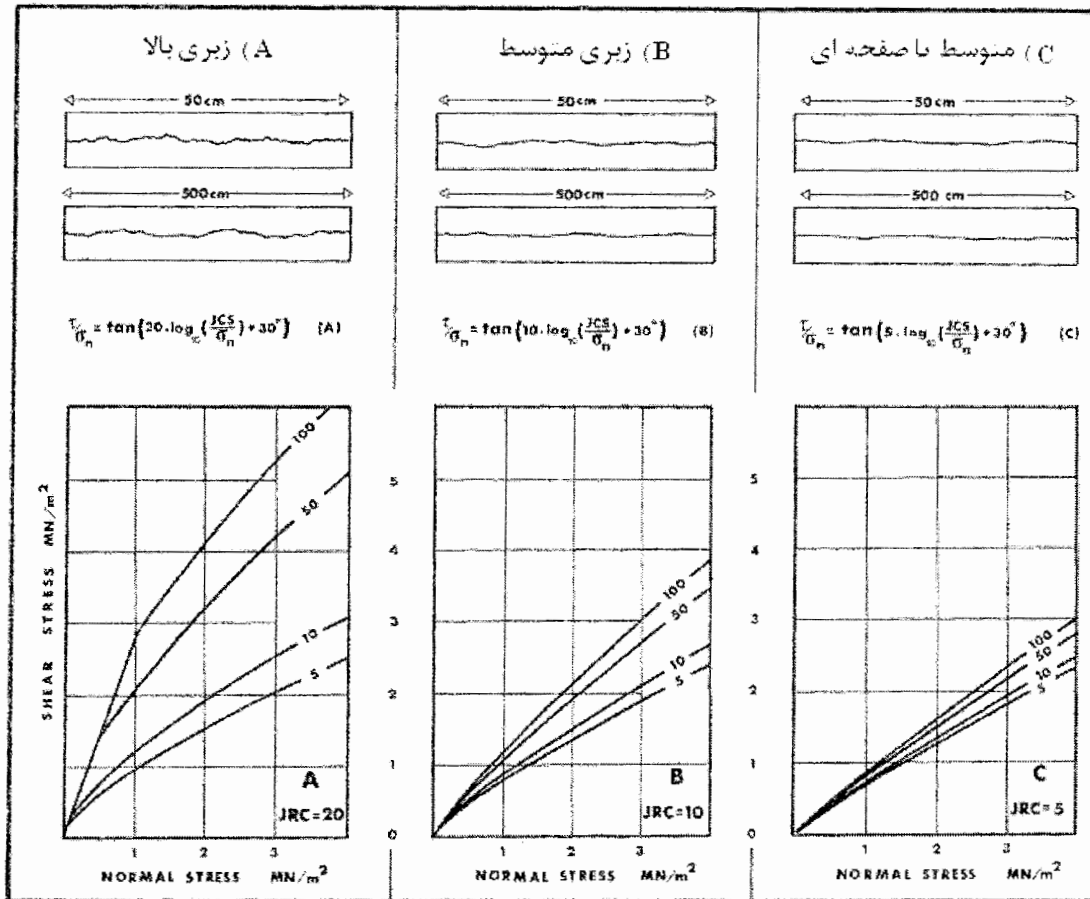
در این رابطه، JRC^1 ضریب زبری درزه است و معرف مقیاسی از میزان زبری لغزنده است که مقدار آن از صفر تا بیست ($0 \leq JRC \leq 20$) تغییر می‌کند و متناسب با صاف‌ترین تا زبرترین درزه است. JCS^2 مقاومت فشاری دیواره درزه بوده و در صورتی که درزه هوازده نباشد، با مقاومت فشاری سنگ (σ_c) برابر است. ولی اگر دیواره‌ها هوازده باشند، به حدود $(\frac{1}{4}\sigma_c)$ کاهش می‌یابد. مقدار JCS را به وسیله چکش اشمیت می‌توان در صحرا تخمین زد (Barton, 1973).

بارتون برای سه نوع درزه اصلی و مهم مقادیر $JRC=20$ ، $JRC=10$ و $JRC=5$ را به ترتیب به نحوی

¹ Joint Roughness Coefficient

² Joint Wall Compressive Strength

که در شکل ۱۰-۲ نشان داده شده است، طبقه‌بندی کرد.



شکل ۱۰-۲ - طبقه‌بندی زبری و پیش‌بینی مقاومت برشی برای درزه‌های غیرصاف‌های (Barton, 1973) (مقدار ϕ_p برای سادگی ۳۰ درجه فرض شده و برای هر منحنی مقدار JCS مربوط به آن بر حسب MN/m^2 شماره‌گذاری شده است)

۲-۴-۴- معیار تجربی جی‌گر

جی‌گر رابطه تجربی زیر را برای پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌ها پیشنهاد کرده است (Jeager,)

(1979):

$$\tau_p = C_j(1 - e^{-b\sigma}) + \sigma \tan \phi_r \quad (10-2)$$

شکل هندسی رابطه بالا در شکل ۱۱-۲ نمایش داده شده است. شیب این منحنی در نقطه $\sigma = 0$

برابر خواهد بود با:

$$\left(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma}\right)_{\sigma=0} = \tan \phi_r + C_j b \quad (11-2)$$

این شیب قابل مقایسه با شیب رابطه دوخطی است که در $\sigma = 0$ برابر است با:

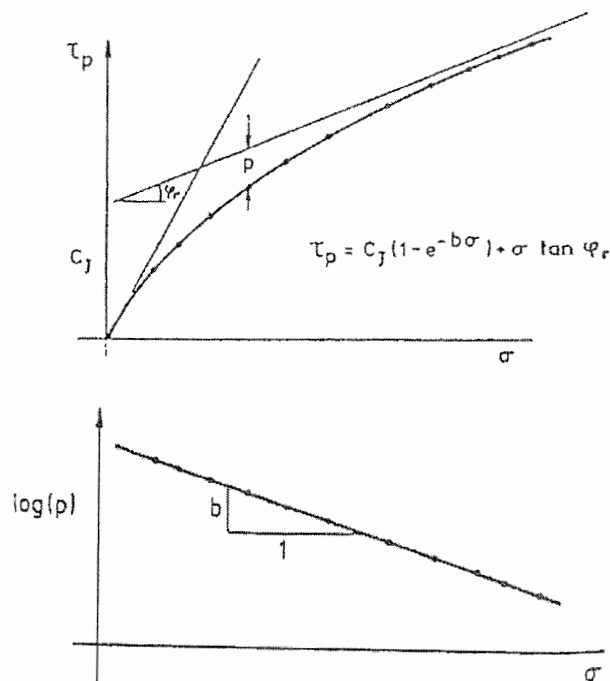
$$\left(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma}\right)_{\sigma=0} = \tan(\phi + i) \quad (12-2)$$

در رابطه جی‌گر، اگر σ به سمت تنش‌های قائم بزرگ میل کند، مقدار تنش برشی به صورت زیر خواهد بود:

$$\tau_p = C_j + \sigma \tan \phi_r \quad (13-2)$$

و شیب منحنی نیز به سمت قسمت دوم معیار پاتون (ضریب اصطکاک ماندگار) میل می‌کند:

$$\left(\frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma}\right) = \tan \phi_r \quad (14-2)$$



شکل ۱۱-۲- رابطه تجربی مقاومت برشی جی‌گر (Jeager, 1979)

شکل ۲-۱۱ یک روش ترسیمی ساده را برای ارزیابی پارامترهای رابطه جی‌گر بیان می‌کند. اگر در آزمایش‌های برشی با مقادیر مختلف تنش عمودی، مقادیر حداکثر تنش‌های برشی به دست آورده شده و به دستگاه $(\sigma - \tau)$ انتقال داده شود و سپس خط مجانب به این داده‌ها در دستگاه فوق رسم گردد، شیب این خط مجانب، زاویه ϕ_r و عرض از مبدأ آن مقدار C_j را خواهد داد.

همچنین با توجه به شکل ۲-۱۱، مقادیر مختلف P (که اختلاف عرض از مبدأ نقاط روی خط مجانب و مقاومت‌های برشی ناشی از آزمایش در تنش‌های نظیر آن می‌باشد) نیز از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$P = C_j + \sigma \tan \phi_r - \tau_p \quad (2-15)$$

حال با توجه به رابطه بالا، اگر مقادیر $\log(P)$ و σ در یک دستگاه مختصات رسم شود، خطی به دست خواهد آمد که شیب این خط با توجه به شکل برابر با b خواهد بود و به طور ترسیمی مقدار b نیز به دست می‌آید (Jeager, 1979).

جی‌گر برای درزه‌های طبیعی در دستگاه واحد انگلیسی، σ و τ را در رابطه خود با مقادیر عددی زیر بیان داشت (بر حسب psi):

$$\tau_p = 270(1 - \exp(-0.0015\sigma)) + 0.41\sigma \quad (2-16)$$

۲-۴-۵- معیار تجربی لادانی و آرچامبولت

لودانی و آرچامبولت اثر اصطکاک و به هم قفل شدن زبری‌های سطح درزه را در پیدایش مقاومت برشی درزه‌ها در نظر گرفته و رابطه (۲-۱۷) را که در مدل‌های مطالعاتی ثابت شده و از دقت

خوبی برخوردار است، ارائه نمودند (Ladanyi & Archambault, 1970).

طبق این رابطه مقاومت برشی حداکثر برابر است با:

$$\tau_p = \frac{\sigma(1-a_s)(V^0 + \tan \phi_u) + a_s S_R}{1 - (1-a_s)V^0 \tan \phi_u} \quad (17-2)$$

که در آن a_s ، V^0 و S_R توابعی از تنش عمود بر درزه می‌باشند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

a_s : مساحتی از سطح درزه که دندانه‌ها در آن تحت برش قرار می‌گیرند (یا بریده می‌شوند)

V^0 : میزان جابجائی عمودی (نرخ اتساع) در مقاومت برشی حداکثر

S_R : مقاومت برشی سنگ بکر

ϕ_u : زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه

رابطه ۱۷-۲ در تنش‌های عمودی پائین به دلیل این که عبارت a_s به سمت صفر میل می‌کند و

$V^0 = \tan i$ برقرار می‌شود، به رابطه ۷-۲ ساده می‌شود. در تنش‌های عمودی بسیار بالا نیز چون

تمامی دندانه‌ها بریده شده و $a_s = 1$ و $V^0 = 0$ خواهد شد، با قرار دادن $S_R = C_f + \sigma \tan \phi_r$ رابطه

۱۷-۲ به رابطه ۸-۲ ساده می‌گردد. در نهایت، لادانی و آرچامبولت معیاری برای S_R به صورت زیر

پیشنهاد کردند:

$$S_R = \sigma_c \frac{\sqrt{1+n}}{n} \left(1 + n \frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^{1/2} \quad (18-2)$$

که در آن σ_c مقاومت فشاری تک محوره سنگ با در نظر گرفتن دندانه‌ها و زبری (مقاومت فشاری

تک محوره دیواره درزه) و n نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی سنگ بکر می‌باشد.

لادانی و آرچامبولت توابع توانی زیر را نیز برای a_s و V^0 هنگامی که $\sigma < \sigma_T$ باشد پیشنهاد کرده‌اند:

$$a_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_T}\right)^{k_1} \quad (19-2)$$

$$V^0 = \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_T}\right)^{k_2} + \tan i_o \quad (20-2)$$

مقادیر پیشنهادی برای توان‌های k_1 و k_2 نیز توسط لادانی و آرچامبولت به صورت زیر بیان گردید:

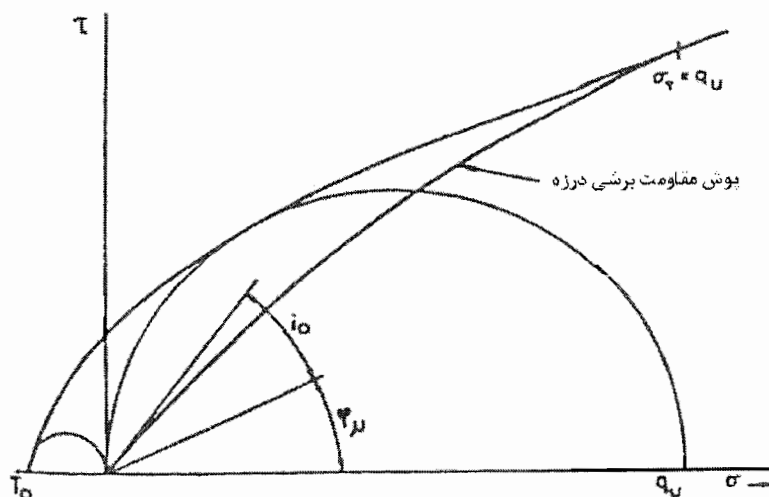
$$k_1 = 1/5$$

$$k_2 = 4$$

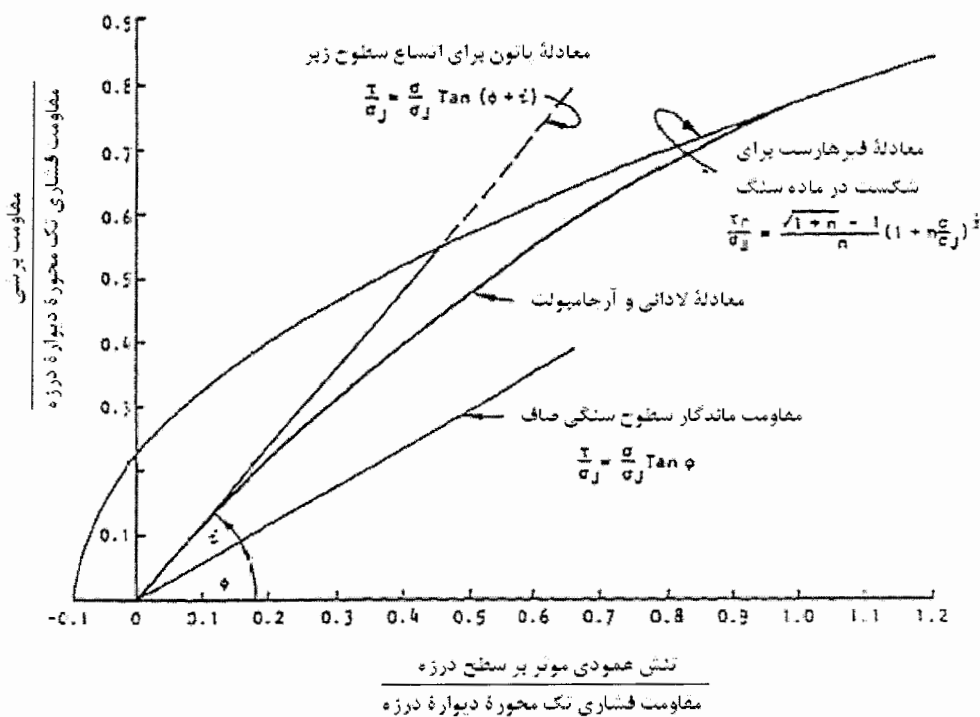
در این صورت در اثر تغییر $\sigma = 0$ تا $\sigma = \sigma_T$ ، a_s از مقدار صفر تا یک افزایش خواهد داشت و همچنین مقدار V^0 از $\tan i_o$ تا صفر کاهش می‌یابد.

مقدار تنش σ_T که تنش انتقالی^۱ نامیده می‌شود، بیانگر حالتی است که در آن دندان‌های درزه در مقابل برش حالت ضعیف‌تری نسبت به خود سنگ می‌یابند. در صورتی که داده‌های قابل دسترس و قابل اعتماد برای تعیین آن وجود نداشته باشد، با تقریب قابل قبولی می‌توان از مقاومت فشاری تک محوره دیواره درزه یعنی σ_c استفاده نمود. با توجه به مطالب ذکر شده، رابطه ۲-۱۷ معرف تغییرات مقاومت برشی درزه‌ها خواهد بود و شکل ۲-۱۲ نشان‌دهنده شکل هندسی این رابطه می‌باشد. در شکل ۲-۱۳ نیز مقایسه برخی معیارها با معیار لادانی و آرچامبولت آورده شده است.

^۱ Transition Stress



شکل ۲-۱۲- رابطه مقاومت برشی لادانی و آرچامبولت برای درزه‌های زیر (Ladanyi & Archambault, 1970)



شکل ۲-۱۳- مقایسه معیارهای مقاومت برشی درزه‌ها در انتقال از اتساع به برش (Grasselli, 2001)

فصل سوم

نقش مواد پرکننده و زبری سطح در رفتار درزه‌ها

۳-۱- مقدمه

وجود درزه‌ها در توده‌سنگ همانند تنش‌های برجا و آب‌های زیرزمینی، نقش مهمی در تغییرشکل پذیری و رفتار برشی آن دارند. مقاومت توده‌سنگ درزه‌دار به اندازه قابل توجهی کمتر از مقاومت توده‌سنگ بکر است. بنابراین برای طراحی سازه‌های زیرزمینی و تعیین پایداری شیب‌های سنگی، استفاده از پارامترهای مناسب مقاومت برشی ضروری می‌باشد. انتخاب پارامترهای صحیح مقاومت برشی برای درزه‌های موجود در سنگ‌های سخت که با مواد سست و ضعیف پر شده‌اند، بسیار مشکل است. خصوصیات مکانیکی این درزه‌ها تا حد زیادی بستگی به تمیز و بسته بودن و یا باز و پر شدن آن‌ها توسط مواد پرکننده دارد. در بعضی مواقع مواد پرکننده همانند سیمان عمل می‌کنند که در این وضعیت می‌توان از وجود درزه صرف نظر کرد. مواد پرکننده می‌تواند شامل مواد با سستی کم تا خاک‌های سست بدون چسبندگی (مثل ماسه، مواد درشت خرد شده و غیره) باشد که در درزه‌های باز و میان دو سطح دیواره درزه انباشته می‌شود. این مواد ممکن است در اثر هوازدگی و انباشت مواد دیواره درزه نیز تشکیل شده باشند (Welideniya, 2005).

در این فصل به نقش مواد پرکننده و تا حدی زبری سطح در رفتار درزه‌ها پرداخته می‌شود. برای این

منظور ابتدا انواع پرکننده‌ها و مشخصات آن‌ها آورده شده و سپس در مورد نقش پرکننده‌ها در تعیین مقاومت برشی درزه‌ها و نیز عوامل کنترل کننده مقاومت برشی درزه‌های پر شده بحث خواهد شد. تأثیر زبری سطح در میان عوامل کنترل کننده گنجانده شده است.

۳-۲- انواع پرکننده‌ها و مشخصات آن‌ها

مواد پرکننده موجود در درزه‌های سنگی را می‌توان با توجه به منشأ آن‌ها به پنج گروه اصلی طبقه‌بندی کرد (Tulinov & Molokov, 1971):

- ۱- مواد سست در مناطق شکست تکتونیکی؛
 - ۲- محصولات ناشی از هوازدگی و باربرداری دیواره درزه‌ها؛
 - ۳- خاک‌های موجود در مناطق برشی و لغزش‌های سنگی؛
 - ۴- پرکننده حفره‌های کارستی که توسط فروشست خاک‌های کربناته و انتقال به وسیله جریان آب شکل گرفته‌اند؛
 - ۵- مواد پرکننده درزه‌ها و حفره‌ها که از سطح آورده شده‌اند.
- طبق نظر لاما، مواد پرکننده غیر هیدروترمال موجود در فصل مشترک درزه‌ها بر اساس منشأ و نوع جابجائی و انتقال آن‌ها به چهار دسته تقسیم می‌گردند (Lama, 1978):
- ۱- مواد سست مانند رس، ماسه و غیره که از سطح آورده می‌شوند؛
 - ۲- انباشت محتویات آب‌های زیرزمینی که از فروشست سنگ‌های کلسیم‌دار یا آهن‌دار تشکیل شده‌اند؛

۳- مواد سست ناشی از سنگ‌های تکتونیزه؛

۴- محصولات تجزیه و هوازدگی درزه‌ها.

بر خلاف پیچیدگی بالایی که در درزه‌های طبیعی و در پرشدگی آن‌ها به چشم می‌خورد، می‌توان درزه‌ها را بر حسب پرشدگی آن‌ها به چهار گروه ساده طبقه‌بندی کرد (Ladanyi & Archambault, 1977):

الف- درزه‌های تمیز و عاری از هرگونه پرشدگی یا پوشش؛

ب- درزه‌های پوشیده شده؛

ج- پرشدگی رسی؛

د- پرشدگی ماسه‌ای.

۳-۳- نقش پرکننده‌ها در تعیین مقاومت برشی درزه‌ها

در درزه‌های صاف و صفحه‌ای، ضخامت مواد پرکننده نقش مهمی در رفتار برشی ندارد، البته به شرطی که اندازه ذرات مواد پرکننده به اندازه کافی کوچکتر از ضخامت پرشدگی باشد، به طوری که دیواره‌های درزه مانع حرکت و آرایش مجدد آن‌ها در حین برش نشود. بنابراین رفتار اصطکاکی درزه‌ها متأثر از حضور مواد پرکننده می‌باشد. در درزه‌های زبر، اندرکنش دو دیواره درزه بستگی به هندسه سطح درزه و ضخامت مواد پرکننده دارد. با این وجود، وقتی ضخامت مواد پرکننده به حد کافی زیاد باشد (یعنی بیشتر از دو برابر ارتفاع ناهمواری‌ها)، بین دیواره‌های درزه هیچ اندرکنشی وجود نخواهد داشت و بنابراین رفتار اصطکاکی درزه فقط به مواد پرکننده بستگی خواهد داشت (Indraratna &

(Welideniya, 2003). گاهی اوقات مقاومت درزه‌های پرشده کمتر از مقاومت مواد پرکننده می‌شود که این رفتار توسط کانجی مشاهده شده است (Kanji, 1974). با این حال هنگامی که ضخامت مواد پرکننده کمتر از دو برابر ارتفاع ناهمواری‌ها باشد، اندرکنش ناهمواری و ماده پرکننده بر روی رفتار برشی تأثیر خواهد گذاشت (Indraratna & Haque, 2000).

تأثیر نوع ماده پرکننده و فشار منفذی آب بر رفتار برشی درزه‌های پرشده می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود (Goodman, 1970):

۱- پوش شکست برای اکثر درزه‌های پرشده، بین ماده پرکننده و درزه تمیز و پرنشده قرار می‌گیرد.

۲- سختی^۱ و مقاومت درزه‌های پرشده با افزایش ضخامت ماده پرکننده به آرامی کاهش می‌یابد. اما حتی با ضخامت پرکننده ۱۰۰٪ ($t/a=1$) نیز این پارامترها به میزان قابل توجهی نسبت به سختی و مقاومت خود پرکننده بالاتر می‌باشند.

۳- نرخ اتساع در لحظه شکست با افزایش فشار عمودی کاهش می‌یابد، به طوری که در فشارهای عمودی بالا به سمت منفی میل می‌کند.

۴- مقاومت یک درزه پرشده همیشه به ضخامت پرکننده بستگی ندارد، به جز زمانی که دیواره‌های درزه صاف و صیقلی بوده و یا توسط لایه‌ای با ضریب اصطکاک بسیار پائین پوشانده شده باشند. صفحه شکست در این حالت همواره در محل تماس مواد پرکننده-سنگ خواهد بود.

¹ Stiffness

۵- قابلیت آماس‌پذیری^۱ برای رس‌های حاوی کانی‌های آماسی بایستی مشخص شده باشد. یکی از خطرناک‌ترین مواد پرکننده که می‌تواند در درزه‌ها یافت شود، رس آماسی است که این امر به دلیل کاهش شدید مقاومت ناشی از آماس رس و فشار بالایی است که این افزایش حجم تولید می‌کند.

۶- در صورتی که دیواره‌های درزه سنگی هوازده شده باشند، مقاومت برشی درزه‌ها می‌تواند به طور تقریبی به وسیله پوش شکست دو خطی پاتون توجیه گردد. در این حالت، هم زاویه ناهمواری‌ها (i) و هم مقاومت سنگ با افزایش درجه هوازده‌گی کاهش می‌یابد. در بخش بعد در مورد عوامل کنترل‌کننده مقاومت برشی درزه‌های پرشده به تفصیل بحث می‌شود.

۳-۴- عوامل کنترل‌کننده مقاومت برشی درزه‌های پرشده

در درزه‌های تمیز و خالی از پرکننده، عواملی نظیر شکل، اندازه، درجه زبری و تعداد نقاط تماس بین سطوح، خصوصیات مکانیکی درزه را کنترل می‌کنند. اما ممکن است ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ کاملاً پر شده باشند. مواد پرکننده می‌توانند توسط همان شکستگی یا در اثر فعالیت‌های تکتونیک (مانند بعضی از میلونیت‌ها^۲) تولید شوند، یا این که به طور مستقیم یا غیرمستقیم با شرایط محیطی در ارتباط باشند (مثل مواد پرکننده حمل شده توسط جریان آب یا ثقل و یا ناشی از شکست و هوازده‌گی مواد سطح سنگ و غیره). پرکننده‌ها ممکن است در اثر کانی‌سازی یا تبلور کانی‌ها (مانند کلسیت، کوارتز، میکا و ...) و یا از انتقال دانه‌های رس و سیلت تشکیل شده

¹ Swell ability

² Milunites

باشند. خاک‌ها می‌توانند ماسه یا گراول بوده و یا دارای خواص اصطکاکی یا مواد چسبیده مانند رس و سیلت باشند (Pereira, 1997). با توجه به دامنه گسترده مواد پرکننده، در گذشته محققین بسیاری مطالعات خود را در این زمینه انجام داده‌اند. این مطالعات نشان داد که عوامل زیر، رفتار برشی درزه‌های پرشده را کنترل می‌کنند.

✓ نوع و ضخامت ماده پرکننده

✓ اندرکنش سطح سنگ- ماده پرکننده

✓ زبری سطح درزه و شرایط مرزی مواد پرکننده

✓ شرایط زهکشی (یعنی آزمایش زهکشی شده یا زهکشی نشده است)

✓ سختی دستگاه برش

✓ تأثیر مقیاس

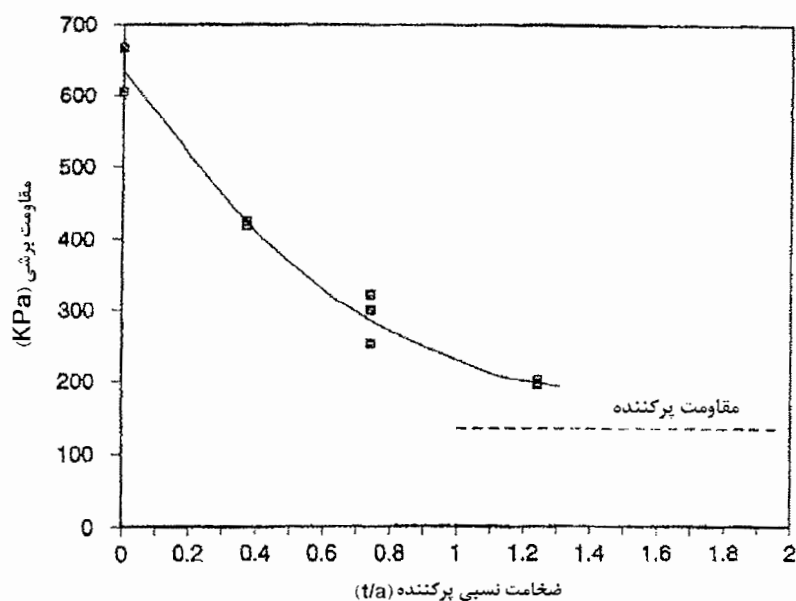
در قسمت‌های بعد، هر یک از عوامل فوق و نقش آن‌ها در رفتار اتساعی و مقاومتی درزه‌ها به طور کامل تشریح خواهند شد.

۳-۴-۱- نوع و ضخامت ماده پرکننده

علاوه بر مواد تشکیل دهنده سطح درزه، شاید مهم‌ترین عامل کنترل کننده مقاومت درزه، ضخامت مواد پرکننده باشد. مطالعات متعددی نشان می‌دهد که هر چه ضخامت مواد پرکننده بیشتر باشد، مقاومت درزه کمتر می‌شود (Goodman, 1970; Kanji, 1974; Lama, 1978; Phien-Wej et al, 1990; Papaliangas et al, 1993; DeToledo & DeFreitas, 1993). در بعضی موارد که ضخامت مواد پرکننده بزرگ‌تر از ارتفاع ناهمواری‌ها است، این وضعیت ادامه می‌یابد. نتایج به دست آمده توسط کانجی (Kanji, 1974) نشان می‌دهد که گاهی اوقات مقاومت برشی درزه می‌تواند کمتر از مقاومت خود مواد پرکننده باشد.

آزمایش‌های مختلفی توسط چندین محقق انجام شده است تا تأثیر مواد پرکننده روی رفتار برشی درزه‌ها به دقت بررسی شود (Goodman, 1970; Kanji, 1974; Ladanyi & Archambault, 1977; Lama, 1978; Phien-Wej et al, 1990; Papaliangas et al, 1993; DeToledo & DeFreitas, 1993). نتایج این آزمایش‌ها را می‌توان بسته به سطح درزه (مثلاً صاف، زبر یا دندانه‌دار) و نوع مواد پرکننده (چسبنده یا بدون چسبندگی) طبقه‌بندی کرد.

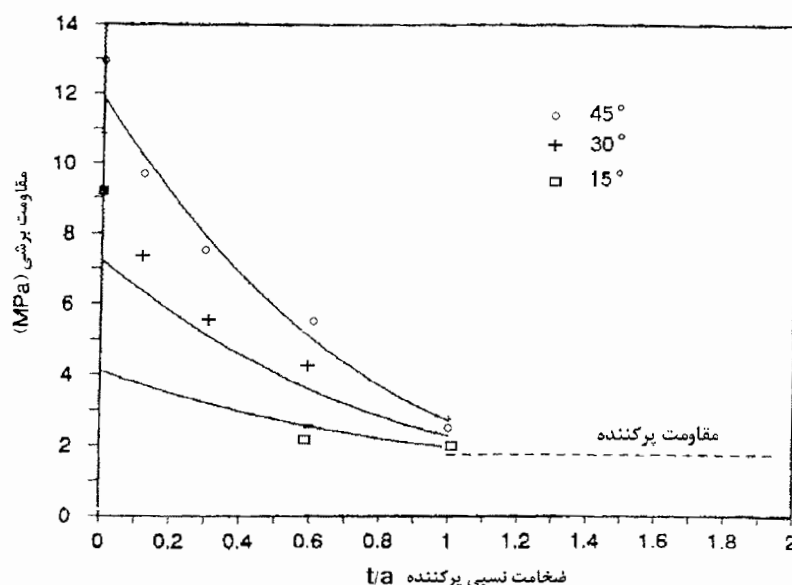
نتایج آزمایش‌های برش مستقیم توسط گودمن روی درزه‌های دندانه‌اره‌ای پر شده با میکای خرد شده نشان می‌دهد که تا نسبت t/a برابر $1/25$ (که t ضخامت پرکننده و a ارتفاع ناهمواری‌ها است) مقاومت درزه بزرگ‌تر از مقاومت مواد پرکننده تنها است (Goodman, 1970). نمودار ارائه شده توسط گودمن در شکل ۳-۱ آورده شده است.



شکل ۳-۱- مقاومت برشی درزه پر شده با میکا تحت تنش عمودی ۷۴۶ کیلوپاسکال با نسبت‌های t/a مختلف (Goodman, 1970)

تولینوف و مولوکوف با استفاده از لایه‌های ماسه و رس به ضخامت‌های ۵ و ۶ میلی‌متر، مطالعاتی بر روی سنگ‌های مختلف نظیر سنگ آهک، ماسه‌سنگ و مارن انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که یک لایه نازک ماسه تأثیر زیادی روی رفتار اصطکاکی سنگ‌های سخت ندارد. اما در مورد سنگ‌های نرم (مانند مارن)، تأثیر بالایی بر روی زاویه اصطکاک دارد (Tulinov & Molokov, 1971).

لادانی و آرچامبولت با استفاده از رس کائولینی آزمایش‌های برش مستقیم بر روی بلوک‌های بتنی انجام دادند (Ladanyi & Archambault, 1977). نتایج آن‌ها بسیار شبیه به نتایج گودمن (۱۹۷۰) است. همچنین آن‌ها دریافتند که هر چه شیب ناهمواری‌ها بیشتر باشد، مقاومت برشی بیشتر است و با کاهش نسبت t/a، افزایش مقاومت برشی هم زیادتر خواهد بود. نتایج به دست آمده در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



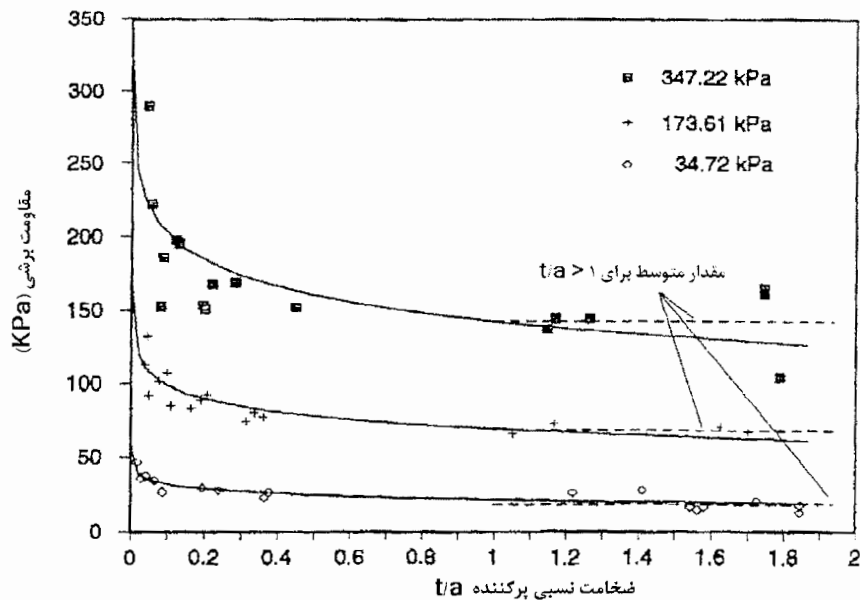
شکل ۳-۲- مقاومت برشی درزه‌های پر شده با کائولن تحت تنش عمودی ۸/۶۹ مگاپاسکال با زوایای ناهمواری مختلف (Ladanyi & Archambault, 1977)

لما یک سری آزمون‌های آزمایشگاهی روی مدل درزه‌های کششی پر شده با کائولن انجام داد. او در این آزمایش‌ها از گچ سخت برای شبیه‌سازی سنگ استفاده نمود. وی به این نتیجه رسید که در بعضی موارد حتی در نسبت t/a کوچکتر از یک، مقاومت درزه به مقاومت خاک می‌رسد. اما برای سه سطح تنش عمودی مختلف که در شکل ۳-۳ آمده است، پوش داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، بسیار نزدیک به میانگین نتایج به دست آمده برای $t/a > 1$ است (Lama, 1978).

کوتر و راوتنبرگ دریافتند که مقاومت درزه‌های پر شده با رس، با افزایش زبری سطح افزایش می‌یابد، در حالی که مقاومت برشی درزه‌های پر شده با ماسه اندکی زیاد می‌شود. در نهایت، مقاومت برشی کل درزه با افزایش ضخامت پرکننده کاهش می‌یابد (Kutter & Rautenberg, 1979). وانه و همکارانش اظهار کردند که با افزایش ضخامت ماده پرکننده تا یک حد بحرانی، جابجایی برشی متناظر با تنش برشی حداکثر به صورت تدریجی افزایش می‌یابد، به طوری که بعد از این حد بحرانی، تنش برشی

فقط توسط مواد پرکننده کنترل شده و تنش برشی حداکثر نیز در جابجائی برشی کوچکتری به دست

می‌آید (Wanhe et al, 1981).



شکل ۳-۳- تغییرات مقاومت برشی درزه‌های پر شده با کائولن با افزایش نسبت t/a ، تحکیم یافته در تنش عمودی ۳۵۰ کیلوپاسکال (Lama, 1978)

فین وج و همکارانش آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های گچی دندان‌اره‌ای پر شده با بنتونیت خشک انجام دادند. نتایج این آزمایش‌ها (شکل ۳-۴) نشان می‌دهد هنگامی که نسبت t/a به

۲ می‌رسد، مقاومت درزه برابر با مقاومت مواد پرکننده می‌شود (Phien-Wej et al, 1990).

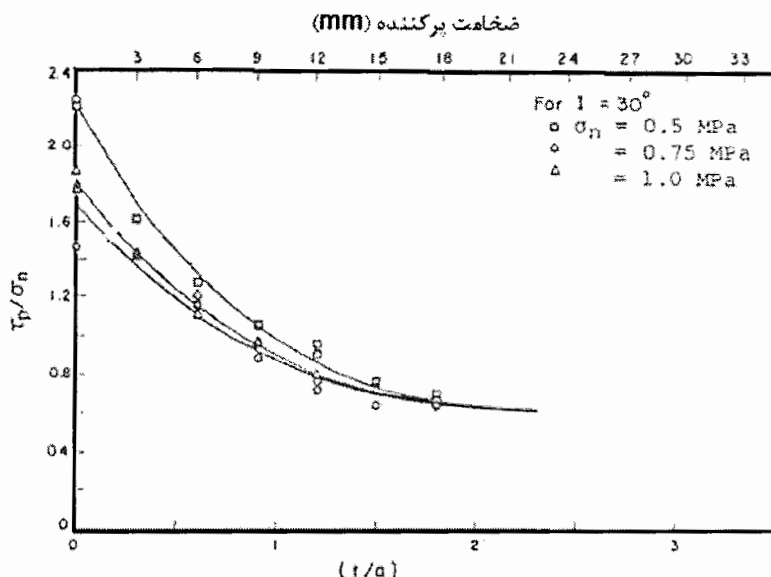
ارل بیان کرد که افزایش مواد پرکننده زاویه اصطکاک را کاهش داده و چسبندگی را افزایش می‌دهد.

مدل فیزیکی که مورد استفاده قرار گرفته بود از مخلوط رزین اپوکسی، ماسه و عمل‌آورنده درست

شده بود. مقاومت فشاری تک محوره متوسط نمونه‌ها حدود ۱۶۰ مگاپاسکال بود و ضریب زبری درزه

(JRC) از ۰ تا ۱۰ تغییر می‌کرد. رس مصنوعی متشکل از ماسه، کائولینیت، گچ و آب به عنوان

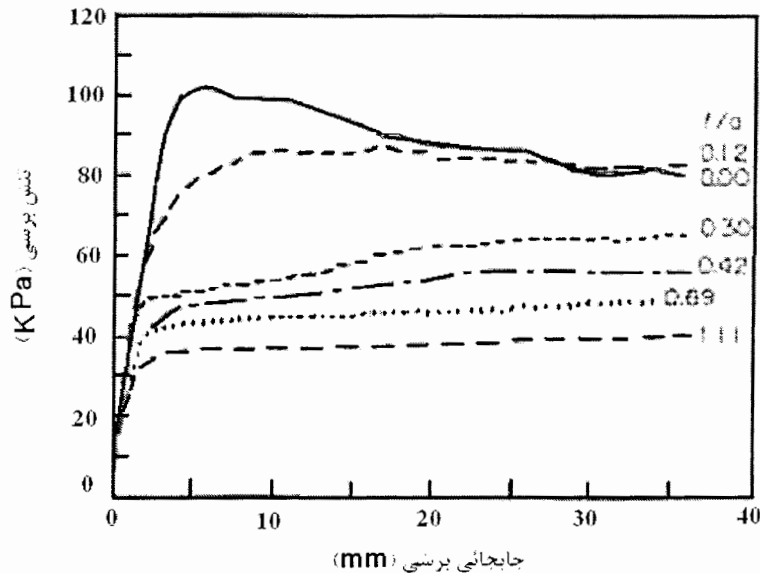
پرکننده به کار رفته بود (Ehrle, 1990).



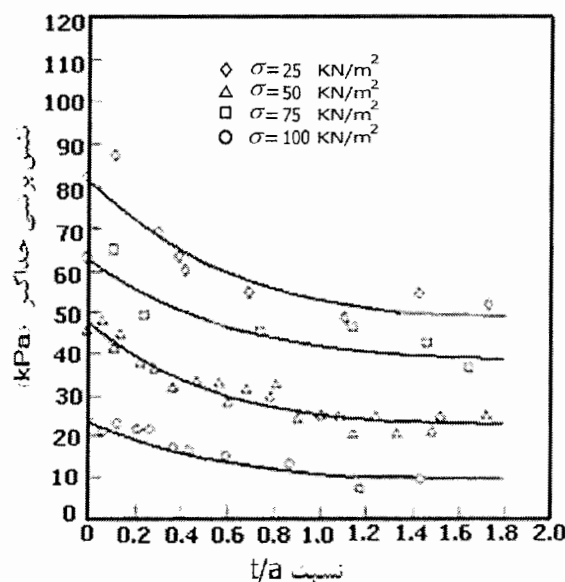
شکل ۳-۴- تأثیر نسبت t/a بر مقاومت برشی حداکثر درزه‌ها (Phien-Wej et al, 1990)

پاپالیانگاس و همکارانش آزمایش‌های مفصلی روی درزه‌های گچی-سیمانی مدل که با کائولین، پودر مرمر و خاکستر آتشفشانی سائیده شده (PFA) پر شده بودند، انجام دادند. نتایج نشان داد که مقاومت برشی درزه‌های حاوی کائولین در نسبت t/a برابر با $0/6$ به حد ثابتی می‌رسد. در حالی که مقاومت سایر نمونه‌های حاوی پودر مرمر یا خاکستر آتشفشانی در نسبت t/a بین $1/25$ تا $1/5$ ثابت می‌شود (شکل ۳-۵). نتایج آزمایش روی درزه‌های مدل پر شده با PFA در شرایط CNL نشان می‌دهد که با وجود یک لایه پرکننده بسیار نازک، منحنی مقاومت در یک جابجایی برشی کوچک، نقطه حداکثر مشخصی خواهد داشت. اگر نسبت t/a افزایش یابد نقطه حداکثر نامشخص تر شده و در جابجایی برشی بزرگ‌تری به دست می‌آید (Papaliangas et al, 1993). تغییرات تنش برشی حداکثر بر حسب نسبت t/a در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است. حتی با افزایش یک لایه نازک پرکننده، کاهش بارزی در مقاومت برشی پیش می‌آید. این امر به دلیل پوشیده شدن ساختار سطح و به وجود آمدن اصطکاک غلطشی در حین برش است. بعد از نسبت t/a بحرانی، افت بزرگی در نمودار تنش برشی حداکثر بر

حسب نسبت t/a مشاهده می‌شود که علت آن پیشرفت برش در مسیره‌های کم مقاومت‌تر می‌باشد. تنش برشی حداکثر در نسبت t/a بین $1/25$ تا $1/5$ به یک مقدار حداقل می‌رسد و پس از آن ثابت می‌ماند (Papaliangas et al, 1993). این تغییرات در شکل ۳-۶ قابل مشاهده است.

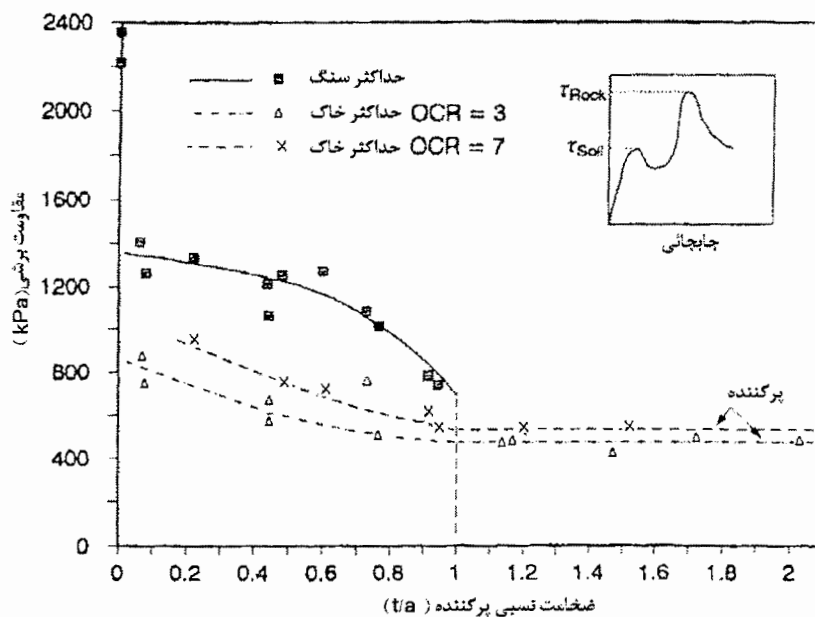


شکل ۳-۵- نمودارهای تنش برشی - جابجایی برشی برای نسبت‌های مختلف t/a (Papaliangas et al, 1993)



شکل ۳-۶- تغییرات تنش برشی حداکثر با نسبت‌های مختلف t/a در شرایط CNL (Papaliangas et al, 1993)

دتولدو و دفریتاس نتایج آزمایش‌های برش چرخشی خود را روی ماسه‌سنگ پنیتریت و رس گاولت ارائه دادند. درزه‌ها در دو سطح مختلف تنش، تحکیم یافته و در تنش نرمال ۱ مگاپاسکال بریده شدند. نتایج آزمایش‌ها (شکل ۳-۷) دو نقطه حداکثر به نام «حداکثر خاک» و «حداکثر سنگ» را نشان می‌دهند. در نسبت t/a کوچکتر از یک، مقاومت برشی حداکثر خاک کاهش می‌یابد و بعد از این مقدار t/a بدون تغییر باقی می‌ماند. مقاومت برشی حداکثر سنگ یا مقاومت نهایی درزه برابر مقاومتی است که بدون اعمال تنش تحکیم روی مواد پرکننده به دست می‌آید و در نسبت t/a برابر یک، این مقاومت بزرگ‌تر از مقاومت خاک تنها است. وقتی جابجائی برشی به حدی برسد که در حین آزمایش، سنگ‌های دیواره‌های درزه با هم تماس پیدا کنند، مقاومت درزه توسط ناهمواری‌های سنگی کنترل می‌شود (DeToledo & DeFreitas, 1993).



شکل ۳-۷- تغییرات مقاومت برشی درزه و خاک پرکننده با نسبت ضخامت نسبی t/a در تنش عمودی ۱ مگاپاسکال

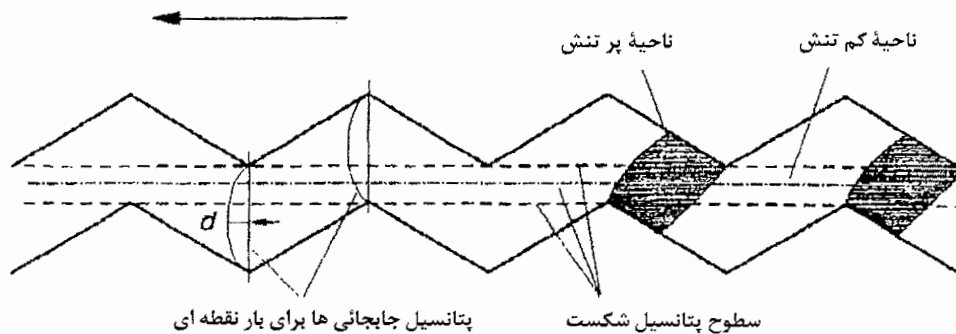
(DeToledo & DeFreitas, 1993)

۳-۴-۲- اندرکنش سطح سنگ - ماده پرکننده

در بعضی موارد سختی مواد پرکننده می‌تواند بر مقاومت درزه تأثیر بگذارد که علت آن اختلاف خصوصیات مکانیکی دو ماده می‌باشد. نقش مواد پرکننده فقط ضعیف کردن درزه نیست، بلکه تحمیل کردن نوعی مکانیزم خرابی متفاوت با مکانیزم خرابی درزه خالی یا ماده پرکننده تنها است. در عمل فرض می‌شود که کمترین مقاومت برشی درزه سنگی پرشده، همان مقاومت برشی ماده پرکننده است. سطح برش می‌تواند در مرز بین دو ماده مختلف اتفاق بیفتد (Giuseppe, 1970; Clark & Meyerhof, 1972). همان طور که محققان بسیاری اشاره کرده‌اند، خرابی برشی یک درزه پرشده در دو مرحله صورت می‌گیرد (Barton & Choubey, 1977; DeToledo & DeFreitas, 1993):

- **مرحله اول:** تنش برشی و جابجائی برشی تنها توسط مقاومت مواد پرکننده کنترل می‌شود.
- **مرحله دوم:** بعد از مقداری جابجائی، دو دیواره با هم تماس پیدا کرده و مقاومت درزه فقط توسط شکل ناهمواری‌ها و مقاومت سنگ کنترل می‌شود.

بسته به مقدار تنش عمودی، در اثر لغزش یک بلوک بر روی بلوک دیگر اتساع حاصل می‌شود. سپس شکست ناهمواری‌ها ایجاد خواهد شد که این پدیده در درزه‌های خالی به طور رایج اتفاق می‌افتد. وقتی ضخامت پرکننده از ارتفاع ناهمواری‌ها بیشتر شود، درزه در طول صفحه پیوسته‌ای تخریب می‌شود که این صفحه ناهمواری‌های سنگ را قطع نمی‌کند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که مقاومت برشی درزه برابر با مقاومت ماده پرکننده تنها باشد. همین طور روشن است که اگر ضخامت ماده پرکننده کمتر از ارتفاع ناهمواری‌ها باشد، مقاومت برشی درزه بیشتر از مقاومت ماده پرکننده تنها می‌شود و علت آن اندرکنش ناهمواری‌ها در حین برش است.



شکل ۳-۸- تمرکز تنش در درزه پر شده (DeToledo & DeFreitas, 1993)

اختلاف سختی سنگ و ماده پرکننده پیشرفت خرابی را تسریع می‌کند (DeToledo & DeFreitas, 1993). در شکل ۳-۸ در حالی که نمونه سنگی بی‌حرکت نگه داشته شده است، پتانسیل جابجایی‌هایی مشاهده می‌شود که در اثر اعمال نیروی نقطه‌ای افقی به ماده پرکننده ایجاد شده و از نوک ناهمواری‌ها می‌گذرد. ماده پرکننده در درزه‌های منظم سنگی نمی‌تواند به طور یکپارچه در جهت برش تغییرشکل دهد و عدم یکپارچگی بیشتر در نوک ناهمواری‌ها اتفاق می‌افتد، جایی که تمرکز تنش وجود دارد و پیشرفت صفحه خرابی را تسریع می‌کند. بنابراین صفحه خرابی از نوک و لبه ناهمواری‌ها شروع شده و به طرف سایر قسمت‌های ماده پرکننده گسترش می‌یابد که در نهایت موجب ایجاد مقاومت برشی کوچکتر از مقاومت خاک تنها می‌شود (DeToledo & DeFreitas, 1993).

۳-۴-۳- زبری سطح درزه و شرایط مرزی مواد پرکننده

پارامتر دیگری که می‌تواند بر مقاومت درزه‌های پر شده تأثیر بگذارد، شرایط صفحه اندرکنش سنگ- ماده پرکننده است که به عنوان زبری سطح درزه سنگ شناخته می‌شود. کاندجی برای بررسی

تأثیر صفحه‌ اندرکنش سنگ- خاک و زبری سطح درزه، آزمایش‌هایی بر روی درزه‌های پرشده انجام داد. درزه‌های دارای سطوح دندان‌اره‌ای و سطوح صیقلی از جنس سنگ آهک و بازالت که در آن‌ها از خاک‌های مختلفی به عنوان ماده پرکننده استفاده شده بود در جعبه‌ برش آزمایش شدند (Kanji, 1974). این نتایج به صورت نسبت مقاومت برشی درزه به مقاومت برشی خاک تنها در جدول ۱-۳ آورده شده است که بیان می‌کند در بعضی مواقع ممکن است مقاومت درزه پرشده کمتر از مقاومت خاک پرکننده باشد. به نظر می‌رسد که میزان کاهش مقاومت تابعی از زبری سطح و کانی‌های رسی موجود است.

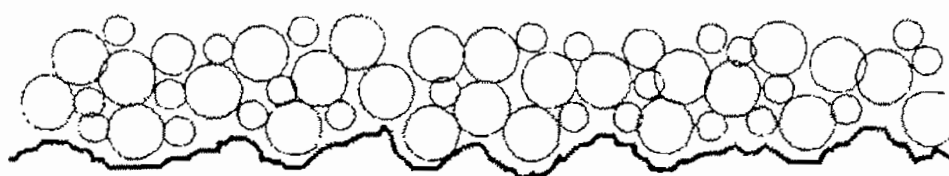
جدول ۱-۳- تأثیر شرایط مرزی بر مقاومت درزه‌های پرشده (Kanji, 1974)

$\tau_{joint} / \tau_{Soil}$	سنگ	سطح	خاک
۰/۹۵	سنگ آهک	دندان‌اره‌ای	رس کائولین ماسه‌ای
۰/۹۶	سنگ آهک	دندان‌اره‌ای	کائولین خالص
۰/۹۲	سنگ آهک	صیقلی	رس کائولین ماسه‌ای
۰/۸۸	سنگ آهک	صیقلی	کائولین خالص
۰/۹۱	سنگ آهک	صیقلی	ایلیت
۰/۷۶	سنگ آهک	صیقلی	رس مونت‌موریلونیتی
۰/۶۱	بازالت	صیقلی	رس مونت‌موریلونیتی

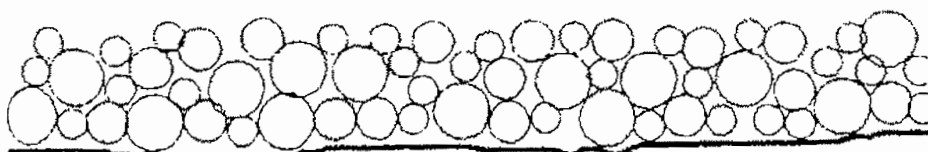
پیرا از ماسه به عنوان پرکننده بین دو بلوک گرانیتی استفاده کرد و بیان کرد که به علت غلطش دانه‌های ماسه، سطح خرابی در مرزهای جسم ایجاد می‌شود. مرز جسم به دو طریق مقاومت درزه را کاهش می‌دهد. در پرشدگی با رس، لغزش در طول سطح تماس و به علت ردیف شدن ذرات اتفاق می‌افتد. در حالی که در پرشدگی با ماسه به نظر می‌رسد غلطش دانه‌ها عامل اصلی تضعیف درزه باشد. رفتار اصطکاکی درزه‌های پرشده با مواد دانه‌درشت، تحت تأثیر صفحه‌ تماس سنگ و ماده

پرکننده است. وقتی ضخامت برابر با قطر متوسط ذرات شود، وضعیت اصطکاک غلطشی پیش می‌آید. مقدار تأثیر زبری سطح بستگی به اندازه ذرات خاک دارد. به صورت ساده، وقتی از ماسه به عنوان پرکننده استفاده شود و سطح سنگ صاف‌تر از زبری سطح ماسه باشد و نیز وقتی اتساع کم باشد، تأثیر مرزهای سنگ کاملاً محسوس خواهد شد (Pereira, 1990b).

به طوری که در شکل ۳-۹ مشاهده می‌شود، دو درزه با زبری سطح مختلف با یک نوع ماسه پر شده‌اند. درزه نشان داده شده در شکل ۳-۹-الف به اندازه کافی زبر است تا از حرکت ذرات ماسه در سطح تماس سنگ جلوگیری کند و مکانیزم خرابی متشکل از «اصطکاک لغزشی» خواهد بود. در مقابل، درزه شکل ۳-۹-ب صاف است و به ذرات ماسه اجازه چرخش بر روی مرز سنگی را می‌دهد. بنابراین فقط «اصطکاک غلطشی»، مکانیزم غالب در خرابی خواهد بود. در پرشدگی با رس، زبری بسیار کم عامل کاهش مقاومت برشی درزه می‌باشد (DeToledo & DeFreitas, 1993).



(الف)



(ب)

شکل ۳-۹- سطح تماس درزه سنگی- ماسه؛ الف- سطح زبر، ب- سطح صاف و تأثیر ضعیف‌کنندگی درزه (DeToledo & DeFreitas, 1993)

۳-۴-۴- تأثیر شرایط زهکشی

شرایط زهکشی از عوامل مهمی است که در طول برش، رفتار برشی درزه‌های پرشده را کنترل می‌کند. مقاومت برشی زهکشی شده همیشه بزرگ‌تر از مقاومت برشی زهکشی نشده است. بنابراین سرعت جابجائی برشی بایستی مطابق با نیاز پارامترهای مقاومتی یعنی شرایط زهکشی یا عدم زهکشی باشد (Indraratna & Haque, 2000). یورنیوس و فاگرستروم یک سری تست‌های آزمایشگاهی بر روی مارل‌های گچی (سنگ متوسط تا نرم) پرشده با بنتونیت تحت شرایط بار نرمال ثابت انجام دادند. آزمایش‌های برشی در شرایط تحکیم‌یافته و زهکشی نشده و با سرعت برش ۰/۶ تا ۰/۷ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. با مقایسه نتایج این آزمون‌های آزمایشگاهی با نتایج آزمایش‌های برجاء، مطابقت این دو آزمایش تایید گردید (Eurenius & Fagerstrom, 1969). دتولدو و دفریتاس روی درزه‌های پرشده، آزمایش‌هایی با سرعت‌های برش مختلف انجام دادند و دریافتند که در سرعت برش کم که با شرایط زهکشی شده مطابقت دارد، مقاومت برشی درزه‌ها بزرگ‌تر از مقاومت نمونه‌هایی است که با سرعت برشی بیشتر (یعنی زهکشی نشده) بریده می‌شوند (DeToledo & DeFreitas, 1993).

۳-۴-۵- تأثیر سختی خارجی (سختی دستگاه برش)

تمام نتایج آزمایش‌های مربوط به درزه‌های پرشده که تا به اینجا در این فصل گفته شد، حاصل آزمایش‌های برش مستقیم یا برش چرخشی در شرایط CNL بود. همان طور که در فصل دوم ذکر شد، این وضعیت برای درزه‌های قرار گرفته در موقیت‌های سطحی و کم‌عمق مناسب می‌باشد. در

مقابل، برش درزه‌ها در اعماق زیاد و روباره سنگین در شرایط سختی نرمال ثابت (CNS) اتفاق می‌افتد.

چنگ و همکارانش صفحات سنگ- بتن پرشده با مخلوط جانستون (مخلوط پودر مادستون، سیمان و آب) را در شرایط CNS مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که متفاوت با شرایط CNL، یک لایه بسیار نازک پرکننده (ضخامت کمتر از ۱ میلی‌متر) نمی‌تواند مقاومت درزه را به اندازه زیادی کاهش دهد. این مقاومت تقریباً در درزه‌های خشک بدون پرشدگی و با پرشدگی حدود ۲ میلی‌متر مشاهده شد (Cheng et al, 1996). این نتایج با یافته‌های تعداد زیادی از محققان در شرایط CNL مغایرت دارد. در صورتی که برای پرکننده‌های ضخیم‌تر، دو حالت CNL و CNS یکسانند (Indraratna & Haque, 2000).

۳-۴-۶- تأثیر مقیاس^۱

توده‌های سنگی توده‌هایی غیر همگن بوده و از ناپیوستگی‌ها تشکیل شده‌اند. بنابراین نتیجه به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی، اغلب به اندازه نمونه و محلی که نمونه‌ها از آنجا جمع‌آوری شده‌اند بستگی دارد. تغییر خصوصیات در اثر تغییر اندازه، تأثیر مقیاس نامیده می‌شود. در اغلب سنگ‌ها افزایش اندازه نمونه باعث کاهش مقاومت سنگ می‌گردد (Barton, 1987; Hoek & Brown, 1980; Bandis, 1990). اما مقیاس اثر ناچیزی بر مقاومت برشی درزه‌های سنگی پرشده دارد (Salas, 1968; Infanti & Kanji, 1978; Blejwas & Hansen, 1990).

^۱ Scale Effect

فصل چہارم

معرفی منطقہ مورد مطالعہ

۴-۱- مقدمه

در این فصل به نحوه انتخاب منطقه نمونه‌برداری از میان مناطق مورد نظر و معرفی کامل منطقه انتخاب شده از نظر موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی، ریخت‌شناسی، سازندهای تشکیل دهنده، گسل‌های موجود و تکتونیک منطقه نمونه‌برداری پرداخته می‌شود.

۴-۲- انتخاب منطقه نمونه‌برداری

به منظور انتخاب یک محل برای انجام عملیات نمونه‌برداری، ابتدا سه منطقه اصلی به عنوان مناطق اولیه در نظر گرفته شدند. سپس یکی از این مناطق به دلایلی که خواهد آمد، به عنوان منطقه نمونه‌برداری در این تحقیق انتخاب گردید.

مناطق مورد نظر اولیه عبارتند از:

- ۱- نواحی زغالی شمال شرق کشور شامل سقف معادن طزره، تخت و قشلاق
- ۲- شیب‌های سنگی پله‌های معدن سرب و روی انگوران زنجان
- ۳- شیب‌های سنگی گردنه خوش‌بیلاق واقع در جاده ارتباطی بین استان‌های سمنان و گلستان

در ابتدای تحقیق، از هر سه منطقه مذکور بازدید و مشاهدات صحرایی به عمل آمد. در مورد سنگ‌های سقف معادن زغالی، اثری از وجود پرکننده در درزه‌ها دیده نشد. این پدیده به احتمال بسیار زیاد به علت واقع شدن درزه‌ها در عمق زمین می‌باشد. نفوذ مواد سیال به اعماق و پر کردن چنین درزه‌هایی، در طبیعت به سختی امکان‌پذیر است. به همین دلیل، این مورد با اهداف اولیه تحقیق سازگار تشخیص داده نشد. از طرفی پس از نمونه‌برداری اولیه و انجام تست برشی بر روی این نمونه‌ها، مشاهده گردید که نمونه‌های شیلی و آرژلیتی گرفته شده از سقف معادن، از استحکام کافی برای قرار گرفتن و انجام آزمایش در جعبه برش برخوردار نبودند، به طوری که پس از اعمال کم‌ترین بار قائم بر روی نمونه، بخشی از سطح مشترک درزه تخریب می‌شد.

پس از مشاهدات صحرایی به عمل آمده از دو منطقه دیگر، میزان پرشدگی درزه‌ها در واحد طول خط برداشت¹ مدنظر قرار گرفت که در این مورد شیب‌های سنگی واقع در جاده خوش‌بیلاق از نظر پرشدگی درزه‌ها در سطوح بالاتری قرار داشتند. همچنین میزان بارندگی سالیانه هر دو منطقه بررسی شد که منطقه اخیر از متوسط بارندگی بسیار بالاتری برخوردار بود (سالنامه آماری سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۵). باران‌های موسمی تأثیر بسزایی در شسته شدن خاک بالادست منطقه داشته و سبب نفوذ آن در درزه‌های دارای بازشدگی می‌گردند. منطقه خوش‌بیلاق از نظر میزان بارندگی سالیانه در میان نواحی مشابه در شمال شرق کشور نیز از متوسط بسیار بالایی برخوردار است.

بدین ترتیب پس از مطالعات جامع بر روی منطقه، رخساره شیب‌های سنگی گردنه خوش‌بیلاق واقع در جاده ارتباطی بین استان‌های سمنان و گلستان به عنوان منطقه نمونه‌برداری این تحقیق انتخاب

¹ Scanline

شد که در بخش بعد به تفصیل معرفی می‌گردد. نمونه‌ای از رخساره شیب‌های سنگی موجود در گردنه خوش‌بیلاق در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.

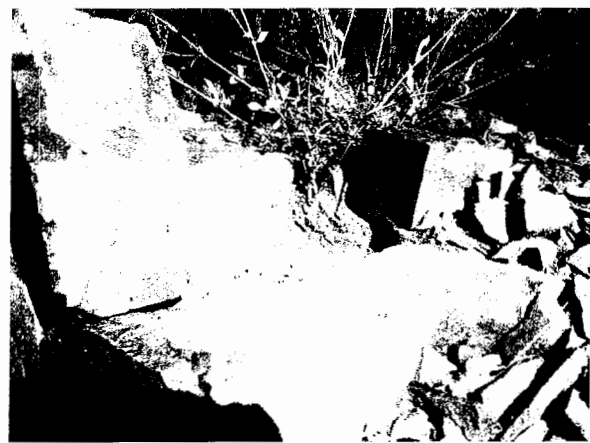


شکل ۱-۴- نمونه‌ای از رخساره شیب‌های سنگی واقع در گردنه خوش‌بیلاق

همچنین در مشاهدات صحرایی انجام شده، پرشدگی‌های متعددی از خاک خود منطقه در درزه‌های سنگی موجود دیده شد. نمونه‌ای از این پرشدگی‌ها در شکل ۲-۴ آورده شده است..



(الف)



(ب)

شکل ۲-۴- نمونه‌ای از پرشدگی مشاهده شده در درزه‌های منطقه؛ الف- درزه بسته، ب- درزه باز شده

با در نظر گرفتن طبقه‌بندی‌های مختلف برای مواد پرکننده موجود در درزه‌ها (بخش ۳-۲)، می‌توان قرارگیری پرکننده‌های مشاهده شده در منطقه خوش‌بیلاق را در این طبقه‌بندی‌ها مشخص نمود.

با توجه به طبقه‌بندی تولینوف و مولوکوف (Tulinov & Molokov, 1971)، پرکننده‌های مشاهده شده در منطقه، جزو دسته پنجم (مواد آورده شده از سطح) قرار می‌گیرند. طبق طبقه‌بندی لاما مواد پرکننده غیر هیدروترمال موجود در فصل مشترک درزه‌ها بر اساس منشأ و نوع جابجائی و انتقال آن‌ها به چهار دسته تقسیم می‌شوند (Lama, 1978) که مواد موجود در منطقه مذکور در گروه اول (مواد سست مانند رس، ماسه و غیره که از سطح آورده می‌شوند) طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به طبقه‌بندی لادانی و آرچامبولت (Ladanyi & Archambault, 1977) نیز مواد پرکننده خوش‌بیلاق در گروه‌های سه و چهار که پرکننده‌های رسی و ماسه‌ای می‌باشند، قرار می‌گیرند.

۳-۴- معرفی منطقه خوش‌بیلاق

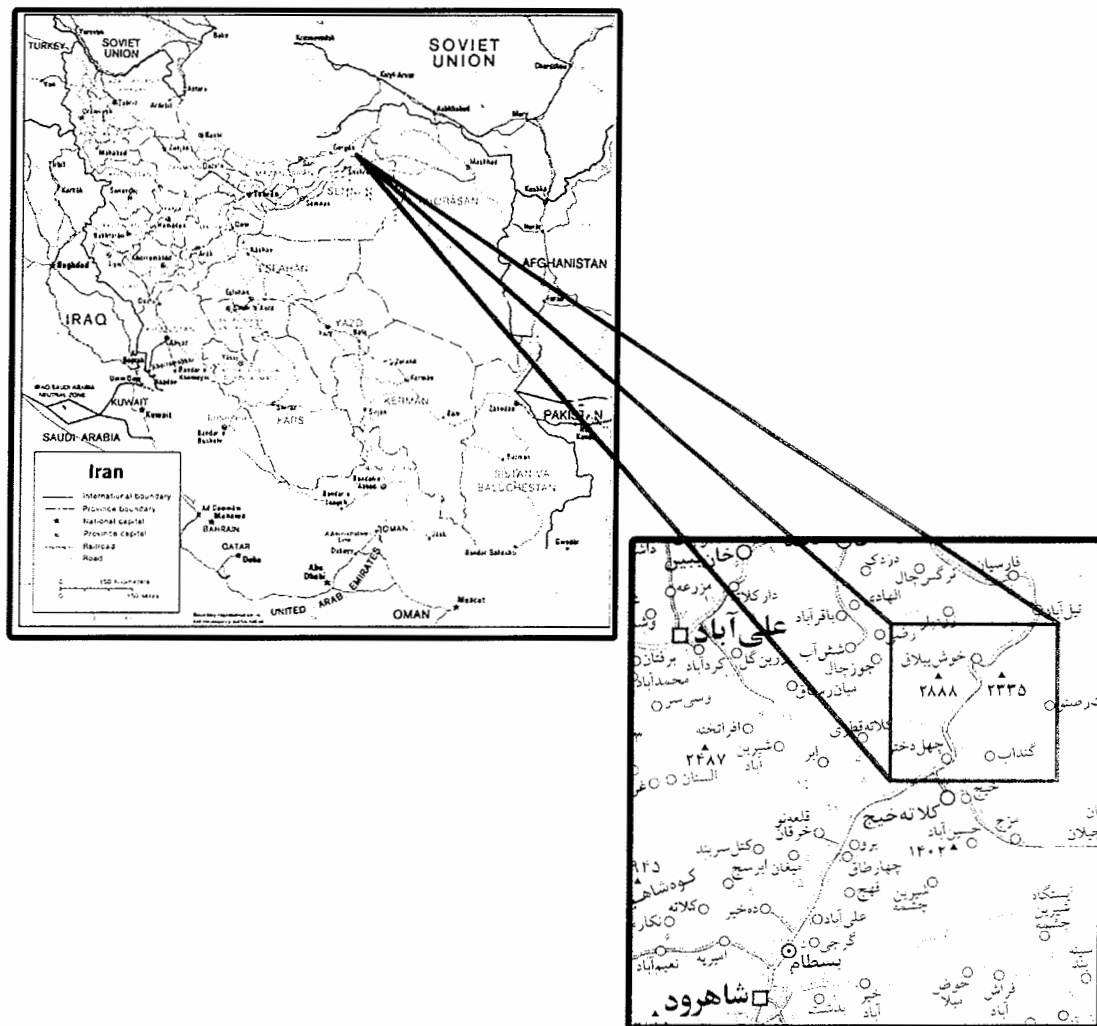
۳-۴-۱- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد نظر در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ خوش‌بیلاق بین طول‌های جغرافیایی 55° و $55^{\circ} 30'$ و عرض‌های جغرافیایی 37° و $36^{\circ} 30'$ واقع شده است. مختصات دقیق نقطه ابتدا و انتهای نمونه‌برداری میان طول و عرض $38^{\circ} 52' 48''$ و $55^{\circ} 28' 18''$ و طول و عرض $55^{\circ} 24' 56''$ و $36^{\circ} 50' 42''$ قرار گرفته است. مهم‌ترین راه دسترسی به منطقه، جاده آسفالت‌شده شاهرود- آزادشهر می‌باشد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰). آب و هوای منطقه نمونه‌برداری خنک و کوهستانی بوده و میانگین میزان بارندگی سالیانه ۱۰۰-۴۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد

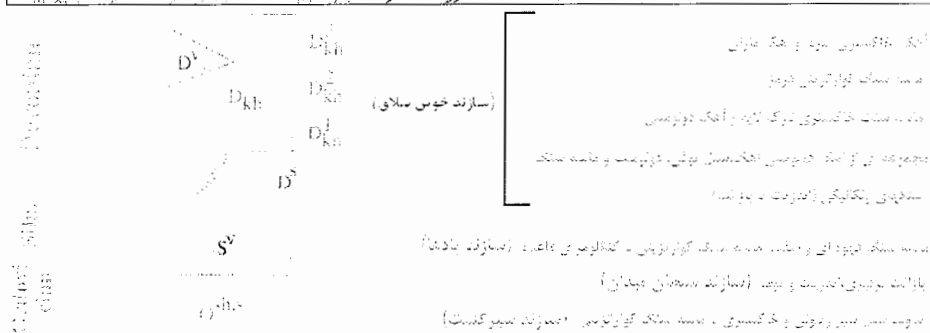
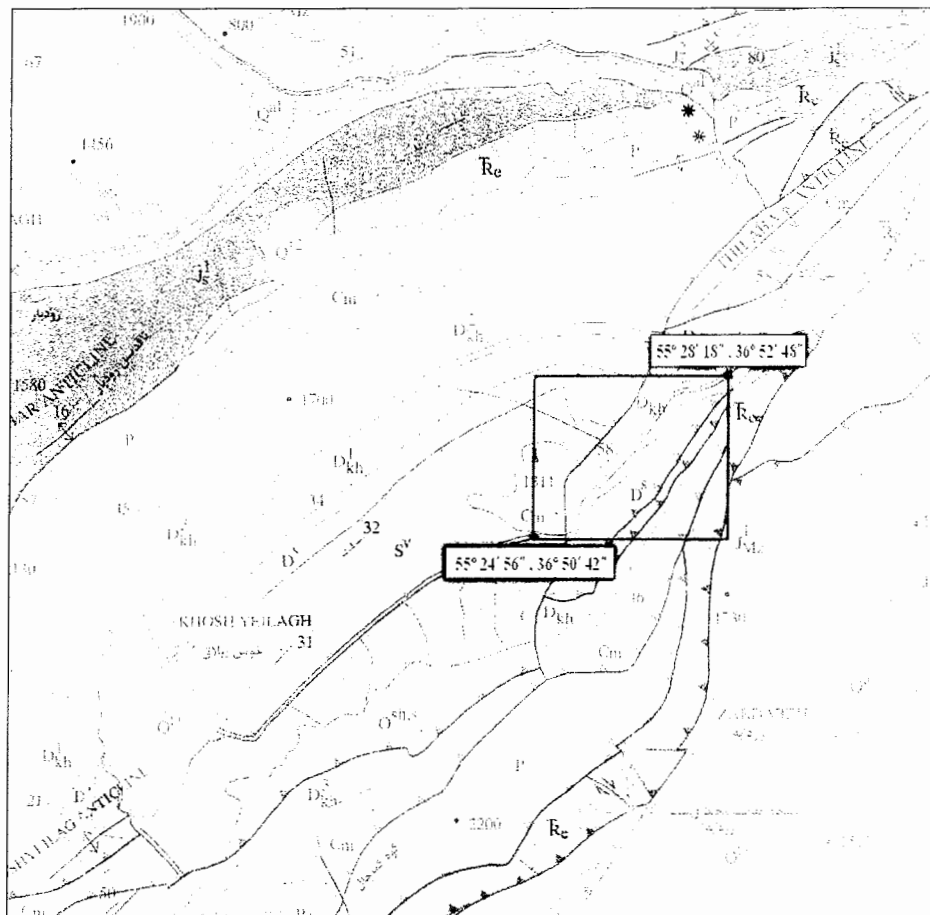
(سالنامه آماری سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۵).

موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن در شکل ۳-۴ و نقشه زمین‌شناسی محدوده

منطقه نمونه‌برداری در شکل ۴-۴ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۳-۴- موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن (مؤسسه جغرافیایی ایران، ۱۳۸۰)



شکل ۴-۴- بخشی از نقشه زمین‌شناسی خوش‌بیلاق با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، ناحیه محدوده مورد مطالعه به صورت کادر مستطیلی مشخص شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰)

۴-۳-۲- ریخت‌شناسی و ارتفاعات موجود در منطقه

از نظر ریخت‌شناسی، منطقه از ارتفاعات و کوه‌های سر به فلک کشیده‌ای تشکیل شده که چهره یک منطقه واقعاً کوهستانی را به آن داده است. هر چند روند ارتفاعات و عناصر ساختمانی در

البرز در مجموع تقریباً شرقی- غربی است، ولی در اینجا به طور محلی روند ارتفاعات و ساختمان‌های زمین‌شناسی شمال‌شرقی- جنوب‌غربی است. بلندترین ارتفاعات منطقه مربوط به سنگ آهک‌های سازند لار است. در درجهٔ دوم، سنگ آهک‌های با سن کرتاسهٔ بالایی، دولومیت‌ها و ماسه‌سنگ‌های با سن پرمین قرار دارند. ارتفاعات درجه سوم توسط ماسه‌سنگ‌های سازند خوش‌بیلاق، آهک‌های نازک‌لایهٔ سازند الیکا و اسپیت بازالت‌های سلطان‌میدان و سازند شمشک تشکیل شده‌اند. نهشته‌های مارنی و ماسه‌سنگی میوسن در جنوب غربی ناحیه، ارتفاعات کوتاه تا متوسط را می‌سازند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).

۳-۳-۴- سازندهای تشکیل دهندهٔ منطقهٔ برداشت نمونه

۱-۳-۳-۴- سازند خوش بیلاق (D_{kh})

سازند خوش‌بیلاق در ناحیه از گسترش و ضخامت بالایی برخوردار است و ارتفاعات متوسطی را تشکیل می‌دهد. این سازند در مجموع از طبقات نازک تا متوسط لایهٔ آهکی با میان‌لایه‌های مارنی و آهک، دولومیت ضخیم‌لایه، انواعی از ماسه‌سنگ، شیل به رنگ‌های سبز و قرمز، شیل توفی، توف و افق‌ها یا عدسی‌هایی از سنگ‌های ولکانیکی (با ترکیب آندزیت- بازالت) تشکیل شده است. به لحاظ وضعیت چین‌خوردگی و بهم‌ریختگی، تعیین ضخامت این سازند مشکل به نظر می‌رسد. شاید بتوان ضخامت آن را تا ۱۵۰۰ متر برآورد نمود (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).

سازند خوش‌بیلاق در گردنهٔ خوش‌بیلاق دارای نظم و ترتیب خوبی است، آن‌چنان که می‌توان آن را به سه واحد سنگی تقسیم نمود که از پایین به بالا عبارتند از:

- **بخش زیرین (D^1_{kh}):** این بخش از پایین به بالا شامل ماسه‌سنگ کوارتزی سفید، دولومیت و لایه‌های آهکی است که با توجه به محتوای فسیلی به کووینین تا فرسین تعلق دارند. ضخامت این بخش به ۶۳۴ متر می‌رسد.
- **بخش میانی (D^2_{kh}):** از ماسه‌سنگ کوارتزی قرمز رنگ به ضخامت ۱۴۵ متر تشکیل شده است.
- **بخش فوقانی (D^3_{kh}):** این بخش ۵۷۵ متر ارتفاع داشته و شامل سنگ آهک‌های بایوکلستیک و آهک مارنی است. فسیل‌های فراوان براکیوپود موجود در این واحد سن فمینین را نشان می‌دهد.

۴-۳-۴- گسل‌های موجود در منطقه

روند گسل‌های منطقه مورد بررسی عموماً NE-SW می‌باشد. این ناحیه در بخش چین-راندگی البرز واقع شده است، لذا گسل‌ها عمدتاً از نوع راندگی بوده و شیب سطوح گسلی اغلب به سمت N-NW است. گسل‌های امتدادلغز نیز در مقیاس کوچک وجود دارند که معمولاً گسل‌های تراستی را قطع کرده‌اند. گسل اصلی عمل کرده بر روی منطقه دقیق نمونه‌برداری، گسل کلاته‌بن می‌باشد. روند این گسل تقریباً E-W است و از نوع گسل‌های راندگی می‌باشد. همچنین شیب سطح گسلی به سمت شمال است. در اثر عملکرد این گسل، سازند الیکا روی رسوبات مارنی میوسن و کنگلومرای پلیوسن قرار گرفته است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).

۴-۳-۵- زمین شناسی ساختمانی و تکتونیک منطقه

رشته کوه البرز در نگاه کلی به شکل کمائی است که روندی تقریباً شرقی- غربی داشته و حاشیه جنوبی حوضه فرو افتاده دریاچه خزر را تشکیل داده است. روند این رشته کوه در غرب، شمال غربی- جنوب شرقی است، به طوری که می توان آن را تقریباً موازی بخش شمالی راندگی اصلی زاگرس در نظر گرفت و در البرز شرقی این روند شمال شرقی- جنوب غربی می باشد. با توجه به راستای ساخت های مشاهده شده در منطقه (چین ها و گسل های معکوس و راندگی)، روند کوتاه شدگی اعمال شده NW-SE است (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).

فصل پنجم

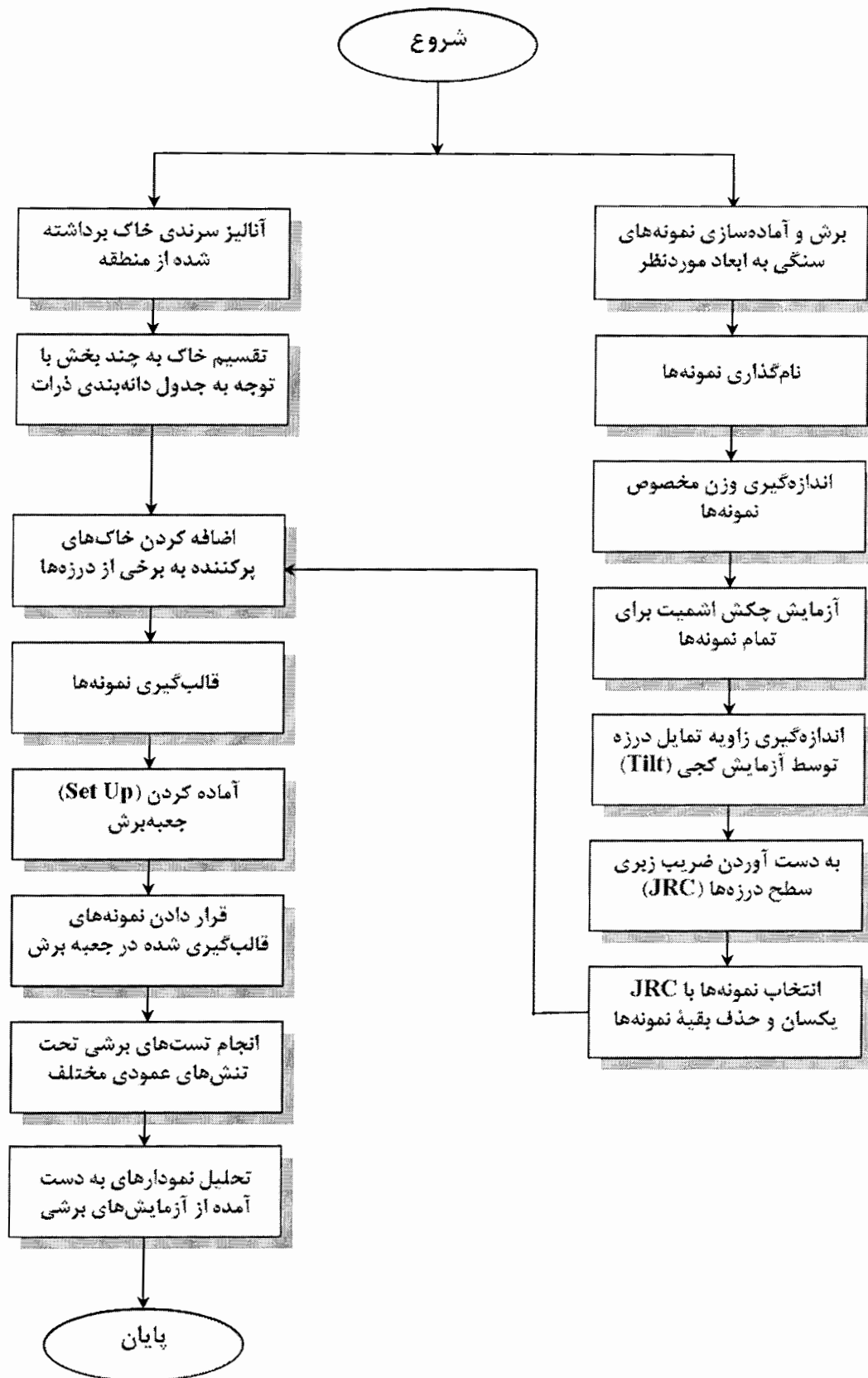
مطالعات آزمایشگاهی

۵-۱- مقدمه

به منظور مطالعه تأثیر پرکننده‌ها بر مقاومت برشی درزه‌ها می‌بایست پس از انجام نمونه‌برداری از منطقه موردنظر، آزمایش‌های دقیقی بر روی نمونه‌های آماده شده انجام گیرد. در این فصل به مراحل انجام کارهای آزمایشگاهی پرداخته می‌شود، به طوری که ابتدا آماده‌سازی نمونه‌ها، نحوه اندازه‌گیری زبری سطح درزه‌ها و آنالیز مواد پرکننده استفاده شده تشریح شده و سپس در مورد انجام آزمایش‌های مقاومت برشی بر روی نمونه‌های آماده شده بحث می‌گردد. در انتها نتایج حاصله تحلیل شده و به بررسی تأثیر پرکننده در آزمایش‌های مختلف پرداخته می‌شود.

۵-۲- مراحل انجام کارهای آزمایشگاهی

به طور کلی پس از انجام نمونه‌برداری، مراحل مختلفی طی می‌شود تا نتایج نهایی آزمایش‌ها به دست آید. در این بخش مراحل و عناوین کارهای انجام شده به ترتیب طی یک فلوجارت جامع در شکل ۵-۱ آورده شده است.



شکل ۵-۱- فلوچارت مربوط به مراحل مطالعات آزمایشگاهی

۵-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌برداری از منطقه‌ای به طول ۲۰ کیلومتر در امتداد جاده شاهرود- آزادشهر انجام شد. نمونه‌ها به صورت تصادفی از رخساره شیب‌های سنگی و با توجه به ابعاد درزه‌ها انتخاب شدند. جنس سنگ‌ها ماسه‌سنگی و آهکی بوده و در ابعاد مختلف به آزمایشگاه مکانیک سنگ منتقل شدند. بخشی از نمونه‌های اولیه آورده شده از منطقه در شکل ۵-۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲- بخشی از نمونه‌های اولیه آورده شده از منطقه مورد مطالعه

نمونه‌های آورده شده از منطقه ابتدا بایستی به اندازه‌های مورد نظر بریده شوند. برای این منظور ابتدا صفحه برش انتخاب می‌شود. ابعاد نمونه و موقعیت صفحه برش طوری انتخاب می‌شود که تا حد امکان نیاز به آماده‌سازی بیشتر در آزمایشگاه نبوده و برای قالب‌گیری مناسب باشد. صفحه برش باید

ترجیحاً مربعی با مساحت حداقل ۲۵۰۰ میلی‌متر مربع باشد (در استاندارد ASTM^۱ این مقدار ۱۹۰۰ میلی‌متر مربع عنوان شده است) (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰).

از آنجا که نمونه‌ها به منظور قرارگیری در جعبهٔ برش آماده می‌شوند، ابعاد آن‌ها بایستی حداکثر تا ۷×۷ سانتی‌متر مربع بریده می‌شد. بنابراین نمونه‌ها در محدودهٔ ابعاد ۶×۶ تا ۷×۷ سانتی‌متر مربع آماده شده، نام‌گذاری شده و به چندین مجموعه تقسیم‌بندی شدند. بخشی از نمونه‌های آماده شده در شکل ۳-۵ دیده می‌شود.



شکل ۳-۵- بخشی از نمونه‌های آماده شده

^۱ American Society of Testing and Materials

۴-۵- اندازه‌گیری زبری سطح درزه‌ها

روش‌های متعددی برای تعیین ضریب زبری سطح درزه وجود دارد که در بخش پیوست الف به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره شده است. در این تحقیق برای این کار از روش سطح شیب‌دار و آزمایش کجی^۱ استفاده شده است. در این روش، دو سطح با ناهمواری مورد نظر را روی هم قرار می‌دهند و آن‌ها را کج می‌کنند تا سطح رویی بلغزد. با توجه به زاویه تمایل α (زاویه سطح شیب‌دار در لحظه لغزش) و زاویه اصطکاک باقیمانده ϕ_r ، ضریب JRC از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Barton & Choubey, 1977):

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\text{Log} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)} \quad (۱-۵)$$

در این رابطه، JCS مقاومت فشاری دیواره درزه و σ_n تنش قائم وارد بر درزه در لحظه لغزش می‌باشد. زاویه اصطکاک باقیمانده ϕ_r نیز از رابطه ۲-۵ قابل محاسبه است (Barton & Choubey, 1977):

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R) \quad (۲-۵)$$

r/R نسبت عدد واجهش اشمیت است که r برای دیواره درزه اشباع شده و R برای سنگ هوانزده خشک می‌باشد.

زاویه اصطکاک پایه ϕ_b بکار رفته در رابطه ۲-۵ از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Franklin & Dusseault, 1989):

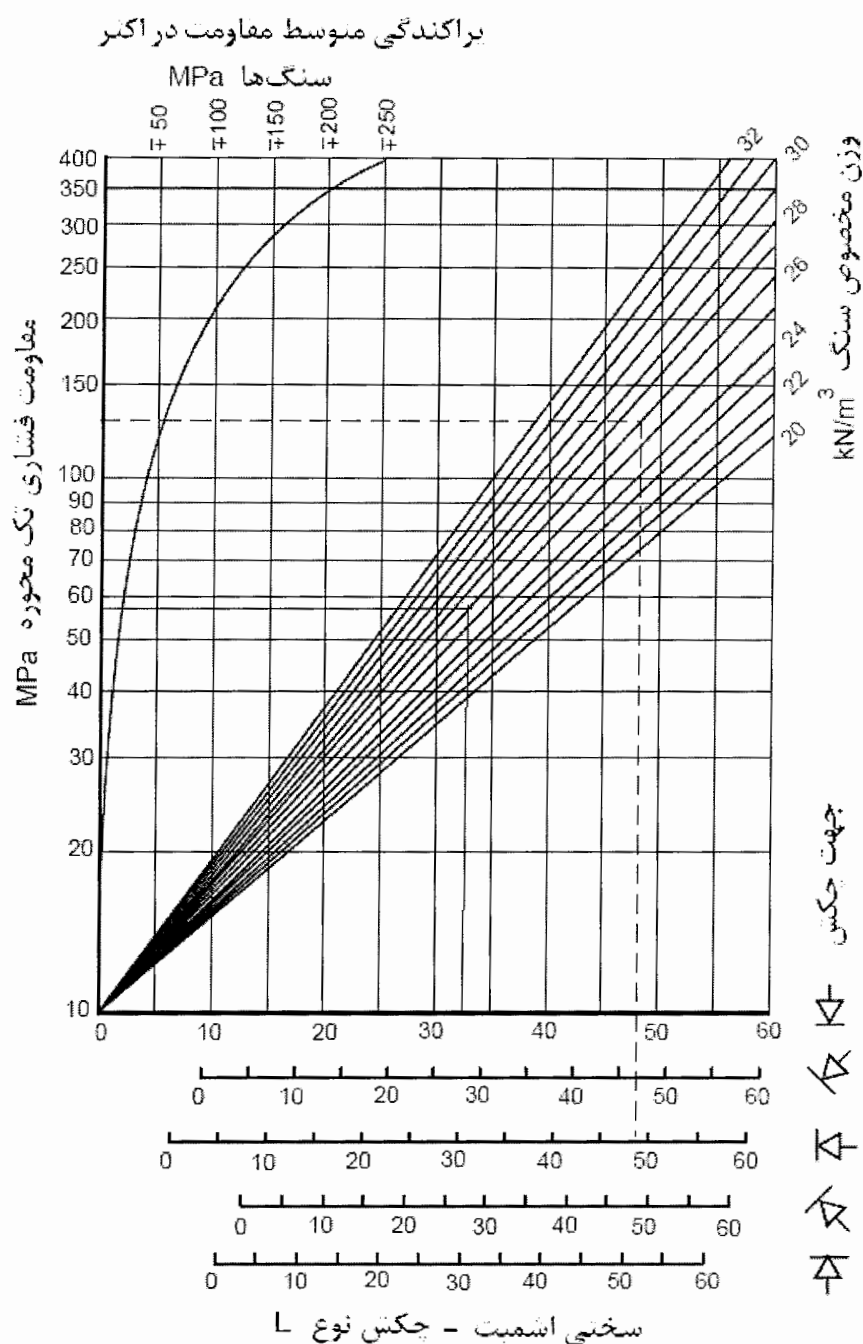
^۱ Tilt Test

$$\phi_b = \tan^{-1}(0.155 \tan \alpha) \quad (3-5)$$

استفاده از آزمایش کجی برای به دست آوردن ضریب زبری سطح درزه با توجه به مقایسه نتایج آماری به شرط انجام آزمایش در بیش از یک جهت لغزش و وارد کردن صحیح پارامترها در روابط از جمله روش‌های دقیق اندازه‌گیری *JRC* می‌باشد (Zare Naghadehi et al, 2007).

برای تعیین مقادیر *JCS* در مقیاس کوچک از چکش اشمیت استفاده گردید. بایستی توجه داشت که آزمایش چکش اشمیت معیاری از مقاومت مکانیکی لایه نازک مواد هوازده مجاور سطح گسستگی را به دست می‌دهد. نظر به اینکه این مواد هوازده به همراه ناهمواری سطح ناپیوستگی، مقاومت برشی آن را کنترل می‌کنند، لذا شاخص مهمی به حساب می‌آیند (Barton & Bandis, 1990). برای به دست آوردن *r* در رابطه ۵-۲ نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش چکش اشمیت به مدت ۲۴ ساعت در داخل آب قرار داده شدند تا به حالت اشباع کامل برسند.

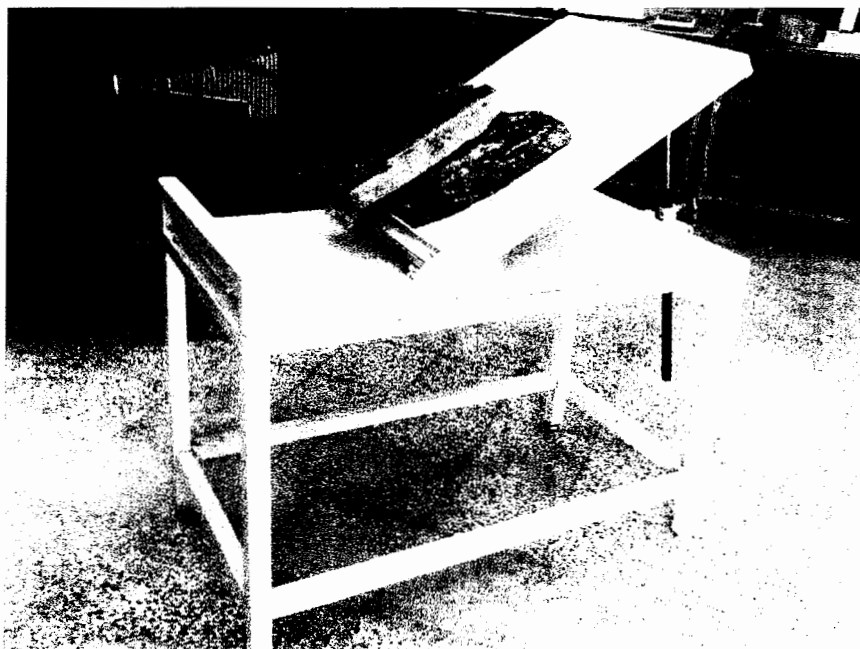
نحوه انجام آزمایش بدین صورت است که وقتی میله توپی بر روی سطح سنگ فشرده می‌شود، فنر به همراه وزنه جمع می‌گردد. حال چنانچه فنر آزاد شود، وزنه از طریق میله توپی بر سطح سنگ ضربه وارد می‌کند. وقتی که وزنه به همراه فنر بازگشت می‌کند، میله جهنده را به همراه خود در طول مقیاس روی بدنه حرکت می‌دهد. نقطه‌ای که میله جهنده بر روی مقیاس قرار گیرد، نشان دهنده عدد واجهش می‌باشد. با فشار دادن دکمه قفل کننده می‌توان موقعیت میله جهنده را ثابت نگه داشت تا قرائت به راحتی انجام پذیرد (Haramy & DeMarco, 1985). بعد از قرائت صورت گرفته، مقدار *JCS* با استفاده از نمودار نشان داده شده در شکل ۵-۴ تعیین می‌شود.



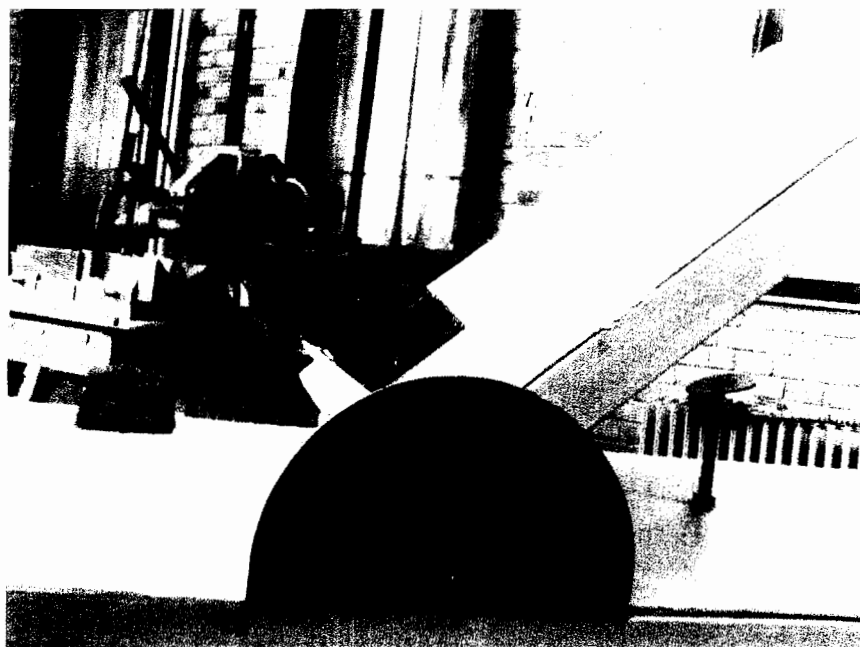
شکل ۵-۴- نمودار تعیین ضریب JCS از روی عدد واجهش چکش اشمیت (Deere & Miller, 1966)

سطح شیب‌دار استفاده شده که در دانشگاه صنعتی شاهرود طراحی و ساخته شده است و همچنین

نحوه اندازه‌گیری زاویه تمایل در لحظه لغزش در شکل‌های ۵-۵ و ۶-۵ نشان داده شده است.



شکل ۵-۵- سطح شیب‌دار استفاده شده در تعیین ضریب زبری سطح درزه‌ها



شکل ۵-۶- اندازه‌گیری زاویه تمایل سطح شیب‌دار در لحظه لغزش

اطلاعات مربوط به نمونه‌ها و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های چکش اشمیت و سطح شیب‌دار برای تعیین ضریب زبری سطح درزه‌ها در جداول ۱-۵، ۲-۵ و ۳-۵ آورده شده است. شایان ذکر است پس از تعیین ضریب زبری برای تمام نمونه‌ها، تنها نمونه‌هایی که دارای ضریب زبری یکسانی بودند برای

آزمایش‌های تعیین مقاومت انتخاب شدند و بقیه نمونه‌ها از مجموعه‌ها حذف گردیدند. در اینجا نیز

تنها مشخصات مربوط به نمونه‌های باقیمانده که شامل ۳۴ نمونه می‌باشد آورده شده است.

جدول ۵-۱- اطلاعات اولیه مربوط به نمونه‌ها

نام نمونه	سطح مقطع (m ²)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	وزن بلوک رویی (gr)
R1	۰/۰۰۴۷۱	۲/۶۶	۴۰۷/۸
R2	۰/۰۰۳۷۹	۲/۶۶	۵۴۹/۴
R3	۰/۰۰۳۸۱	۲/۶۶	۴۶۶/۴
R4	۰/۰۰۴۶۵	۲/۶۶	۳۸۰/۸
R5	۰/۰۰۳۸۲	۲/۶۶	۴۳۲/۵
R6	۰/۰۰۴۳۰	۲/۶۶	۴۳۷/۵
R7	۰/۰۰۴۲۰	۲/۶۶	۴۰۳/۹
R8	۰/۰۰۴۸۰	۲/۶۶	۴۶۹/۷
R9	۰/۰۰۴۰۶	۲/۶۶	۵۲۷/۸
R10	۰/۰۰۴۳۹	۲/۶۶	۴۸۲/۳
R12	۰/۰۰۳۹۲	۲/۶۶	۵۳۱
R14	۰/۰۰۴۱۱	۲/۶۶	۵۵۵/۴
R15	۰/۰۰۳۹۸	۲/۶۶	۴۲۷/۹
R16	۰/۰۰۴۵۲	۲/۶۶	۴۶۱/۵
R17	۰/۰۰۴۸۶	۲/۶۶	۴۸۶/۲
R18	۰/۰۰۴۴۱	۲/۶۶	۴۳۲/۶
R19	۰/۰۰۳۶۳	۲/۶۶	۵۴۸/۴
R20	۰/۰۰۳۸۱	۲/۶۶	۴۱۹/۳
R21	۰/۰۰۴۶۳	۲/۶۶	۵۰۶/۱
R22	۰/۰۰۴۸۷	۲/۶۶	۵۴۷/۴
R23	۰/۰۰۳۶۹	۲/۶۶	۵۲۶/۳
R26	۰/۰۰۳۹۶	۲/۶۶	۵۱۱/۹
R27	۰/۰۰۴۶۵	۲/۶۲	۴۷۴/۲
R28	۰/۰۰۳۹۵	۲/۶۲	۴۶۷/۹
R29	۰/۰۰۳۸۶	۲/۶۲	۴۸۳/۲
R30	۰/۰۰۴۷۷	۲/۶۲	۵۳۷/۲
R31	۰/۰۰۴۳۳	۲/۶۲	۴۶۹
R32	۰/۰۰۴۸۷	۲/۶۲	۴۴۴/۹
R33	۰/۰۰۴۷۵	۲/۶۲	۴۷۰/۱

ادامه جدول ۵-۱- اطلاعات اولیه مربوط به نمونه‌ها

نام نمونه	سطح مقطع (m^2)	وزن مخصوص (gr/cm^3)	وزن بلوک رویی (gr)
R34	۰/۰۰۳۶۵	۲/۶۲	۴۱۱/۳
R35	۰/۰۰۴۲۱	۲/۶۲	۵۳۴/۲
R36	۰/۰۰۴۳۷	۲/۶۲	۴۱۰/۲
R37	۰/۰۰۳۹۱	۲/۶۲	۴۷۱/۳
R38	۰/۰۰۴۷۹	۲/۶۲	۴۷۷/۱

جدول ۵-۲- نتایج مربوط به آزمایش چکش اشمیت

JCS	عدد واجهش اشمیت		نام نمونه
	اشباع	خشک	
۵۰	۲۰	۲۸	R1
۴۲	۱۷	۲۵/۵	R2
۴۲/۵	۱۸/۵	۲۶	R3
۴۱/۵	۱۹/۵	۲۵	R4
۴۰/۵	۱۹	۲۵/۵	R5
۵۴	۲۱/۵	۲۹	R6
۵۲/۵	۱۴/۵	۲۸	R7
۵۷	۲۵	۳۲	R8
۵۸	۱۹	۳۳	R9
۴۱/۵	۱۶/۵	۲۵	R10
۴۳	۱۸/۵	۲۶/۵	R12
۵۴	۱۶/۵	۲۹	R14
۵۵	۲۰	۲۹/۵	R15
۵۴	۱۸/۵	۲۹	R16
۳۹/۵	۱۴/۵	۲۴	R17
۴۱/۵	۱۵/۵	۲۵	R18
۵۳	۱۹	۲۸/۵	R19
۵۲/۵	۱۹/۵	۲۸	R20
۳۹/۵	۱۳/۵	۲۴	R21
۵۵/۵	۲۸/۵	۳۱	R22
۵۵	۲۷	۳۰/۵	R23
۵۲/۵	۱۹	۲۸	R26
۴۳	۱۵	۲۷	R27
۴۰	۱۵/۵	۲۴/۵	R28

ادامه جدول ۵-۲- نتایج مربوط به آزمایش چکش اشمیت

JCS	عدد واجهش اشمیت		نام نمونه
	اشباع	خشک	
۳۳/۵	۱۴/۵	۲۲	R29
۴۲/۵	۱۶	۲۶/۵	R30
۵۲	۱۹/۵	۲۸	R31
۴۳/۵	۱۵/۵	۲۷/۵	R32
۵۳/۵	۱۷/۵	۲۹	R33
۵۴	۲۲	۳۰	R34
۵۵/۵	۲۵	۳۱/۵	R35
۳۹	۱۳/۵	۲۴	R36
۳۳/۵	۱۸/۵	۲۲	R37
۴۱/۵	۱۷/۵	۲۵/۵	R38

جدول ۵-۳- نتایج مربوط به آزمایش سطح شیب‌دار و تعیین ضریب زبری سطح درزه

JRC	زاویه اصطکاک درزه		زاویه تمایل سطح شیب‌دار (α)			نام نمونه
	پایه (ϕ_b)	ماندگار (ϕ_r)	میانگین	جهت B	جهت A	
۷/۳۳۶	۲۱/۴۷۹۲	۱۵/۷۶۴۹	۶۸/۵	۶۹/۵	۶۷/۵	R1
۷/۵۳۰	۲۷/۲۴۸۹	۲۰/۵۸۲۲	۷۳/۲۵	۷۴	۷۲/۵	R2
۷/۴۸۹	۲۴/۱۱۳۹	۱۸/۳۴۴۷	۷۰/۹	۷۰/۳	۷۱/۵	R3
۷/۲۲۶	۲۰/۱۰۴۹	۱۵/۷۰۴۹	۶۷/۰۵	۶۷/۱۸	۶۶/۳	R4
۷/۳۴۹	۲۲/۶۲۵۵	۱۸/۱۳۵۷	۶۹/۶	۶۹/۵	۶۹/۷	R5
۷/۱۸۸	۲۴/۷۲۹۵	۱۹/۵۵۷۱	۷۱/۴	۷۳/۳	۶۹/۵	R6
۷/۲۸۲	۳۲/۳۵۱۵	۲۲/۷۰۸۶	۷۶/۲۵	۷۴/۵	۷۸	R7
۷/۰۵۹	۲۴/۲۳۵۰	۱۹/۸۶۰۰	۷۱	۷۳	۶۹	R8
۷/۰۶۲	۳۴/۰۸۸۸	۲۵/۶۰۳۹	۷۷/۱	۷۹/۵	۷۴/۷	R9
۷/۶۸۳	۲۱/۴۷۹۲	۱۴/۶۷۹۲	۶۸/۵	۷۲/۵	۶۴/۵	R10
۷/۶۷۷	۲۰/۱۰۴۹	۱۴/۰۶۷۲	۶۷/۰۵	۶۴/۳	۶۹/۸	R12
۷/۷۲۲	۲۶/۱۷۸۶	۱۷/۵۵۷۹	۷۲/۵	۷۷	۶۸	R14
۷/۵۰۸	۲۰/۲۸۵۹	۱۳/۸۴۵۳	۶۷/۲۵	۶۸	۶۶/۵	R15
۷/۴۸۵	۲۴/۵۴۲۲	۱۷/۳۰۰۸	۷۱/۲۵	۷۴	۶۸/۵	R16
۷/۴۹۹	۲۸/۲۳۶۲	۲۰/۳۱۹۶	۷۳/۹	۷۰/۱۸	۷۷	R17
۷/۵۷۹	۲۵/۷۰۲۷	۱۸/۱۰۲۷	۷۲/۱۵	۷۲/۱۸	۷۱/۵	R18
۷/۶۹۰	۲۱/۸۸۴۹	۱۵/۲۱۸۳	۶۸/۹	۶۹/۱۸	۶۸	R19
۷/۴۲۳	۲۳/۱۷۹۸	۱۷/۱۰۸۴	۷۰/۱	۷۱/۵	۶۸/۷	R20
۷/۰۷۹	۳۵/۲۹۶۵	۲۶/۵۴۵۶	۷۷/۶۵	۸۱/۳	۷۴	R21

ادامه جدول ۵-۳- نتایج مربوط به آزمایش سطح شیب‌دار و تعیین ضریب زبری سطح درزه

JRC	زاویه اصطکاک درزه		زاویه تمایل سطح شیب‌دار (α)			نام نمونه
	پایه (ϕ_b)	ماندگار (ϕ_r)	میانگین	جهت B	جهت A	
۶/۴۵۲	۲۹/۳۶۷۵	۲۷/۷۵۴۶	۷۴/۶	۶۸/۷	۸۰/۵	R22
۷/۰۴۸	۲۰/۰۶۰۱	۱۷/۷۶۴۹	۶۷	۷۲/۵	۶۱/۵	R23
۷/۶۱۵	۲۰/۰۶۰۰	۱۳/۶۳۱۴	۶۷	۶۴/۳	۶۹/۷	R26
۷/۰۵۳	۳۵/۰۷۱۱	۲۶/۱۸۲۲	۷۷/۵۵	۸۰/۳	۷۴/۸	R27
۷/۷۶۶	۲۳/۱۷۹۸	۱۵/۸۳۲۸	۷۰/۱	۶۷/۵	۷۲/۷	R28
۷/۸۰۷	۲۳/۰۶۷۲	۱۶/۲۴۸۹	۷۰	۷۳	۶۷	R29
۷/۸۳۹	۲۱/۷۳۱۳	۱۳/۸۰۶۸	۶۸/۷۵	۶۸/۵	۶۹	R30
۷/۴۸۰	۲۰/۷۵۰۲	۱۴/۶۷۸۸	۶۷/۷۵	۷۲	۶۳/۵	R31
۷/۱۹۹	۳۲/۵۴۸۳	۲۳/۸۲۱۰	۷۶/۳۵	۷۸/۷	۷۴	R32
۷/۶۹۰	۲۰/۴۲۳۵	۱۲/۴۹۲۵	۶۷/۴	۶۹/۸	۶۵	R33
۷/۲۷۲	۲۴/۳۵۷۱	۱۹/۰۲۳۸	۷۱/۱	۷۱/۷	۷۰/۵	R34
۷/۱۶۰	۲۳/۹۳۴۱	۱۹/۸۰۷۲	۷۰/۷۵	۷۲/۵	۶۹	R35
۷/۰۷۰	۳۴/۷۳۸۶	۲۵/۹۸۸۶	۷۷/۴	۸۰/۳	۷۴/۵	R36
۷/۲۶۲	۲۳/۰۶۷۲	۱۹/۸۸۵۴	۷۰	۷۰/۵	۶۹/۵	R37
۷/۵۸۰	۲۰/۱۹۵۱	۱۳/۹۲۰۶	۶۷/۱۵	۶۸/۳	۶۶	R38

۵-۵- مواد پرکننده

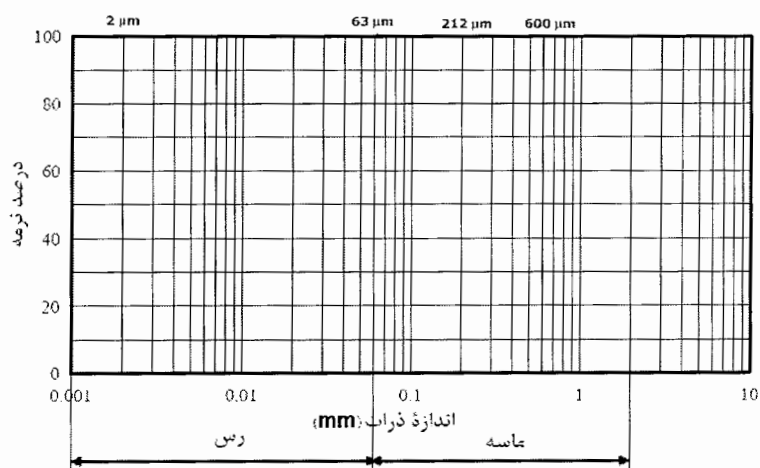
۵-۵-۱- نمونه‌برداری، آنالیز و آماده‌سازی خاک

برای بررسی‌های بعدی در مورد مقاومت درزه‌های پر شده لازم بود تا آنالیزها و مطالعاتی بر روی خود مواد پرکننده درزه‌ها انجام شود. همان طور که قبلاً ذکر شد، در این تحقیق از خاک خود منطقه که در اثر باران‌های موسمی و جریان‌های سطحی در بازشدگی‌های درزه‌ها پرشدگی ایجاد می‌کند به عنوان پرکننده درزه‌ها استفاده شده است. بنابراین ابتدا از خاک بالادست منطقه نمونه‌برداری به عمل آمد و به منظور تعیین خواص مقاومتی به آزمایشگاه مکانیک خاک منتقل گردید.

همچنین برای تقسیم‌بندی خاک از نظر دانه‌بندی، از تجزیه سرنندی استفاده شد. بدین ترتیب با استفاده از سرندهایی با مش‌های بخصوص، این خاک به سه بخش ماسه، رس و مخلوطی از این دو به

صورت طبیعی تقسیم‌بندی شد.

در شکل ۵-۷ نمودار دانه‌بندی استاندارد ذرات آورده شده است. همان طور که در این نمودار نمایان است، اندازه ذرات کوچک‌تر از 0.06 میلی‌متر به عنوان رس و ذرات با اندازه 0.06 تا 2 میلی‌متر به عنوان ماسه شناخته می‌شوند (Welideniya, 2005). به همین دلیل به منظور تجزیه خاک به این قسمت‌ها از سرندهای 10 مش و 120 مش استفاده شد.

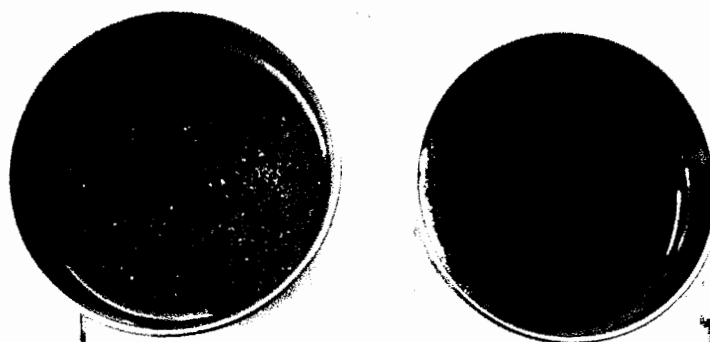


شکل ۵-۷- نمودار دانه‌بندی استاندارد ذرات خاک و سنگ (Welideniya, 2005)

در شکل ۵-۸ نمایی از بالادست منطقه دیده می‌شود که محل نمونه‌برداری از خاک می‌باشد. در شکل ۵-۹ نمونه‌ای از مواد پرکننده مورد استفاده در آزمایش‌ها که با تجزیه سرندهای خاک مذکور به دست آمده‌اند، نشان داده شده است.



شکل ۵-۸- نمای از بالادست منطقه به عنوان محل نمونه برداری از خاک



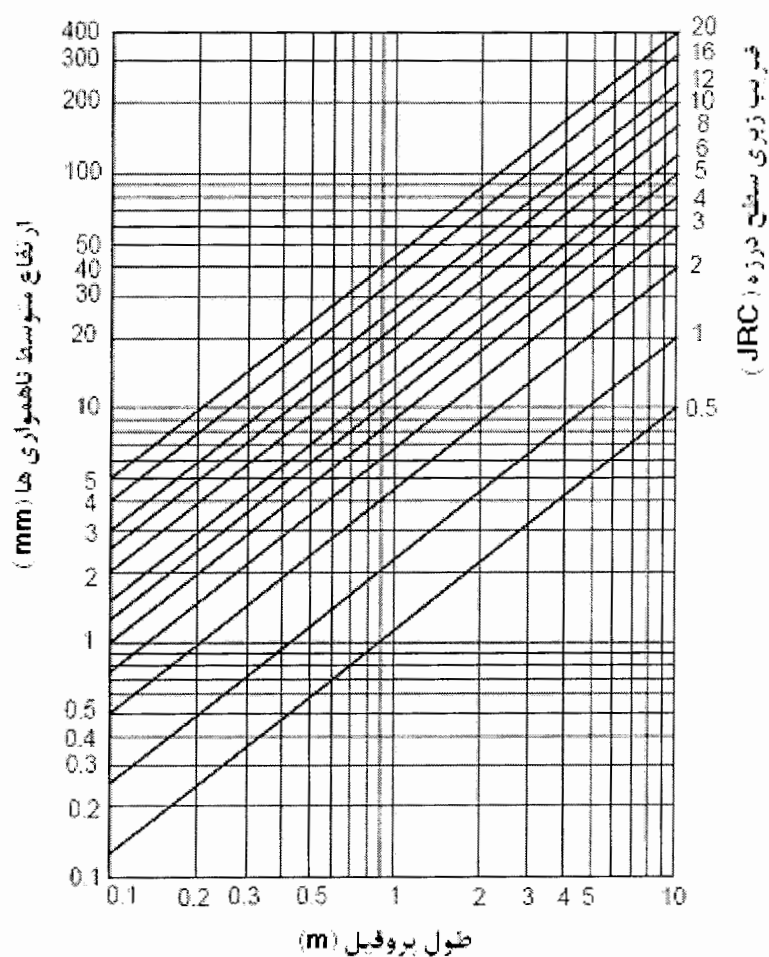
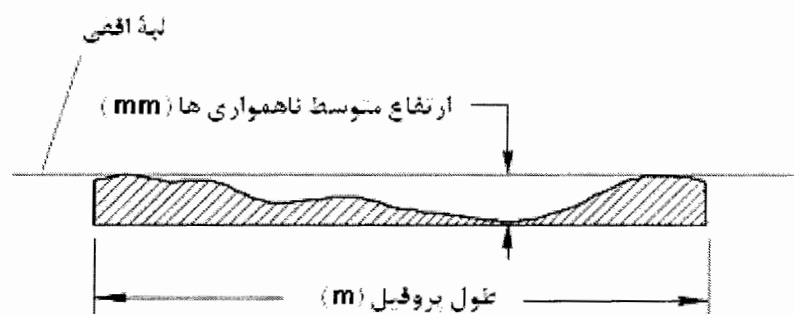
شکل ۵-۹- خاک تجزیه شده به دو بخش ماسه (سمت چپ) و رس (سمت راست)

۵-۵-۲- اضافه کردن پرکننده‌ها به سطوح درزه‌ها

پس از آنالیز و آماده‌سازی پرکننده‌ها و تقسیم آن‌ها به چند بخش، این پرکننده‌ها بایستی با ضخامت‌های مختلف به سطوح درزه‌های مورد نظر اضافه شوند. قبل از اضافه کردن، خاک‌ها بایستی با میزان آب مشخصی مخلوط شوند تا شرایط طبیعی شسته شدن توسط جریان‌های مختلف سطحی در

طبیعت ارضاء گردد. مشکلی که در اضافه کردن پرکننده بوجود می‌آید، عدم امکان اندازه‌گیری ضخامت دقیق آن روی سطح درزه به دلیل ناهموار بودن طبیعی سطح نمونه‌ها می‌باشد. برای حل این مشکل از اندازه‌گیری چگالی ماده پرکننده و اضافه کردن آن با وزن مورد نیاز استفاده شد. بدین منظور ابتدا حجم به وجود آمده در اثر افزودن ضخامت بخصوصی از پرکننده با یک چگالی خاص محاسبه شده و سپس وزن پرکننده لازم برای پرکردن این حجم به دست آمد. به عنوان مثال برای یک نمونه با سطح مقطع ۴۰۰۰ میلی‌متر مربع، به منظور اضافه کردن پرکننده‌ای با چگالی ۱/۲۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ضخامت ۱ میلی‌متر می‌بایست مقدار ۴/۹۳ گرم از ماده پرکننده به سطح مشترک درزه افزوده شود. بدین ترتیب و با این روش دقیق‌ترین میزان پرکننده اضافه شده به دست می‌آید.

در مرحله اعمال ماده پرکننده با ضخامت‌های مختلف به سطوح درزه‌ها نمی‌توان از تأثیر زبری سطح بر نتایج چشم‌پوشی کرد. بنابراین در مورد هر ضخامت از پرکننده، پارامتر مربوط به زبری سطح درزه که همان ارتفاع متوسط ناهمواری‌ها (a) می‌باشد نیز در آن تأثیر داده شده و نمونه‌ها با نسبت‌های t/a مختلف و نه ضخامت‌های مختلف تست شدند. در شکل ۵-۱۰ نمودار تبدیل JRC به a با توجه به ابعاد درزه آورده شده است.



شکل ۵-۱۰- نمودار تبدیل ضریب زبری سطح درزه (JRC) و ارتفاع متوسط ناهمواری ها (a) به یکدیگر (Barton & Bandis, 1982)

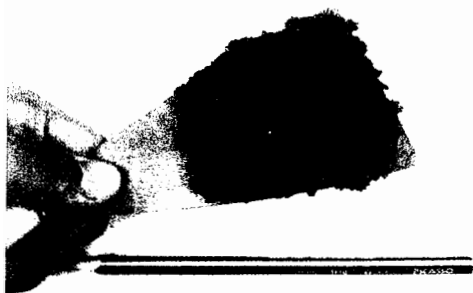
در شکل‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲ نحوه اضافه شدن مواد پرکننده به سطوح درزه‌ها و نمونه‌های پرشده آماده آزمایش نشان داده شده‌اند.



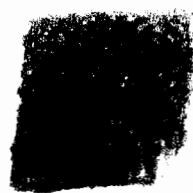
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۵-۱۱- اضافه کردن پرکننده‌ها به سطوح درزه‌ها

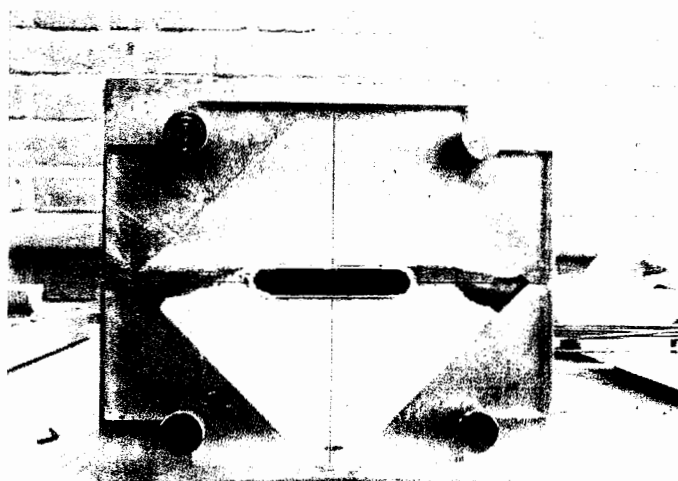
الف- مخلوط طبیعی، ب- ماسه، ج- رس



شکل ۵-۱۲- نمونه پر شده آماده برای قالب‌گیری و انجام آزمایش برشی

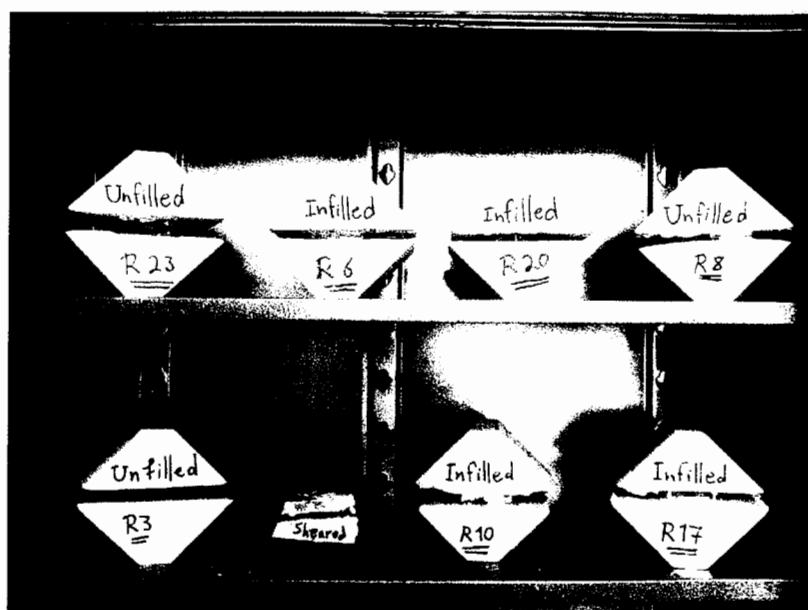
۵-۶- تعیین مقاومت برشی مستقیم نمونه‌ها

با انجام آزمایش برش مستقیم، مقاومت برشی حداکثر و ماندگار به صورت تابعی از تنش قائم اعمالی بر صفحه برش تعیین می‌گردند. در اینجا برای انجام آزمایش برش مستقیم از استاندارد ASTM D ۵۶۰۷ استفاده شده است (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰). برای انجام این آزمایش ابتدا بایستی نمونه در داخل قالب مربوطه قرار گرفته و با استفاده از گچ پلاستر یا سیمان و یا سایر مواد قالب‌گیری مقاوم، در داخل آن محکم می‌شود (شکل ۵-۱۳).



شکل ۵-۱۳- وسیله قالب‌گیری نمونه‌ها و نمونه قرار گرفته در گچ پلاستری

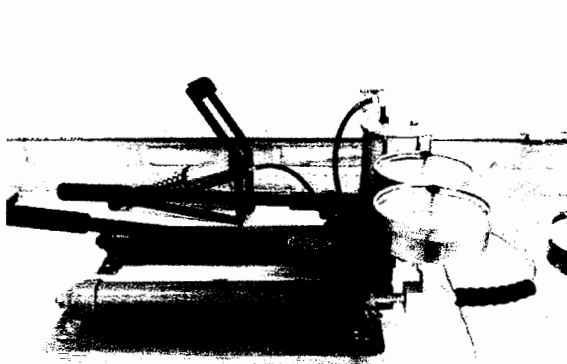
نمونه داخل قالب طوری قرار داده می‌شود که صفحه برش در موقعیت و جهت صحیحی حفظ شود. ماده قالب‌گیری ریخته شده و پس از گیرش، قسمت دیگر نمونه به طریقه مشابه قالب‌گیری می‌شود. از هر طرف صفحه برش حداقل ۵ میلی‌متر نباید قالب‌گیری شود (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰). به نمونه قالب‌گیری شده فرصت داده می‌شود تا کاملاً خشک شده و استحکام لازم را برای آزمایش به دست آورد. در شکل ۵-۱۴ چند نمونه قالب‌گیری شده آماده آزمایش برشی نشان داده شده‌اند.



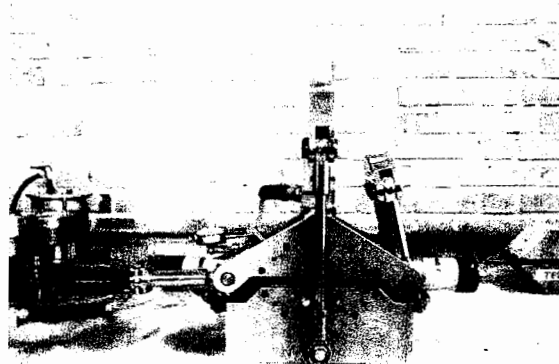
شکل ۵-۱۴- نمونه‌های قالب‌گیری شده آماده قرارگیری در جعبه برش

برای به دست آوردن رفتار برشی نمونه‌ها در این تحقیق از جعبه برش کوچک مقیاس ساخت شرکت ELE استفاده شده است. هدف از این مرحله، به دست آوردن مقاومت برشی حداکثر و ماندگار صفحه برش می‌باشد. در شکل ۵-۱۵-الف نمایی از جعبه برش مورد استفاده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، این دستگاه دارای دو نوع روش اعمال بار است. برای اعمال بارهای قائم و برشی، از سیستم هیدرولیکی (شکل ۵-۱۵-ب) و برای ثابت نگه داشتن بار قائم اعمالی، از

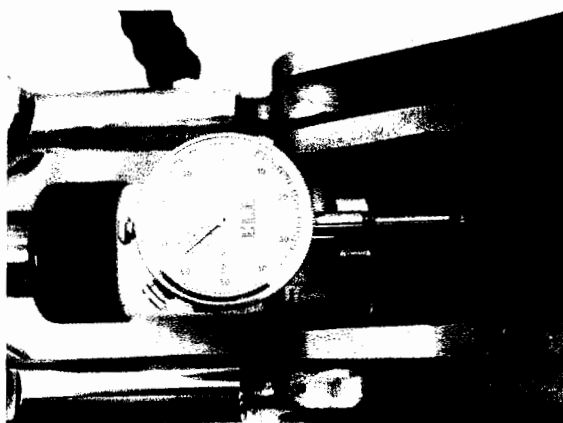
سیستم نیوماتیکی (شکل ۵-۱۵-ج) استفاده شده است. سیستم نیوماتیکی ذکر شده، باعث می‌شود تا بار قائم اعمالی در طول فرآیند برش ثابت باقی مانده و شرایط بارگذاری CNL ارضاء گردد. قبلا برای ثابت نگه داشتن بار عمودی و اطمینان از این امر در طول برش از اهرم بازویی^۱ همراه با وزنه استفاده می‌شد (Hencher & Richards, 1989). ولی همان طور که ذکر شد هم اکنون از سیستم CNL برای این کار استفاده می‌شود.



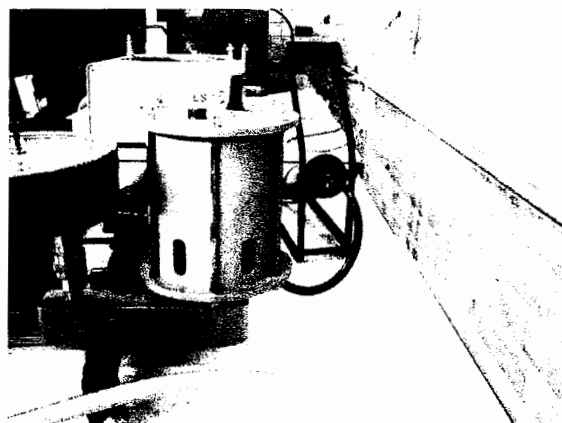
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵-۱۵- جعبه برش مورد استفاده به همراه تجهیزات مربوط به آن؛ (الف) جعبه برش، (ب) سیستم هیدرولیکی اعمال بارهای قائم و برشی، (ج) سیستم نیوماتیکی CNL، (د) گیج برای قرائت جابجایی برشی در حین آزمایش

¹ Lever Arm

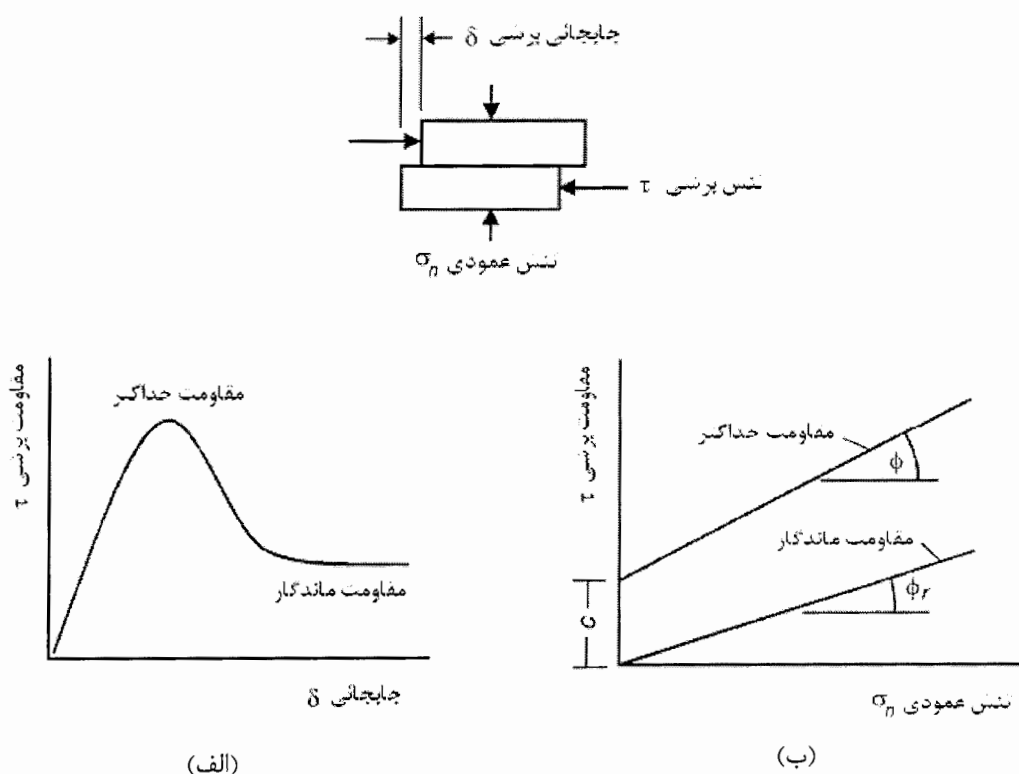
پس از قرار دادن نمونه در جعبه برش، برای قرائت جابجائی‌های برشی از گیج مکانیکی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر (شکل ۵-۱۵-د) استفاده شده است. در ابتدا این گیج نصب و کنترل شده و قرائت‌های اولیه بار و جابجائی یادداشت می‌گردد. بار قائم مورد نظر به طور پیوسته و یکنواخت به نمونه اعمال می‌شود. سیم‌های فلزی که دو نیمه نمونه را به یکدیگر متصل نموده‌اند، قطع می‌شوند. سپس نیروی برشی به تدریج افزایش داده می‌شود. این نیرو را می‌توان به صورت پله‌ای اعمال نمود، اما بهتر است آن را به صورت پیوسته و به طریقی که سرعت جابجائی برشی قابل کنترل باشد اعمال کرد (Hoek & Bray, 1981). میزان نیروی برشی تا شروع برش افزایش می‌یابد. متناسب با نیروی برشی اعمال شده اندکی جابجائی برشی (افقی) نیز حاصل می‌گردد تا به مقاومت برشی حداکثر برسیم. قرائت جابجائی در چند پله افزایشی مقاومت برشی تا رسیدن به مقاومت برشی حداکثر انجام می‌شود و پس از عبور از مقاومت حداکثر برای اندازه‌گیری مقاومت برشی باقیمانده (ماندگار) ادامه می‌یابد.

در آزمایش‌های انجام شده، با توجه به استاندارد ASTM، سرعت جابجائی در شروع آزمایش کمتر از ۰,۱ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰). این سرعت در بین مجموعه قرائت‌ها به حداکثر ۰/۶ تا ۰/۷ میلی‌متر در دقیقه نیز افزایش یافت، با توجه به اینکه مقاومت نهایی به طور دقیق ثبت گردید.

۵-۷- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل جواب‌ها

در این بخش نتایج به دست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌ها آورده شده و جواب‌ها به صورت نمودارها و معادلات مربوطه تحلیل می‌شوند. کلیه آزمایش‌های انجام شده بر روی

نمونه‌ها در چهار مرحله تنش عمودی ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ مگاپاسکال انجام شده‌اند. به طور کلی به منظور نمایش تأثیر هر فاکتوری بر مقاومت برشی درزه‌ها از نمودارهای تنش برشی-جابجائی برشی و تنش عمودی-تنش عمودی (پوش مقاومت برشی) در سطوح مختلفی از آن فاکتور استفاده می‌شود (Barton, 1976). این دو نوع نمودار، فقط انواع کلی بوده و از بسیاری دیگر از نمودارها می‌توان برای این منظور استفاده نمود. شکل ایده‌آل نمودارهای مذکور در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۶- شکل ایده‌آل نمودارهای مربوط به مقاومت برشی درزه‌ها

الف- نمودار تنش برشی-جابجائی برشی، ب- نمودار مقاومت برشی-تنش عمودی (پوش مقاومت برشی) (Barton, 1976)

همان طور که در شکل ۵-۱۶-ب دیده می‌شود، شیب خط پوش مقاومت حداکثر برابر با زاویه اصطکاک درزه (ϕ) و عرض از مبدا آن میزان چسبندگی درزه (c) می‌باشد. در مورد پوش مقاومت ماندگار، چسبندگی برابر با صفر بوده و شیب خط نیز مقاومت ماندگار درزه (ϕ_r) را به دست می‌دهد

(Barton, 1976).

رابطه بین مقاومت برشی حداکثر (τ_p) و تنش عمودی (σ_n) را می‌توان به صورت معادله مور-کولمب^۱ نمایش داد:

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi \quad (۴-۵)$$

همچنین رابطه بین مقاومت برشی ماندگار (τ_r)، زاویه اصطکاک ماندگار (ϕ_r) و تنش عمودی (σ_n) به صورت معادله ۵-۵ می‌باشد:

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \quad (۵-۵)$$

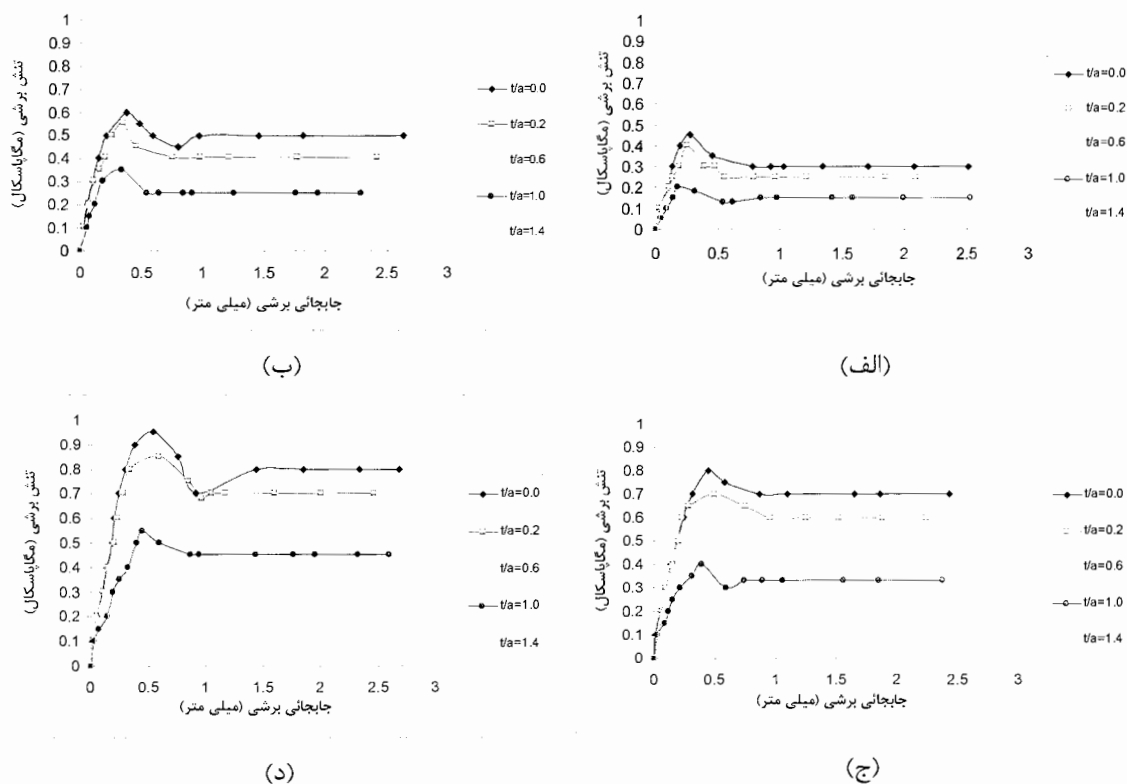
۵-۷-۱- نمودارهای تنش برشی - جابجائی برشی

درزه‌های سنگی آماده شده تحت بارهای قائم و ضخامت‌های نسبی از پرکننده‌های مختلف در جعبه برش مستقیم مورد آزمایش قرار گرفتند. در اینجا به تحلیل نمودارهای تنش برشی - جابجائی برشی پرداخته می‌شود.

در شکل ۵-۱۷ نمودارهای مربوطه برای پرکننده ماسه-رسی در چهار تنش عمودی مختلف آورده شده است. همان طور که در قسمت الف شکل دیده می‌شود، درزه در حالت خالی و تحت تنش عمودی ۰/۲۵ مگاپاسکال، مقاومت برشی حداکثر ۰/۴۵ مگاپاسکال و ماندگار ۰/۳ را داراست. با افزودن پرکننده به ضخامت نسبی ۰/۲ این مقادیر به ترتیب به ۰/۴ و ۰/۲۵ می‌رسند. به تدریج با افزایش ضخامت نسبی پرکننده، این مقاومت‌ها کاهش یافته و در نسبت t/a برابر با ۱/۴ به ترتیب به ۰/۱۵ و ۰/۱ مگاپاسکال می‌رسند. با افزایش ضخامت به بیش از این مقدار، مقاومت برشی تغییر بسیار کمی

^۱ Mohr-Culomb

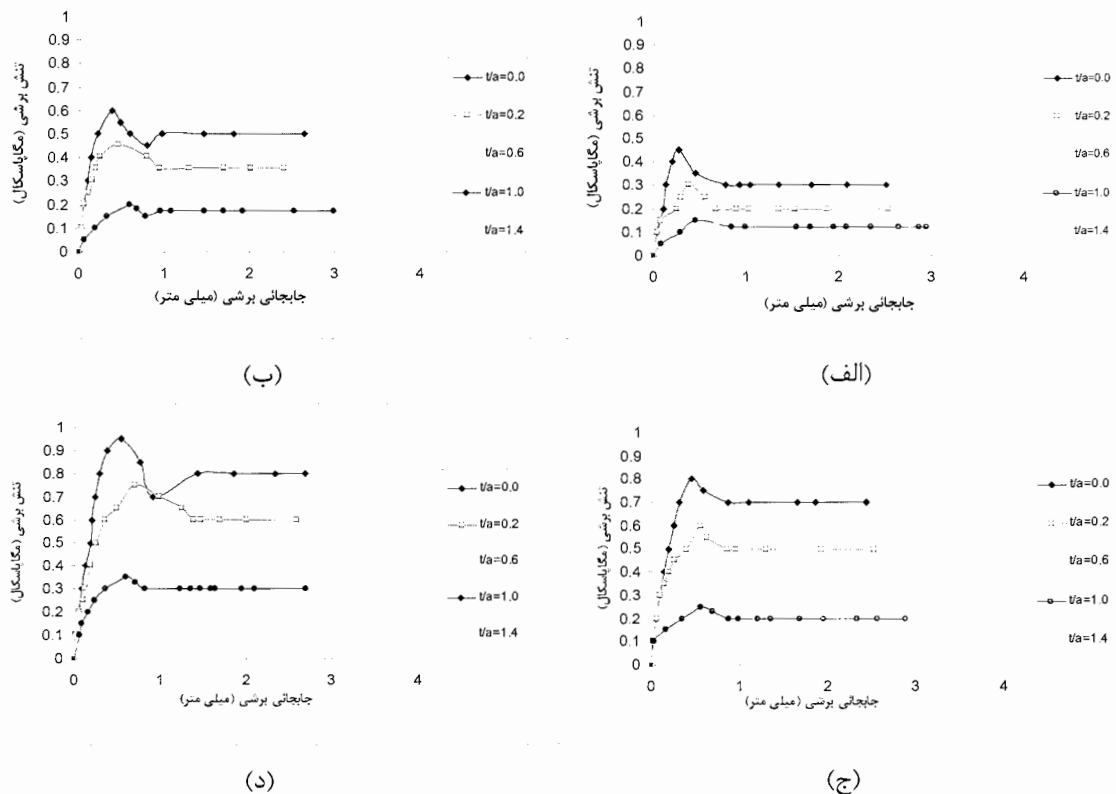
کرده و در مقدار بسیار کمتری از مقاومت درزه با ضخامت $1/4$ به مقاومت خود خاک پرکننده می‌رسد. در حقیقت تقریباً در ضخامت نسبی بیشتر از $1/6$ ، رفتار برشی درزه در کنترل ماده پرکننده تنها قرار می‌گیرد و زبری سطح درزه تأثیر خود را از دست می‌دهد. با افزایش تنش عمودی به 0.5 ، 0.75 و 1 مگاپاسکال، مجدداً چنین رفتاری برای درزه مشاهده می‌گردد. بنابراین ضخامت نسبی $1/6$ را می‌توان برای کلیه درزه‌های تست شده به عنوان ضخامت بحرانی پرکننده در نظر گرفت که در بیش از این مقدار، افزایش بیشتر پرکننده تأثیری در مقاومت برشی درزه نخواهد داشت.



شکل ۵-۱۷- نمودارهای تنش برشی-جابجائی برشی مربوط به پرکننده ماسه-رسی

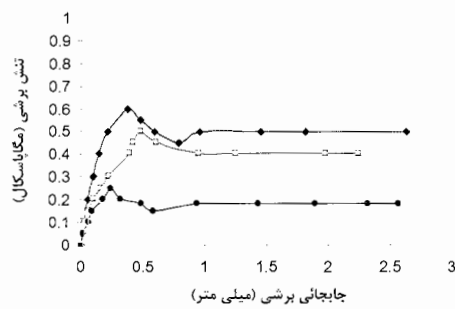
الف- تنش عمودی 0.25 مگاپاسکال، ب- تنش عمودی 0.5 مگاپاسکال، ج- تنش عمودی 0.75 مگاپاسکال، د- تنش عمودی 1 مگاپاسکال

درزه در حالت خشک (خالی از پرکننده) و تنش عمودی ۱ مگاپاسکال تا تنش برشی ۰/۹۵ مگاپاسکال مقاومت می‌کند. میزان جابجایی تا مقاومت برشی حداکثر ۰/۵۳ میلی‌متر است. رفتار بعد از نقطه حداکثر نشانگر چگونگی برش خوردن زبری‌های سنگ و تبدیل شدن سطوح درزه به سطوح صاف می‌باشد که در این منحنی‌ها نشانگر برش خوردن نرم زبری‌ها است. در نهایت، درزه پس از طی ۱/۸۴ میلی‌متر جابجایی به مقاومت برشی ماندگار ۰/۸ می‌رسد. همچنین همان طور که در تمامی نمودارها دیده می‌شود، در ضخامت‌های پرکننده زیاد، افت تنش برشی پس از نقطه حداکثر ناچیز می‌باشد. در شکل‌های ۱۸-۵ و ۱۹-۵ نمودارهای مشابه به ترتیب برای پرکننده‌های ماسه‌ای و رسی آورده شده است.

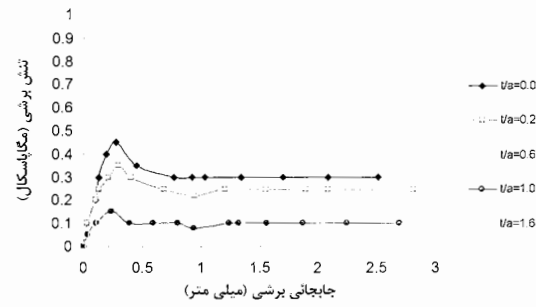


شکل ۱۸-۵- نمودارهای تنش برشی- جابجایی برشی مربوط به پرکننده ماسه‌ای

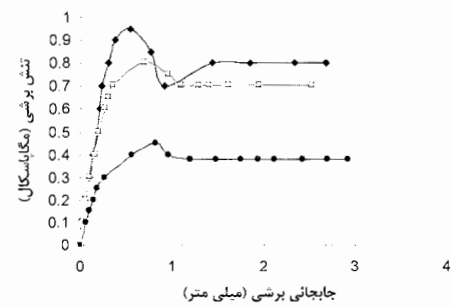
الف- تنش عمودی ۰/۲۵ مگاپاسکال، ب- تنش عمودی ۰/۵ مگاپاسکال، ج- تنش عمودی ۰/۷۵ مگاپاسکال، د- تنش عمودی ۱ مگاپاسکال



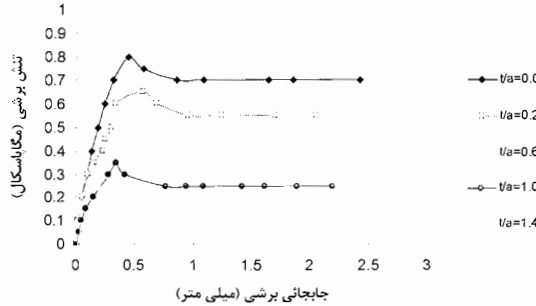
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵-۱۹- نمودارهای تنش برشی - جابجایی برشی مربوط به پرکننده رسی

الف- تنش عمودی ۰/۲۵ مگاپاسکال، ب- تنش عمودی ۰/۵ مگاپاسکال، ج- تنش عمودی ۰/۷۵ مگاپاسکال، د- تنش عمودی ۱ مگاپاسکال

در مورد پرکننده‌های ماسه‌ای و رسی نیز رفتاری مشابه حالت اول دیده می‌شود، با این تفاوت که درزه‌های پر شده با ماسه در کل مقاومت کمتری نسبت به درزه‌های پر شده با رس نشان می‌دهند. این امر به دلیل چسبندگی بالاتر رس نسبت به ماسه می‌باشد. از طرفی در آزمایش‌های انجام شده بر روی مقاومت برشی خاک‌های پرکننده نیز چنین رفتاری مشاهده شد، به طوری که مقاومت برشی حداکثر و ماندگار رس در مقایسه با ماسه بالاتر بود.

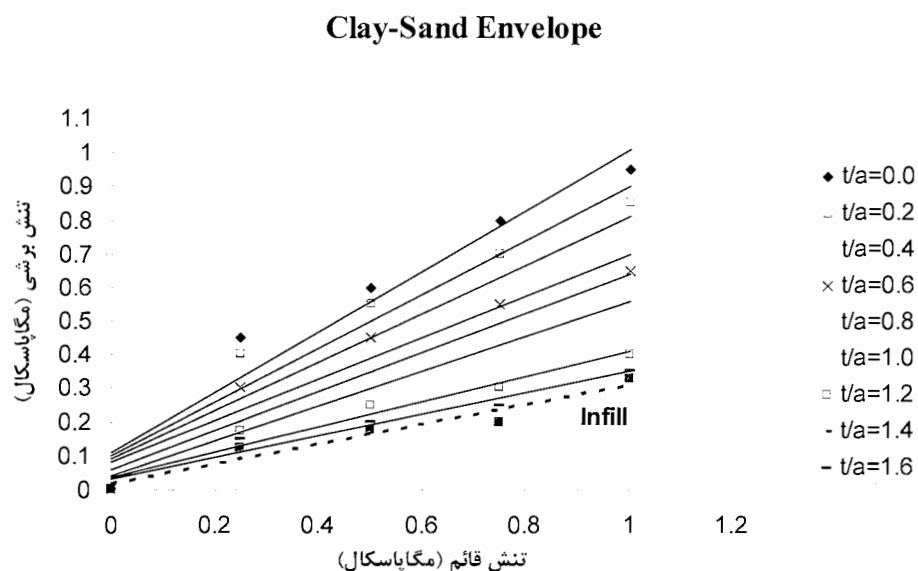
رفتاری که در تمام نمودارها قابل مشاهده است این است که افزودن لایه‌ای از پرکننده با ضخامت بسیار کم، مقاومت درزه را تا حد بسیاری کاهش می‌دهد. اگر ضخامت پرکننده زیادتر شود، تنش برشی حداکثر به آرامی کاهش یافته و بعد از این که ضخامت پرکننده به یک نسبت ویژه از t/a رسید،

کاهش مقاومت ناچیز خواهد شد. این امر در تنش‌های عمودی پایین‌تر بیشتر نمایان است.

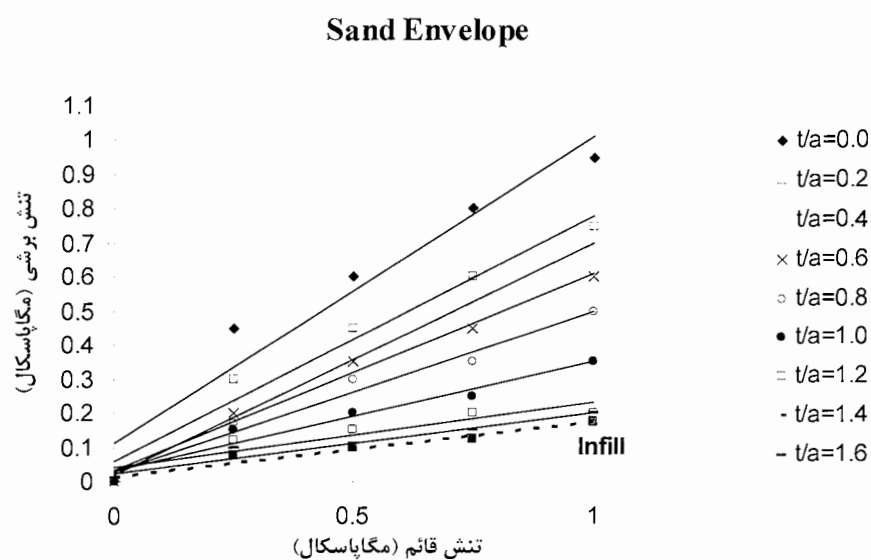
۵-۷-۲- نمودارهای تنش برشی - تنش عمودی

با استفاده از نتایج آزمایش‌های نشان داده شده در شکل‌های ۵-۱۷، ۵-۱۸ و ۵-۱۹ می‌توان منحنی‌های تنش برشی - تنش قائم را رسم کرد. این منحنی‌ها به خوبی رفتار سنگ را نشان داده و کاربرد فراوانی در طراحی‌ها دارند. مقدار شیب خط مماس به منحنی تنش برشی - تنش قائم نشانگر میزان زاویه اصطکاک سطح درزه است. همچنین مقدار عرض از مبدا خط مماس به این منحنی مقدار مقاومت چسبندگی زبری‌های سطح درزه را در مقابل برش نشان می‌دهد. مقدار چسبندگی به دست آمده ناشی از برش خوردن دندانه‌های زبر سطح درزه می‌باشد. برای به دست آوردن پارامترهای مذکور با دقت بالاتر، می‌توان به جای وصل کردن نقاط به یکدیگر، از برازش تابع خطی بر داده‌ها استفاده نمود و این پارامترها را به صورت مستقیم به دست آورد. همچنین با این روش معادله خطی مور-کولمب از اعتبار بالاتری برخوردار خواهد بود (Kutter & Rautenberg, 1979).

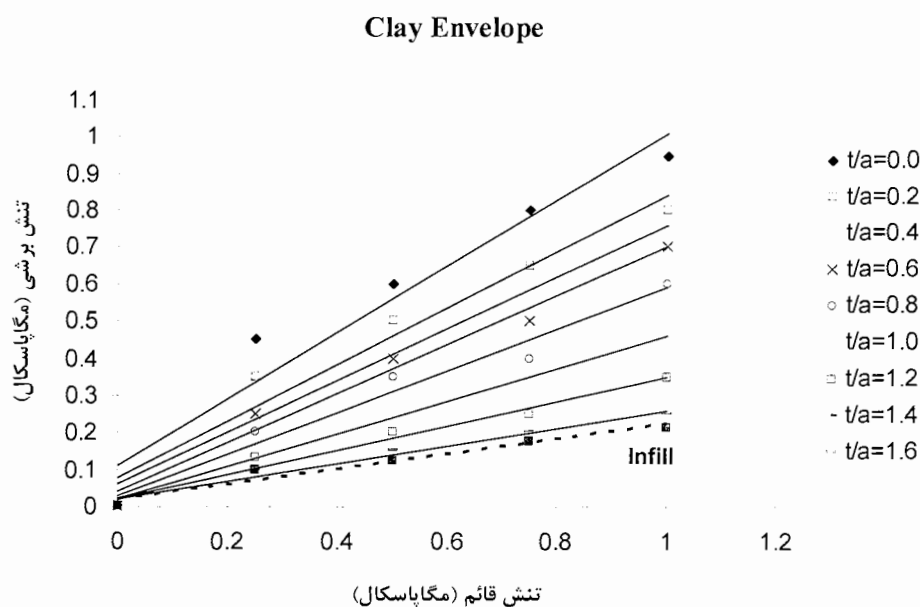
پوش‌های مقاومت برشی مربوط به درزه‌های خالی، ماده پرکننده تنها و درزه‌های پرشده با ضخامت‌های مختلف از هر سه نوع پرکننده برای مقایسه در شکل‌های ۵-۲۰، ۵-۲۱ و ۵-۲۲ آورده شده‌اند.



شکل ۵-۲۰- نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب تنش عمودی (پوش مقاومت برشی) برای پرکننده ماسه-رسی با ضخامت‌های مختلف



شکل ۵-۲۱- نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب تنش عمودی (پوش مقاومت برشی) برای پرکننده ماسه‌ای با ضخامت‌های مختلف



شکل ۵-۲۲- نمودار تنش برشی حداکثر بر حسب تنش عمودی (پوش مقاومت برشی) برای پرکننده رسی با ضخامت‌های مختلف

همان طور که ذکر شد، در منحنی‌های نشان داده شده در شکل‌های بالا به منظور به دست آوردن پارامترهای زاویه اصطکاک و چسبندگی، به جای وصل کردن نقاط به همدیگر از برازش تابع خطی بر آن‌ها استفاده شده است. به این ترتیب برای هر منحنی یک معادله که بیانگر معیار مور-کولمب است، به دست می‌آید. این معادلات در جدول ۴-۵ آورده شده‌اند. ضریب σ_{cr} در این معادلات، تانژانت زاویه اصطکاک سطح درزه و عدد ثابت معادله، بیانگر میزان چسبندگی درزه می‌باشد.

همان طور که در این معادلات و نیز در نمودارهای مربوطه دیده می‌شود، مقاومت درزه‌های پرشده با مخلوط ماسه و رس نسبت به درزه‌های پرشده با رس یا ماسه بالاتر می‌باشد. علت این امر، مقاومت بالاتر خود پرکننده رسی-ماسه‌ای نسبت به پرکننده‌های رسی و ماسه‌ای می‌باشد. این مسئله در مورد مقایسه پرکننده‌های رسی و ماسه‌ای با یکدیگر نیز صادق است.

جدول ۴-۵- معادلات به دست آمده برای پوش‌های مقاومت برشی درزه‌های پر شده با توجه به معیار مور- کولمب در نسبت‌های t/a مختلف

پرکننده ماسه-رسی	پرکننده ماسه‌ای	پرکننده رسی	t/a
$\tau = 0.9\sigma_n + 0.11$	$\tau = 0.9\sigma_n + 0.11$	$\tau = 0.9\sigma_n + 0.11$	۰
$\tau = 0.76\sigma_n + 0.08$	$\tau = 0.72\sigma_n + 0.06$	$\tau = 0.8\sigma_n + 0.1$	۰/۲
$\tau = 0.7\sigma_n + 0.06$	$\tau = 0.68\sigma_n + 0.02$	$\tau = 0.72\sigma_n + 0.09$	۰/۴
$\tau = 0.66\sigma_n + 0.04$	$\tau = 0.58\sigma_n + 0.03$	$\tau = 0.62\sigma_n + 0.08$	۰/۶
$\tau = 0.56\sigma_n + 0.03$	$\tau = 0.472\sigma_n + 0.028$	$\tau = 0.58\sigma_n + 0.06$	۰/۸
$\tau = 0.44\sigma_n + 0.02$	$\tau = 0.32\sigma_n + 0.03$	$\tau = 0.52\sigma_n + 0.04$	۱
$\tau = 0.328\sigma_n + 0.022$	$\tau = 0.192\sigma_n + 0.038$	$\tau = 0.372\sigma_n + 0.038$	۱/۲
$\tau = 0.24\sigma_n + 0.02$	$\tau = 0.18\sigma_n + 0.022$	$\tau = 0.32\sigma_n + 0.03$	۱/۴
$\tau = 0.24\sigma_n + 0.02$	$\tau = 0.18\sigma_n + 0.022$	$\tau = 0.32\sigma_n + 0.03$	۱/۶
$\tau = 0.202\sigma_n + 0.022$	$\tau = 0.16\sigma_n + 0.015$	$\tau = 0.296\sigma_n + 0.017$	>۱/۶

بزرگ بودن میزان زاویه اصطکاک در تنش‌های عمودی پائین نشان دهندهٔ اتساع درزه می‌باشد. به عبارت دیگر در تنش عمودی کم، مقدار زاویه شیب اندازه‌گیری شده از مماس منحنی تنش برشی- تنش قائم، حاصل مجموع زاویه اصطکاک ذاتی سطح تماس دیواره‌های درزه به اضافهٔ زاویهٔ حاصل از اتساع درزه می‌باشد. در این حالت با افزایش تنش برشی، سطح درزه‌ها فقط روی هم می‌لغزند بدون آنکه برشی در درزه‌ها ایجاد گردد و زبری‌های درزه گسیخته شوند.

با افزایش تنش قائم، شیب منحنی تنش برشی- تنش قائم کاهش می‌یابد و به کمترین مقدار خود می‌رسد. به عبارت دیگر افزایش تنش قائم باعث بریده شدن زبری‌های سطح درزه می‌شود و مقدار زاویه اتساع با افزایش تنش قائم کاهش یافته و به صفر می‌رسد. همچنین زاویه اصطکاک سنگ به زاویه اصطکاک پایه یا زاویه اصطکاک ماندگار می‌رسد.

۵-۷-۳- مروی بر نتایج به دست آمده

- مقاومت برشی درزه‌ها با افزودن لایه بسیار نازکی از پرکننده به ضخامت $0/5$ میلی‌متر به میزان زیادی افت می‌کند.
- زاویه اصطکاک حداکثر درزه‌های پر شده کوچک‌تر از زاویه اصطکاک درزه‌های خالی است.
- با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت برشی درزه‌ها در نسبت‌های t/a مختلفی بسته به اینکه ماده پرکننده رس، ماسه یا مخلوط این دو است با مقاومت ماده پرکننده برابر می‌شود.
- وقتی نسبت t/a به $1/6$ نزدیک شود، تغییرات تنش برشی ناچیز می‌شود. این نسبت، نسبت t/a بحرانی نامیده می‌شود.
- وقتی نسبت t/a کمتر از $1/6$ است، هر دو عامل زبری سطح درزه و ضخامت پرکننده رفتار برشی را کنترل می‌کنند، اما آزمایش‌ها نشان می‌دهند که وقتی این نسبت از مقدار بحرانی بیشتر می‌شود، فقط ماده پرکننده رفتار برشی را کنترل می‌کند.
- وقتی رفتار برشی توسط ماده پرکننده کنترل می‌شود، جابجایی افقی متناظر با تنش برشی حداکثر به سرعت کاهش می‌یابد، بدین معنی که درزه در جابجایی کمتری به مقاومت برشی نهایی خود می‌رسد.

فصل ششم

ارائه معیار تجربی جدید برای تخمین مقاومت برشی درزه های پر شده

۶-۱- مقدمه

تا کنون معیارهای بسیاری برای پیش‌بینی رفتار برشی درزه‌های سنگی و تخمین مقاومت برشی آنها ارائه شده است که برخی از آنها توانسته‌اند مقبولیت عمومی را کسب کرده و به صورت رایج مورد استفاده قرار بگیرند. ولی تمامی این معیارها از آزمایش روی درزه‌های خالی به دست آمده و فقط قادرند تا مقاومت برشی چنین درزه‌هایی را تخمین بزنند. در گذشته تلاش‌هایی برای ارائه یک مدل یا معیار جامع برای پیش‌بینی رفتار درزه‌های پرشده انجام شده است که هر یک از آنها نقاط قوت و ضعف مخصوص به خود را دارا می‌باشند. نکته قابل توجه این است که تمام این معیارها بر پایه آزمایش بر روی درزه‌های مدل‌سازی شده در آزمایشگاه به وجود آمده‌اند که می‌توان گفت تقریباً ضعف اصلی تمامی آنهاست و باعث عدم کارایی آنها در کاربردهای تجربی و واقعی شده است. از طرفی عدم اعتبارسنجی مناسب برای مدل‌های ارائه شده ایرادی اصلی و مشهود می‌باشد که به همین دلیل هیچگاه نمی‌توان با اعتماد بالا از چنین معیارهایی استفاده کرد، به طوری که تاکنون کاربرد عملی گسترده‌ای از هیچ یک از این معیارها گزارش نشده است.

بنابراین معیاری لازم بود تا رفتار واقعی درزه‌های طبیعی پرشده را نشان دهد. برای این منظور با کار

آماری که با استفاده از نرم افزار MATLAB R2006a روی داده های به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی انجام شد، معیاری به دست آمد که با توجه به نوع ماده پرکننده موجود و وضعیت زبری سطح درزه می تواند مقاومت برشی آن را با دقت نسبتاً بالایی به دست دهد. در این فصل ابتدا پس از مروری اجمالی بر معیارهای قبلی یاد شده و بحث بر روی نقاط ضعف آنها، به نحوه به دست آوردن معیار تجربی جدید با برآزش توابع مختلف ریاضی بر داده های آزمایشگاهی پرداخته شده است. سپس در بخش بعد، معیار پیشنهادی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است تا بدین ترتیب میزان دقت و درستی آن تحلیل گردد.

۶-۲-۲- معیارهای ارائه شده قبلی

۶-۲-۱- معیار لاما

لاما در سال ۱۹۷۸ بر اساس مطالعات آزمایشگاهی که روی درزه های کششی و زبر پرشده با کائولن انجام داد، یک رابطه لگاریتمی برای محاسبه مقاومت برشی درزه های پرشده به دست آورد. این رابطه تجربی به صورت زیر است (Lama, 1978):

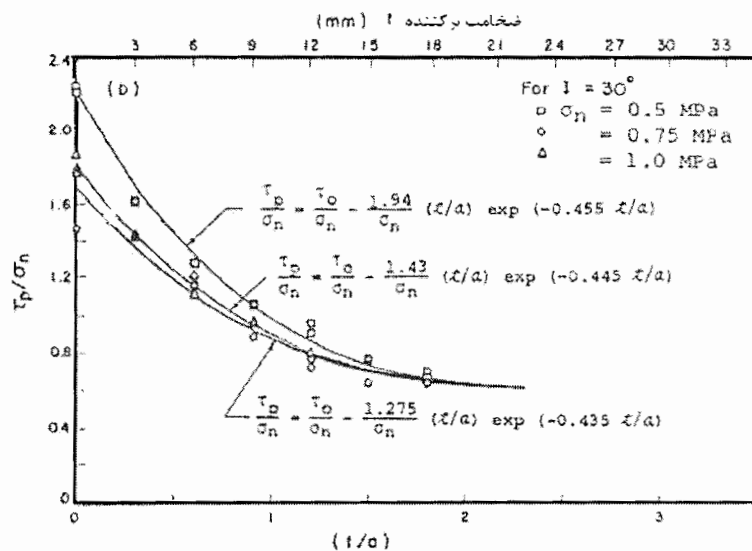
$$\tau_p = 7.25 + 0.46\sigma_n - 0.30Ln(t)\sigma_n^{0.745} \quad (1-6)$$

که τ_p مقاومت برشی بر حسب kN/m^2 ، σ_n تنش قائم بر حسب kN/m^2 و t ضخامت ماده پرکننده بر حسب mm است. معادله مزبور هیچ پارامتری که در ارتباط با زبری سطح باشد دارا نیست و فقط برای زبری مختص درزه های آزمایش شده اعتبار دارد.

۶-۲-۲- معیار فین و ج

فین و ج همکارانش در سال ۱۹۹۰ برای تعیین مقاومت درزه های پرشده یک رابطه تجربی ارائه دادند که بر نتایج آزمایشگاهی استوار بود. آن ها خاطر نشان کردند که اگر زوایای ناهمواری ها کم باشد، پوش مقاومت برشی خطی بوده و در زوایای ناهمواری بزرگ تر دوخطی می شود (Phien-Wej et al, 1990).

وقتی نسبت t/a به ۲ می رسد، رفتار درزه مشابه رفتار ماده پرکننده تنها می شود. در ضخامت های زیاد پرکننده، جابجائی برشی لازم برای رسیدن به مقاومت حداکثر بزرگ تر است. این امر در شکل ۶-۱ قابل مشاهده است.



شکل ۶-۱- نحوه تغییر مقاومت برشی با میزان پرکننده موجود در مدل فین و ج (Phien-Wej et al, 1990)

آن ها بر اساس یافته های فوق برای تعیین مقاومت برشی درزه های پرشده مدل تجربی زیر را پیشنهاد کردند (Phien-Wej et al, 1990):

$$\frac{\tau_p}{\sigma_n} = \frac{\tau_0}{\sigma_{n0}} - \frac{k_1}{\sigma_n} (t/a) \exp[k_2(t/a)] \quad (۶-۲)$$

که τ_p مقاومت برشی درزه پرشده با ضخامت پرکننده t ، ارتفاع متوسط ناهمواری ها، σ_n تنش قائم، τ_0 مقاومت برشی درزه خالی تحت σ_{no} ، و k_1 و k_2 ثابت‌هایی هستند که به زبری سطح درزه و تنش قائم اعمالی بستگی دارند.

از معایب عمده مدل فین وج که آن را تقریباً غیر قابل کاربرد کرده است، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- ضرایب ثابت معادله برای شرایط مختلف تعریف و تعیین نشده‌اند.
- ۲- مدل فقط برای یک پرکننده خاص (بتونیت) با دانه‌بندی واحد ارائه شده است.
- ۳- شکل کلی تابع فقط حدس زده شده و هیچ تابع دیگری در نظر گرفته نشده است.
- ۴- عدم اعتبار سنجی برای مدل ارائه شده (این عیب را می‌توان برای تمام مدل‌های ارائه شده در نظر گرفت).

۳-۲-۶- معیار دتولدو و دفریتاس

دتولدو و دفریتاس در سال ۱۹۹۳ بر اساس مشاهدات تجربی، یک مدل کلی برای تعیین مقاومت برشی درزه‌های پرشده با ضخامت پرکننده مختلف ارائه دادند (DeToledo & DeFreitas, 1993) که در شکل ۶-۲ آورده شده است. آن‌ها روش نایتو^۱ (Nieto, 1974) را گسترش دادند و رفتار برشی کلی درزه‌های پرشده را به صورت قفل‌شدگی^۲، تداخل^۳ و عدم تداخل^۴ توصیف کردند.

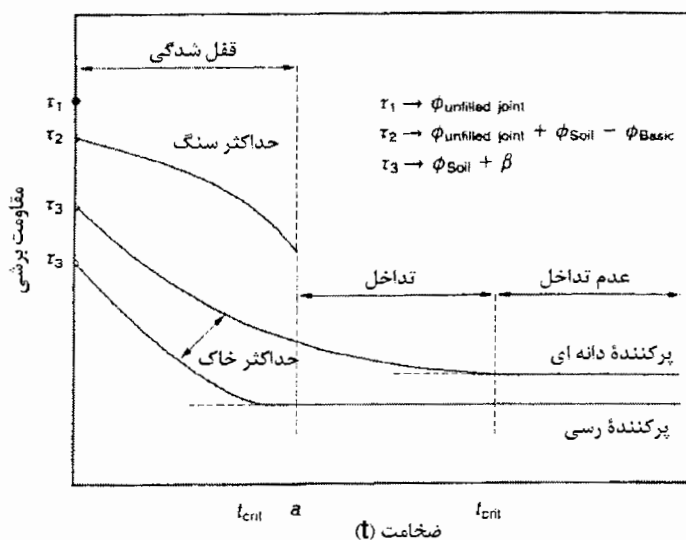
¹ Nieto

² Interlocking

³ Interfering

⁴ Non-interfering

قفل شدگی زمانی اتفاق می افتد که سطوح سنگی در تماس با هم باشند. تداخل هنگامی است که هیچ سطح تماسی بین سطوح سنگی نیست اما مقاومت درزه بزرگتر از مقاومت پرکننده تنها است و همین طور عدم تداخل زمانی اتفاق می افتد که درزه مانند پرکننده تنها عمل می کند. محققین بسیاری (Ladanyi & Archambault, 1977; DeToledo & DeFreitas, 1993; Papaliangas et al, 1990; Phien-Wej et al, 1993) برای ناحیه تداخل مدلهای ریاضی ارائه دادند. حد میان نواحی تداخل و عدم تداخل، ضخامت بحرانی (t_{crit}) نامیده می شود که در بیش از این ضخامت، رفتار برشی درزه کاملاً مطابق با رفتار پرکننده تنها می باشد. این ضخامت بحرانی تابعی از اندازه دانه های ماده پرکننده و ارتفاع ناهمواری ها است.



شکل ۶-۲- معیار ارائه شده توسط دتولدو و دفریتاس برای مقاومت درزه های پر شده (DeToledo & DeFreitas, 1993)

اندازه و زبری درزه ها نیز مقدار نسبت t/a بحرانی را کنترل می کند. درزه های دندانداره ای ایده آل نسبت به شکستگی های کششی ضخامت بحرانی بزرگتری دارند و همین طور درزه های کوچکتر نیز

در مقایسه با شکستگی‌های بزرگ از ضخامت بحرانی کمتری برخوردارند، زیرا هر چه جابجائی لازم برای تماس سطوح سنگ بزرگ‌تر باشد، ماده پرکننده قبل از تداخل سنگ، راحت‌تر به مقاومت حداکثر می‌رسد. شواهد تجربی نشان می‌دهد که وقتی درزه‌های دندان‌اره‌ای حاوی پرکننده‌های دانه‌ای بریده می‌شوند، نسبت t/a به ۲ می‌رسد. در حالی که این مقدار در درزه‌های کششی میان ۱ و ۲ در تغییر است. در مورد پرکننده‌های رسی در هر دوی درزه‌های دندان‌دار و کششی این نسبت کمتر می‌باشد. اگر نسبت t/a کمتر از یک باشد، با ادامه جابجائی برشی، ناهمواری‌های سنگ با هم تماس پیدا کرده و تنش حداکثر ثانویه‌ای حاصل می‌شود. تحت یک تنش قائم ثابت و ضخامت پرکننده نزدیک به صفر، عرض از مبدا پوش حداکثر یک درزه پرشده کمتر از مقاومت درزه‌های خالی است. اگر یک درزه خالی از سنگ نرم یا مواد مصنوعی ساخته شده باشد، اختلاف بین نقطه حداکثرهای سنگ و خاک ناچیز خواهد بود (DeToledo & DeFreitas, 1993).

همان‌طور که ذکر شد، در کارهای آزمایشگاهی که توسط دتولدو و دفریتاس انجام شد، دو نقطه حداکثر در رفتار برشی تمام درزه‌های پرشده مشاهده گردید. در حالی که چنین رفتاری توسط محققان دیگر تأیید نشده است. به همین دلیل مدلی که بر پایه چنین رفتاری بنا نهاده شده باشد نیز زیر سوال می‌باشد. چنین ایراد عمده‌ای کاربرد این مدل را تقریباً غیرممکن ساخته است.

۴-۲-۶- معیار پاپالیانگاس

بر اساس نتایجی که از آزمایش روی درزه‌های مدل‌سازی شده به دست آمد، پاپالیانگاس و همکارانش در سال ۱۹۹۳ مدلی برای تخمین مقاومت برشی درزه‌های پرشده ارائه دادند. طبق این

مدل، مقاومت برشی درزه های پرشده بین دو حد قرار می گیرد؛ τ_{max} که حداکثر مقاومت برشی درزه های خالی است و τ_{min} که کمترین مقاومت برشی با ضخامت پرکننده بحرانی می باشد و با تغییر ضخامت، نوع پرکننده، زبری دیواره سنگی و تنش قائم تغییر می کند. در دیواره های زبر و موج دار بهتر است که τ_{min} برابر مقاومت برشی ماده پرکننده در نظر گرفته شود اما در درزه های صاف یا کمی موج دار، τ_{min} برابر با مقاومت صفحه اندرکنش سنگ- ماده پرکننده است که اغلب کمتر از مقاومت برشی پرکننده می باشد. آن ها با توجه به نتایج آزمایش ها، تنش برشی حداکثر را به صورت درصدی از نسبت های تنش به صورت زیر بیان کردند (Papaliangas et al, 1993):

$$\mu = \mu_{min} + (\mu_{max} - \mu_{min})^n \quad (3-6)$$

$$\mu_{max} = 100 \left(\frac{\tau_{max}}{\sigma} \right) \quad (4-6)$$

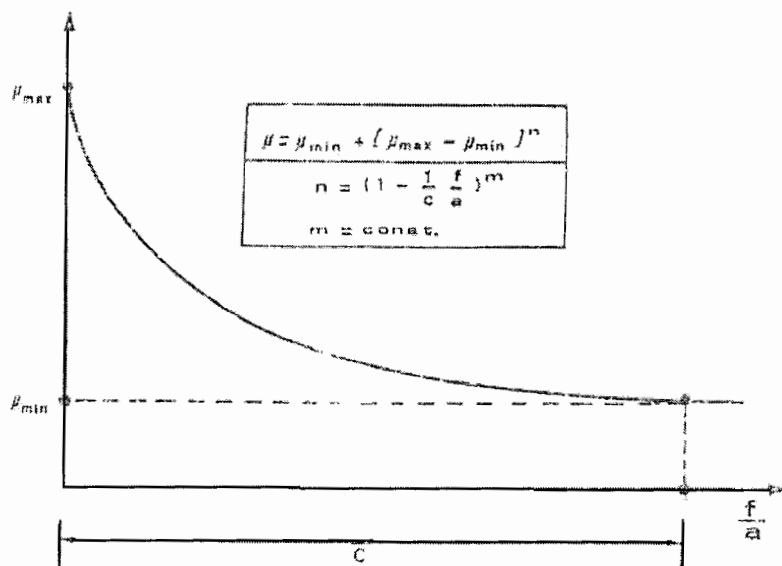
$$\mu_{min} = 100 \left(\frac{\tau_{min}}{\sigma} \right) \quad (5-6)$$

$$n = \left[1 - \frac{1}{c} \left(\frac{t}{a} \right) \right]^m \quad (6-6)$$

که در آن t (ضخامت متوسط ماده پرکننده) بین صفر و c تغییر می کند ($0 \leq t \leq c$) و a ارتفاع متوسط زبری ناپیوستگی ها است. ثابت c برابر نسبتی از t/a است که در آن نسبت، مقاومت برشی حداقل حاصل می شود و به خواص ماده پرکننده، تنش قائم و زبری سطح ناپیوستگی بستگی دارد. ثابت های c و m به طور تجربی تعیین می شوند. در آزمایش هایی که توسط پاپالیانگاس و همکارانش انجام شد، مقادیر c و m در نقطه حداکثر به ترتیب برابر $1/5$ و 1 به دست آمدند. در $t/a = 0$ ، $\mu = \mu_{max}$ مقاومت برشی درزه پرشده را نشان می دهد. در t/a بزرگ تر از c ، μ را می توان برابر

μ_{min} در نظر گرفت که مقاومت برشی حداقل سیستم را نشان می دهد (Papaliangas et al, 1993).

در شکل ۳-۶ مدل ارائه شده توسط پاپالیانگاس و همکارانش آورده شده است.



شکل ۳-۶- مدل ارائه شده توسط پاپالیانگاس و همکارانش برای تخمین مقاومت برشی درزه های پرشده (Papaliangas et al, 1993)

تعیین ضرایب ثابت c و m در معادله پاپالیانگاس از مشکلات اصلی در استفاده از این معیار به شمار می رود. به طوری که مقادیر $1/5$ و 1 که توسط محققین پیشنهاد شده است، برای پرکننده ای به نام خاکستر آتشفشانی سائیده شده (PFA) به دست آمده است. این پرکننده تنها در برخی مناطق دیده می شود و جزو پرکننده های رایج نمی باشد.

۳-۶- ارائه یک معیار تجربی جدید بر پایه مطالعات آزمایشگاهی انجام شده

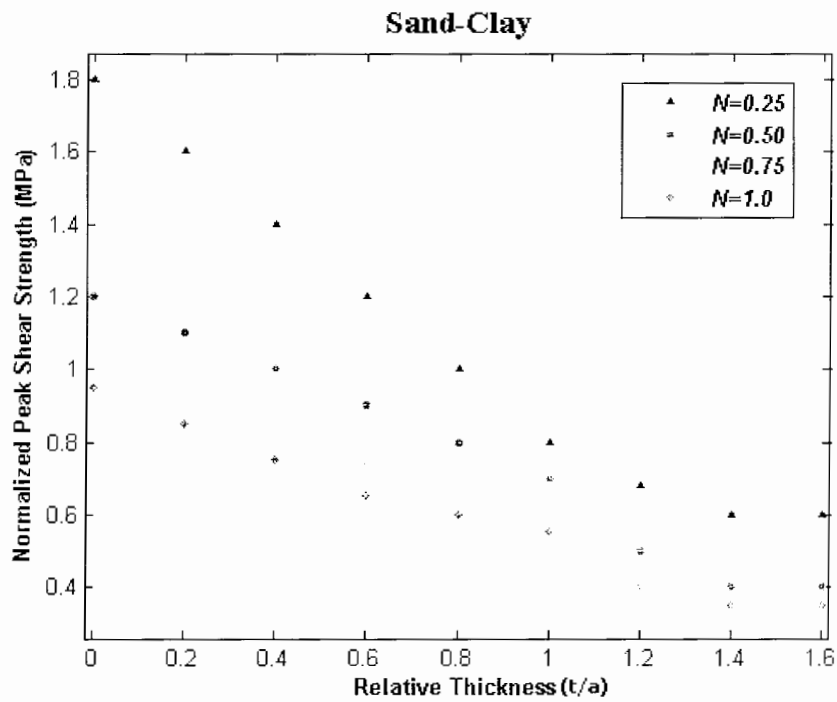
در این بخش به ارائه یک معیار (مدل) تجربی جدید برای تخمین مقاومت برشی درزه های

پرشده و جزئیات ساخت مدل پرداخته می شود. برای ساخت مدل از روش برازش منحنی بر داده های

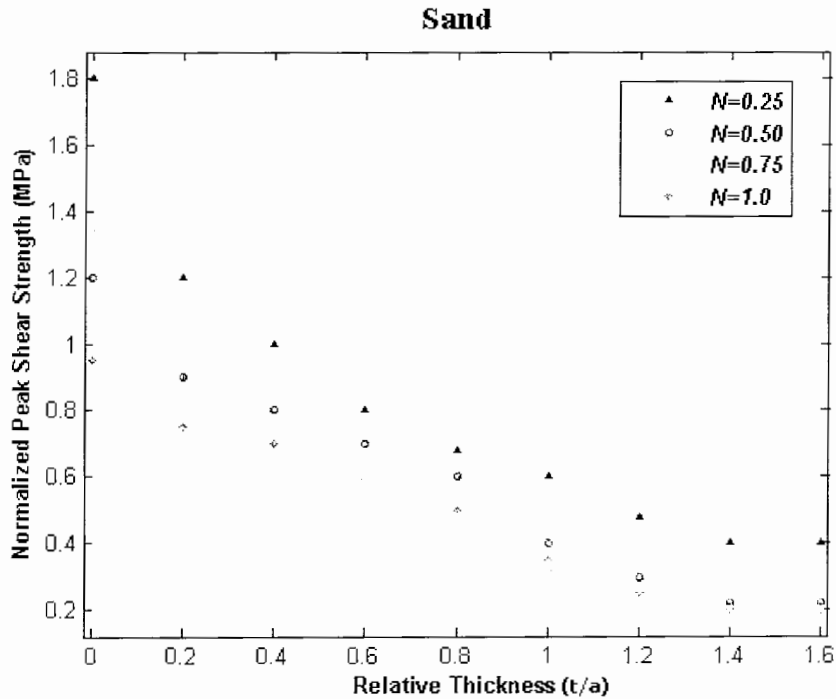
آزمایشگاهی استفاده شده است. بدین منظور برخی از توابع مناسب انتخاب شده و عمل برازش بر داده‌ها انجام شد. سپس پارامترهای آماری از قبیل خطاهای مختلف به منظور یافتن بهترین برازش انجام شده بر هر سری از داده‌ها با هم مقایسه شدند. به این ترتیب بهترین تابع با کمترین خطای برازش انتخاب شده و پس از وارد کردن دیگر پارامترها، از آن برای ساختن مدل مربوطه استفاده گردید. با توجه به اینکه آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها بسته به نوع پرکننده به سه بخش پرکننده ماسه‌ای، رسی و مخلوط طبیعی (ماسه رسی) تقسیم می‌شود، معیار ارائه شده نیز شامل سه بخش خواهد بود. در ادامه فرآیند کامل ساخت و ارائه معیار مذکور توضیح داده می‌شود.

۶-۳-۱- داده‌های آزمایشگاهی مورد نظر

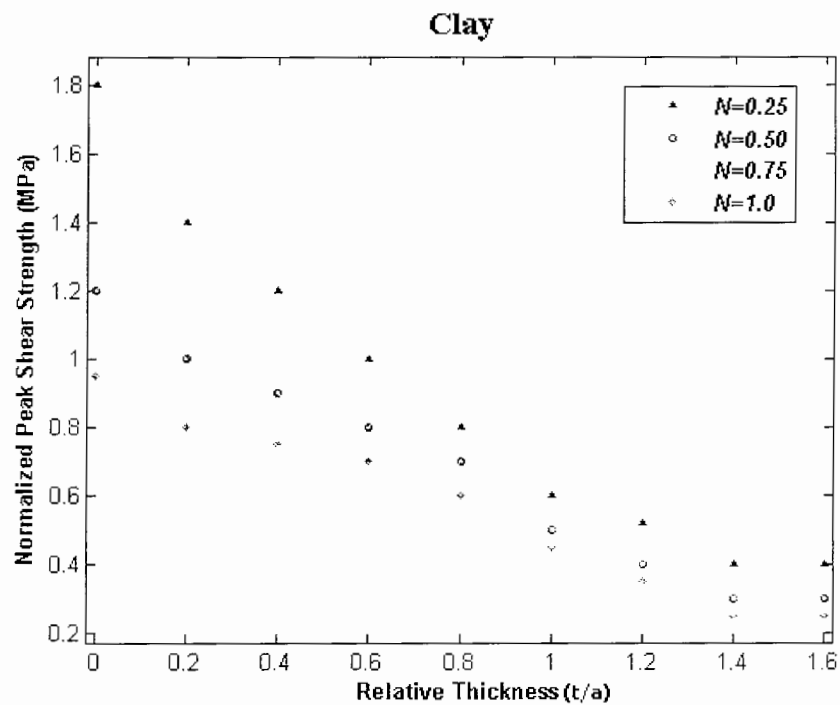
در ابتدا داده‌های آزمایشگاهی مورد نظر برای ساخت مدل مرتب شده و آماده برازش شدند. با مطالعات انجام شده بر روی مدل‌های ارائه شده قبلی و نیز به منظور اعمال تأثیر هم‌زمان پرکننده و زبری سطح درزه، بهترین حالت، نمودار تغییرات مقاومت برشی حداکثر با نسبت t/a تشخیص داده شد. به دلیل تأثیر زیاد میزان بار عمودی بر نتایج، نمودارهای مربوطه با توجه به این پارامتر نرمالایز شدند تا تأثیر آن در مدل اعمال شده و از طرفی در انتها در معیار پیشنهادی نیز در نظر گرفته شود. نمودارهای مربوطه همراه با داده‌های اولیه در شکل‌های ۶-۴ تا ۶-۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴-۶- داده‌های آزمایشگاهی اولیه مربوط به درزه‌های پرشده با مخلوط طبیعی ماسه-رس



شکل ۵-۶- داده‌های آزمایشگاهی اولیه مربوط به درزه‌های پرشده با ماسه



شکل ۶-۶- داده‌های آزمایشگاهی اولیه مربوط به درزه‌های پرشده با رس

۶-۳-۲- بررسی توابع مختلف از نظر قابلیت برازش بر داده‌های آزمایشگاهی

در این مرحله توابعی که قابلیت برازش مناسب بر داده‌های آزمایشگاهی را داشتند مورد بررسی

قرار گرفته و از این میان با توجه به شاخص‌هایی نظیر سادگی تابع، شکل کلی تابع و ... توابع زیر به

صورت اولیه انتخاب شدند:

۱- تابع نمایی (Exponential)

I) نمایی

II) دونمایی

۲- تابع فوریه (Fourier)

۳- تابع گوسی (Gaussian)

۴- تابع چندجمله‌ای (Polynomial)

I) چندجمله‌ای خطی

II) چندجمله‌ای درجه دوم

III) چندجمله‌ای درجه سوم

۵- تابع گویا (Rational)

I) تابع گویا با صورت ثابت و مخرج چندجمله‌ای خطی

II) تابع گویا با صورت ثابت و مخرج چندجمله‌ای درجه دوم

III) تابع گویا با صورت و مخرج چندجمله‌ای خطی

IV) تابع گویا با صورت چندجمله‌ای خطی و مخرج چندجمله‌ای درجه دوم

V) تابع گویا با صورت چندجمله‌ای درجه دوم و مخرج چندجمله‌ای خطی

VI) تابع گویا با صورت و مخرج چندجمله‌ای درجه دوم

پس از برازش کلیه توابع ذکر شده، این توابع از نظر میزان تناسب با داده‌های اولیه با یکدیگر مقایسه شدند. برای انجام چنین مقایسه‌ای سه پارامتر برای هر برازش در نظر گرفته شد. این پارامترها عبارت بودند از مجموع مربعات خطا (SSE^1)، مربع همبستگی میان داده‌ها (R-Square) و مجذور میانگین مربعات خطاها ($RMSE^2$) (Papoulis, 1990). این پارامترها برای تمام منحنی‌های برازش شده مقایسه شده و در نهایت تابعی که کمترین میزان خطاهای SSE و RMSE و بیشترین میزان همبستگی R-Square را داشت به عنوان بهترین تابع قابل استفاده در معیار انتخاب گردید.

¹ Sum of Squares Due to Error

² Root Mean Squared Error

در جداول ۱-۶ تا ۹-۶ مقادیر هر یک از این پارامترها برای توابع مختلف برازش شده بر داده‌های مربوط به هر سه نوع پرکننده آورده شده است.

جدول ۱-۶- مقدار پارامتر SSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه- رسی

تنش عمودی (MPa)				نوع تابع	
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵		
۰/۰۰۸۸۱	۰/۰۰۹۴۵	۰/۰۰۷۲۸	۰/۰۰۷۱۹	I	نمایی
۰/۰۰۸۹۳	۰/۰۰۸۴۴	۰/۰۰۹۱۵	۰/۰۰۹۴۲	II	
۰/۰۱۲۴۸	۰/۰۱۶۱۵	۰/۰۱۵۴۰	۰/۰۱۱۵۱	فوریه	
۰/۰۱۹۳۲	۰/۰۱۲۷۹	۰/۰۱۵۷۶	۰/۰۱۳۱۳	گوسی	
۰/۰۱۷۴۳	۰/۰۱۶۹۲	۰/۰۱۴۵۴	۰/۰۰۹۱۰	I	چندجمله‌ای
۰/۰۲۴۹۳	۰/۰۲۸۷۱	۰/۰۲۴۵۹	۰/۰۲۷۸۳	II	
۰/۰۱۶۴۳	۰/۰۹۱۱۲	۰/۰۸۴۲۱	۰/۰۵۴۴۶	III	
۰/۰۰۶۱۷	۰/۰۰۹۷۳	۰/۰۰۸۶۴	۰/۰۰۹۱۴	I	گویا
۰/۰۰۵۰۲	۰/۰۰۳۹۴	۰/۰۰۴۷۹	۰/۰۰۵۳۲	II	
۰/۰۰۵۹۱	۰/۰۰۴۷۰	۰/۰۰۶۵۳	۰/۰۰۷۶۸	III	
۰/۰۰۹۲۷	۰/۰۰۶۵۸	۰/۰۰۵۷۳	۰/۰۰۶۰۷	VI	
۰/۰۱۴۹۷	۰/۰۲۱۱۲	۰/۰۱۵۶۴	۰/۰۱۲۹۲	V	
۰/۰۰۵۷۰	۰/۰۰۶۸۹	۰/۰۰۸۴۳	۰/۰۰۹۲۰	VI	

جدول ۲-۶- مقدار پارامتر R-Square برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه- رسی

تنش عمودی (MPa)				نوع تابع	
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵		
۰/۹۷۱۲	۰/۹۹۲۰	۰/۹۸۶۱	۰/۹۸۷۳	I	نمایی
۰/۹۸۶۱	۰/۹۹۰۸	۰/۹۹۱۶	۰/۹۹۵۷	II	
۰/۹۶۱۱	۰/۹۶۳۷	۰/۹۵۴۶	۰/۹۷۱۹	فوریه	
۰/۹۷۵۱	۰/۹۶۳۳	۰/۹۶۴۸	۰/۹۸۴۵	گوسی	
۰/۹۸۹۵	۰/۹۶۳۹	۰/۹۸۲۲	۰/۹۷۸۲	I	چندجمله‌ای
۰/۹۸۷۶	۰/۹۷۱۹	۰/۹۷۴۶	۰/۹۸۰۱	II	
۰/۹۷۸۳	۰/۹۷۴۶	۰/۹۶۷۷	۰/۹۶۹۲	III	
۰/۹۹۰۹	۰/۹۸۹۴	۰/۹۹۱۶	۰/۹۹۰۵	I	گویا
۰/۹۹۹۰	۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۸۶	II	
۰/۹۸۶۵	۰/۹۹۱۸	۰/۹۸۵۱	۰/۹۸۴۶	III	
۰/۹۹۳۲	۰/۹۸۱۴	۰/۹۹۰۸	۰/۹۷۴۹	VI	
۰/۹۸۱۲	۰/۹۷۰۳	۰/۹۷۴۸	۰/۹۷۶۹	V	
۰/۹۸۱۶	۰/۹۸۴۹	۰/۹۸۷۲	۰/۹۸۸۳	VI	

جدول ۶-۳- مقدار پارامتر RMSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه-رسی

تنش عمودی (MPa)				نوع تابع	
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵		
۰/۰۲۳۵۹	۰/۰۱۹۷۸	۰/۰۲۲۴۳	۰/۰۲۴۸۳	I	نمایی
۰/۰۲۳۶۱	۰/۰۲۷۵۱	۰/۰۲۴۶۰	۰/۰۲۰۴۳	II	
۰/۰۳۱۳۱	۰/۰۳۹۴۶	۰/۰۳۵۵۰	۰/۰۳۱۲۷	فوریه	
۰/۰۳۰۱۹	۰/۰۴۰۱۲	۰/۰۳۹۱۷	۰/۰۴۲۱۶	گوسی	
۰/۰۳۴۲۳	۰/۰۳۷۸۲	۰/۰۳۱۲۹	۰/۰۲۹۴۳	I	چندجمله‌ای
۰/۰۶۷۴۶	۰/۰۷۵۴۳	۰/۰۶۷۱۱	۰/۰۶۸۱۹	II	
۰/۰۳۳۳۱	۰/۰۲۹۶۶	۰/۰۲۷۴۶	۰/۰۲۴۵۸	III	
۰/۰۲۷۴۰	۰/۰۲۰۲۰	۰/۰۱۹۴۶	۰/۰۱۹۲۱	I	گویا
۰/۰۰۸۷۶	۰/۰۱۱۲۹	۰/۰۱۵۹۷	۰/۰۱۶۴۳	II	
۰/۰۱۸۷۹	۰/۰۲۲۱۶	۰/۰۲۰۵۰	۰/۰۱۹۷۷	III	
۰/۰۲۹۷۱	۰/۰۲۷۴۳	۰/۰۱۹۴۶	۰/۰۲۳۸۱	VI	
۰/۰۳۱۲۹	۰/۰۳۸۴۰	۰/۰۳۶۶۱	۰/۰۳۶۵۹	V	
۰/۰۱۹۱۹	۰/۰۲۶۷۹	۰/۰۲۲۴۶	۰/۰۲۴۱۶	VI	

جدول ۶-۴- مقدار پارامتر SSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده ماسه‌ای

تنش عمودی (MPa)				نوع تابع	
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵		
۰/۰۰۶۸۲	۰/۰۰۸۷۴	۰/۰۰۸۴۱	۰/۰۰۹۱۷	I	نمایی
۰/۰۰۹۳۸	۰/۰۰۹۵۳	۰/۰۰۸۶۰	۰/۰۰۷۲۱	II	
۰/۰۱۱۱۷	۰/۰۱۷۴۱	۰/۰۱۱۵۹	۰/۰۱۲۴۲	فوریه	
۰/۰۱۱۱۴	۰/۰۱۴۲۵	۰/۰۱۹۳۲	۰/۰۱۵۱۱	گوسی	
۰/۰۱۴۶۲	۰/۰۱۷۴۸	۰/۰۱۴۲۳	۰/۰۰۸۴۷	I	چندجمله‌ای
۰/۰۲۸۱۳	۰/۰۲۵۴۶	۰/۰۲۲۳۱	۰/۰۲۱۴۳	II	
۰/۰۱۱۸۹	۰/۰۹۰۹۰	۰/۰۹۱۱۱	۰/۰۷۵۱۲	III	
۰/۰۰۸۸۰	۰/۰۰۸۴۷	۰/۰۰۶۱۰	۰/۰۰۶۸۷	I	گویا
۰/۰۰۳۴۹	۰/۰۰۲۵۵	۰/۰۰۶۵۱	۰/۰۰۴۱۱	II	
۰/۰۰۵۱۲	۰/۰۰۸۷۶	۰/۰۰۸۷۱	۰/۰۰۹۵۴	III	
۰/۰۰۸۴۲	۰/۰۰۹۴۱	۰/۰۰۵۶۲	۰/۰۰۷۴۴	VI	
۰/۰۱۵۵۵	۰/۰۱۸۹۱	۰/۰۱۱۴۲	۰/۰۱۲۸۳	V	
۰/۰۰۶۵۲	۰/۰۰۸۱۱	۰/۰۰۷۶۳	۰/۰۰۷۷۴	VI	

جدول ۶-۵- مقدار پارامتر R-Square برای توابع برازش شده بر داده های مربوط به پرکننده ماسه ای

تنش عمودی (MPa)				نوع تابع	
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵		
۰/۹۹۰۱	۰/۹۸۴۱	۰/۹۸۷۴	۰/۹۹۱۲	I	نمایی
۰/۹۸۶۳	۰/۹۸۵۰	۰/۹۹۲۲	۰/۹۹۴۲	II	
۰/۹۷۸۲	۰/۹۷۴۵	۰/۹۴۲۲	۰/۹۶۵۳	فوریه	
۰/۹۶۶۶	۰/۹۸۶۳	۰/۹۷۵۴	۰/۹۵۳۱	گوسی	
۰/۹۷۹۱	۰/۹۵۶۵	۰/۹۸۴۲	۰/۹۴۵۲	I	چندجمله ای
۰/۹۷۸۰	۰/۹۵۴۳	۰/۹۸۱۰	۰/۹۶۳۳	II	
۰/۹۶۳۰	۰/۹۸۰۰	۰/۹۶۹۸	۰/۹۷۱۷	III	
۰/۹۹۰۲	۰/۹۹۳۵	۰/۹۹۲۱	۰/۹۸۹۲	I	گویا
۰/۹۹۹۰	۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۵۴	۰/۹۹۸۶	II	
۰/۹۹۶۵	۰/۹۹۳۳	۰/۹۸۹۰	۰/۹۹۱۸	III	
۰/۹۸۳۴	۰/۹۸۸۶	۰/۹۹۵۴	۰/۹۸۸۳	VI	
۰/۹۸۱۲	۰/۹۷۰۳	۰/۹۷۴۸	۰/۹۷۶۹	V	
۰/۹۹۰۸	۰/۹۸۷۶	۰/۹۹۲۱	۰/۹۹۱۰	VI	

جدول ۶-۶- مقدار پارامتر RMSE برای توابع برازش شده بر داده های مربوط به پرکننده ماسه ای

تنش عمودی (MPa)				نوع تابع	
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵		
۰/۰۱۷۴۶	۰/۰۲۳۳۰	۰/۰۲۵۱۱	۰/۰۲۷۴۱	I	نمایی
۰/۰۲۷۰۳	۰/۰۲۸۶۹	۰/۰۲۴۱۳	۰/۰۲۸۶۲	II	
۰/۰۲۹۵۷	۰/۰۴۳۹۴	۰/۰۳۶۶۸	۰/۰۳۲۵۵	فوریه	
۰/۰۲۸۴۰	۰/۰۳۶۷۲	۰/۰۴۲۰۰	۰/۰۳۴۶۵	گوسی	
۰/۰۳۵۹۴	۰/۰۴۰۲۸	۰/۰۳۴۲۰	۰/۰۲۱۰۶	I	چندجمله ای
۰/۰۷۱۴۳	۰/۰۷۰۱۱	۰/۰۶۸۵۳	۰/۰۶۵۴۷	II	
۰/۰۳۷۴۸	۰/۰۲۷۱۳	۰/۰۲۸۹۰	۰/۰۲۱۳۴	III	
۰/۰۲۶۰۰	۰/۰۲۴۵۳	۰/۰۱۸۶۴	۰/۰۱۸۴۳	I	گویا
۰/۰۰۹۳۹	۰/۰۰۷۸۰	۰/۰۱۶۴۹	۰/۰۱۴۴۴	II	
۰/۰۱۶۴۱	۰/۰۲۰۳۹	۰/۰۲۷۳۵	۰/۰۲۶۹۶	III	
۰/۰۳۰۰۴	۰/۰۲۹۳۸	۰/۰۱۵۷۸	۰/۰۲۱۲۰	VI	
۰/۰۳۷۶۶	۰/۰۴۰۵۶	۰/۰۳۹۵۳	۰/۰۳۴۰۴	V	
۰/۰۱۸۰۰	۰/۰۲۵۲۵	۰/۰۲۱۸۵	۰/۰۲۱۰۴	VI	

جدول ۶-۷- مقدار پارامتر SSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده رسی

تنش عمودی (MPa)				نوع تابع	
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵		
۰/۰۰۸۱۰	۰/۰۰۷۳۲	۰/۰۰۹۵۵	۰/۰۱۰۲۴	I	نمایی
۰/۰۰۸۶۴	۰/۰۰۹۱۱	۰/۰۰۷۹۱	۰/۰۰۶۴۳	II	
۰/۰۱۸۳۷	۰/۰۱۴۱۴	۰/۰۱۳۴۹	۰/۰۱۱۱۶	فوریه	
۰/۰۱۳۹۹	۰/۰۱۲۸۲	۰/۰۱۵۲۶	۰/۰۱۴۸۲	گوسی	
۰/۰۰۹۴۴	۰/۰۰۸۳۵	۰/۰۰۹۶۸	۰/۰۰۹۰۱	I	چندجمله‌ای
۰/۰۲۱۱۰	۰/۰۱۸۰۳	۰/۰۱۹۹۳	۰/۰۱۷۸۸	II	
۰/۰۶۰۵۲	۰/۰۷۰۵۰	۰/۰۸۲۱۳	۰/۰۸۴۴۶	III	
۰/۰۰۹۰۲	۰/۰۰۶۸۱	۰/۰۰۷۹۵	۰/۰۰۵۱۳	I	گویا
۰/۰۰۴۶۹	۰/۰۰۴۱۸	۰/۰۰۶۹۴	۰/۰۰۳۷۲	II	
۰/۰۰۶۷۰	۰/۰۰۸۴۹	۰/۰۰۷۵۲	۰/۰۰۹۲۴	III	
۰/۰۰۵۱۹	۰/۰۰۶۱۳	۰/۰۰۷۴۸	۰/۰۰۴۹۹	VI	
۰/۰۱۳۶۶	۰/۰۱۷۵۷	۰/۰۱۵۲۳	۰/۰۱۳۹۴	V	
۰/۰۰۵۱۱	۰/۰۰۷۴۸	۰/۰۰۸۴۶	۰/۰۰۵۶۱	VI	

جدول ۶-۸- مقدار پارامتر R-Square برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده رسی

تنش عمودی (MPa)				نوع تابع	
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵		
۰/۹۹۱۰	۰/۹۸۴۳	۰/۹۸۰۷	۰/۹۹۱۱	I	نمایی
۰/۹۸۷۲	۰/۹۹۱۷	۰/۹۹۰۶	۰/۹۸۷۵	II	
۰/۹۷۱۵	۰/۹۷۴۶	۰/۹۶۴۳	۰/۹۵۴۶	فوریه	
۰/۹۷۱۱	۰/۹۸۱۳	۰/۹۷۴۶	۰/۹۸۴۳	گوسی	
۰/۹۷۱۶	۰/۹۶۴۴	۰/۹۷۸۳	۰/۹۸۱۳	I	چندجمله‌ای
۰/۹۸۱۱	۰/۹۶۴۶	۰/۹۸۱۸	۰/۹۸۳۰	II	
۰/۹۷۵۲	۰/۹۸۱۶	۰/۹۷۷۸	۰/۹۶۵۶	III	
۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۱۸	۰/۹۹۳۴	۰/۹۹۲۲	I	گویا
۰/۹۹۹۰	۰/۹۹۸۲	۰/۹۹۶۷	۰/۹۹۸۹	II	
۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۱۴	۰/۹۸۲۳	۰/۹۹۵۷	III	
۰/۹۸۸۸	۰/۹۹۰۵	۰/۹۸۹۳	۰/۹۸۰۶	VI	
۰/۹۷۱۹	۰/۹۶۹۶	۰/۹۸۳۵	۰/۹۸۴۱	V	
۰/۹۹۲۸	۰/۹۹۲۱	۰/۹۹۵۵	۰/۹۹۸۰	VI	

جدول ۶-۹- مقدار پارامتر RMSE برای توابع برازش شده بر داده‌های مربوط به پرکننده رسی

تنش عمودی (MPa)				نوع تابع	
۱	۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵		
۰/۰۲۷۱۶	۰/۰۲۴۸۰	۰/۰۲۶۱۷	۰/۰۲۴۴۴	I	نمایی
۰/۰۲۹۸۸	۰/۰۲۴۶۱	۰/۰۲۸۲۹	۰/۰۲۵۶۵	II	
۰/۰۳۱۳۹	۰/۰۴۰۴۱	۰/۰۳۹۱۶	۰/۰۳۴۵۳	فوریه	
۰/۰۳۷۶۸	۰/۰۴۳۱۶	۰/۰۴۱۹۵	۰/۰۳۶۹۲	گوسی	
۰/۰۲۸۲۸	۰/۰۳۷۶۱	۰/۰۲۶۳۵	۰/۰۲۰۱۵	I	چندجمله‌ای
۰/۰۶۸۹۲	۰/۰۶۹۸۴	۰/۰۷۲۱۳	۰/۰۷۰۱۶	II	
۰/۰۳۱۱۵	۰/۰۲۶۶۸	۰/۰۲۵۴۴	۰/۰۲۶۵۹	III	
۰/۰۱۹۷۴	۰/۰۲۰۸۴	۰/۰۱۹۷۴	۰/۰۱۶۱۰	I	گویا
۰/۰۱۳۳۹	۰/۰۱۱۸۴	۰/۰۱۴۷۱	۰/۰۱۳۲۸	II	
۰/۰۱۴۸۳	۰/۰۲۰۵۵	۰/۰۲۴۵۱	۰/۰۲۷۱۱	III	
۰/۰۱۶۵۳	۰/۰۱۴۵۹	۰/۰۱۶۴۲	۰/۰۲۲۲۵	VI	
۰/۰۳۶۴۸	۰/۰۳۹۱۶	۰/۰۳۸۶۸	۰/۰۳۶۱۲	V	
۰/۰۲۱۱۳	۰/۰۲۴۳۰	۰/۰۲۲۱۹	۰/۰۲۲۶۳	VI	

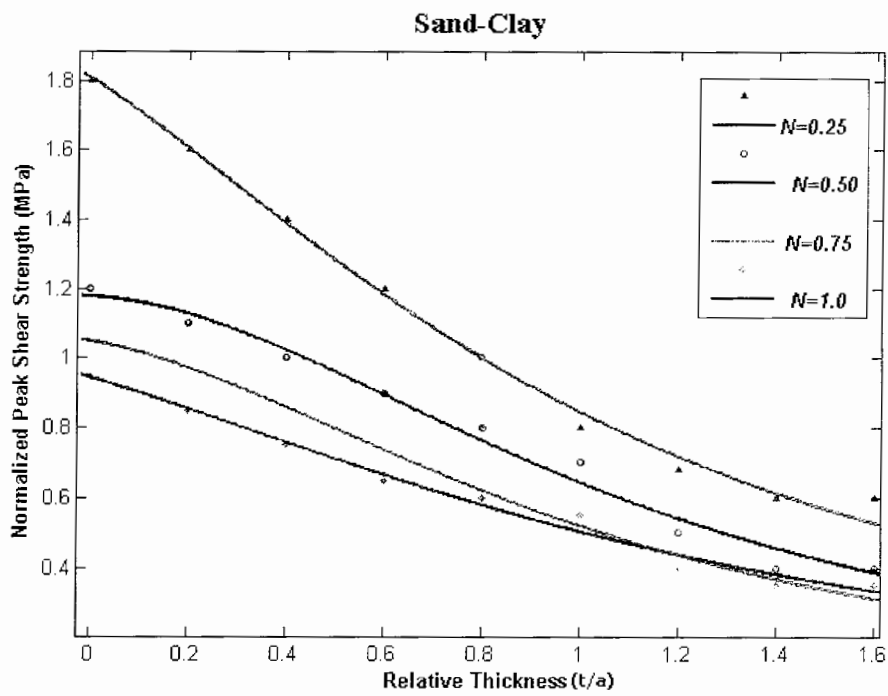
۶-۳-۳- به دست آوردن معیار پیشنهادی بر اساس بهترین برازش

با توجه به سه پارامتر بدست آمده برای هر برازش و مقایسه آن‌ها با یکدیگر برای توابع مختلف، مشاهده می‌شود که در تابع گویا با صورت ثابت و مخرج درجه دوم، در تمامی برازش‌ها کمترین میزان خطا و بیشترین مقدار همبستگی وجود دارد.

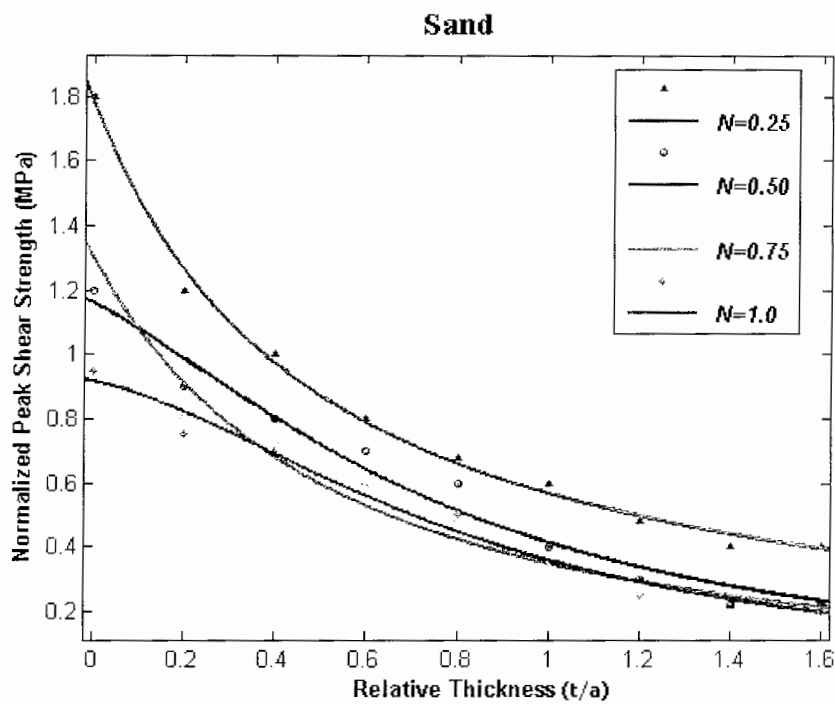
بنابراین تابع گویا با صورت ثابت و مخرج درجه دوم به عنوان تابع مورد استفاده در معیار مذکور انتخاب گردید. شکل کلی تابع مورد نظر به شکل زیر می‌باشد:

$$f(x) = \frac{c_1}{x^2 + k_1x + k_2} \quad (7-6)$$

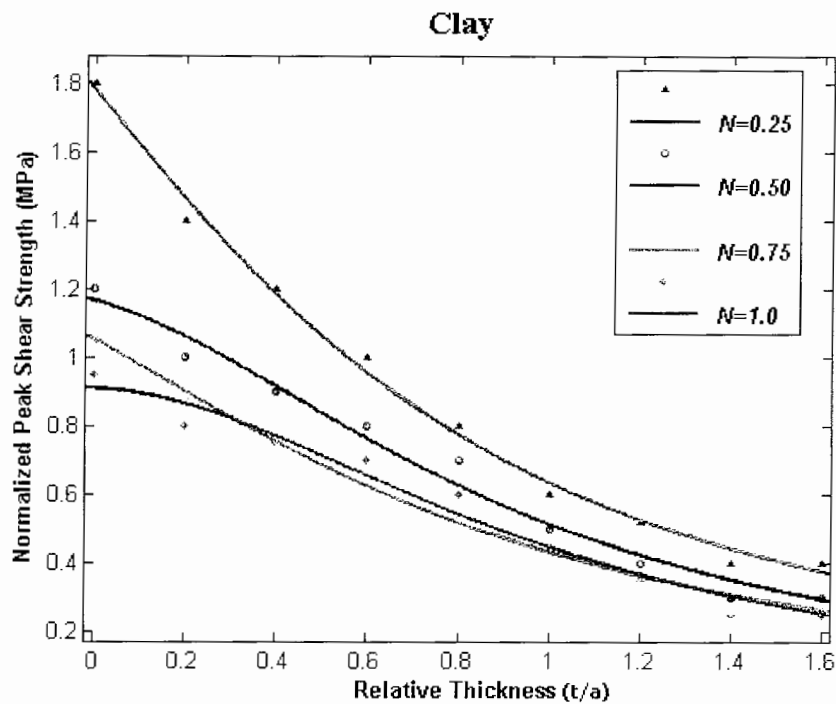
در شکل‌های ۶-۷، ۶-۸ و ۶-۹ تابع گویای برازش شده بر داده‌های آزمایشگاهی مربوط به پرکننده‌های مختلف قابل مشاهده است.



شکل ۶-۷- منحنی‌های برازش شده تابع گویا مربوط به پرکننده مخلوط طبیعی ماسه-رس



شکل ۶-۸- منحنی‌های برازش شده تابع گویا مربوط به پرکننده ماسه‌ای



شکل ۶-۹- منحنی های برازش شده تابع گویا مربوط به پرکننده رسی

همان طور که مشاهده می شود، تمام نمودارها از نقطه مربوط به مقدار مقاومت برشی درزه خالی شروع شده و پس از عبور از ضخامت نسبی $1/4$ به مجانب افقی خود نزدیک می شوند. به همین دلیل معادله گویای به دست آمده از برازش بر منحنی ها به عنوان «میزان افت مقاومت برشی نرمالایز شده ناشی از حضور پرکننده در درزه» در نظر گرفته شد:

$$\left(\frac{\tau_p}{\sigma_n}\right) = \left(\frac{\tau_p}{\sigma_n}\right)_{clean} - \Delta\tau_p \quad (۸-۶)$$

همان طور که در معادله ۸-۶ دیده می شود، مقاومت برشی درزه پر شده $\left(\frac{\tau_p}{\sigma_n}\right)$ برابر با تفاضل معادله برازش شده $(\Delta\tau_p)$ از مقاومت برشی درزه خالی $\left(\frac{\tau_p}{\sigma_n}\right)_{clean}$ در نظر گرفته شده است. در واقع

می توان گفت که $\Delta\tau_p$ میزان کاهش مقاومتی است که در نتیجه حضور مواد پرکننده به وجود آمده

است. هدف اصلی از برازش نیز به دست آوردن مقدار $\Delta\tau_p$ بوده است.

پس از اعمال پارامترهای ضخامت نسبی پرکننده و تنش برشی حداکثر نرمالایز شده به شکل کلی تابع گویا و نیز تأثیر تفاضل تنش در حضور ماده پرکننده، رابطه نهایی برای پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های پرشده به صورت رابطه ۹-۶ در می‌آید:

$$\frac{\tau_p}{\sigma_n} = \frac{\tau_0}{\sigma_{n0}} - \frac{c(t/a)}{\sigma_n [(t/a)^2 + k_1(t/a) + k_2]} \quad (9-6)$$

که در آن:

τ_p : مقاومت برشی درزه پرشده

τ_0 : مقاومت برشی درزه خالی تحت تنش قائم σ_{n0}

σ_n : تنش قائم وارد بر سطح درزه

t : ضخامت ماده پرکننده

a : زبری متوسط سطح درزه یا ارتفاع متوسط ناهمواری‌ها

k_1 ، k_2 و c : ضرایب ثابت تجربی هستند که به تنش قائم اعمالی و نوع ماده پرکننده بستگی دارند.

رابطه ۹-۶ تا زمانی اعتبار خواهد داشت که مقاومت برشی درزه پرشده برابر با مقاومت برشی ماده پرکننده تنها شود. به طوری که اگر مقاومت برشی پرکننده تنها را با τ_{Soil} نمایش دهیم، رابطه در محدوده $\tau_p \geq \tau_{Soil}$ اعتبار خواهد داشت.

به منظور تعیین ضرایب ثابت معادله ۹-۶، برای کم کردن خطا، به جای استفاده از ضرایب به دست آمده از برازش، معادله به ازای نسبت‌های مختلف t/a مربوط به هر پرکننده حل گردید. به عنوان مثال برای پرکننده ماسه‌ای تحت بار عمودی ۰/۵ مگاپاسکال، مقدار τ_0/σ_{n0} برابر با ۱/۲ می‌باشد. با

جایگذاری این مقدار و مقدار بار عمودی 0.15 مگاپاسکال در معادله ۶-۹ و همین طور نسبت های t/a برابر با 0.12 ، 0.16 و $1/2$ به همراه τ_p مربوط به هر کدام، یک دستگاه سه معادله و سه مجهول به صورتی که در زیر نشان داده شده است، تشکیل می گردد:

$$\begin{aligned} 0.15k_2 + 0.03k_1 - 0.2c &= -0.006 \\ 0.25k_2 + 0.15k_1 - 0.6c &= -0.09 \\ 0.45k_2 + 0.54k_1 - 1.2c &= -0.648 \end{aligned} \quad (7-6)$$

با حل این دستگاه معادلات، ضرایب مربوطه به دست می آیند:

$$\begin{aligned} k_2 &= -0.2907 \\ k_1 &= -2.1689 \\ c &= -0.5133 \end{aligned}$$

برای تمامی حالات چنین روندی به کار گرفته شد و بدین ترتیب تمامی ضرایب با بالاترین دقت به دست آمدند. در جدول ۶-۱۰ مقادیر مربوط به ضرایب k_1 ، k_2 و c متعلق به انواع پرکننده های آزمایش شده آورده شده است.

جدول ۶-۱۰- مقادیر ضرایب ثابت پیشنهادی در مدل ارائه شده مربوط به انواع پرکننده های آزمایش شده

۱/۰			۰/۷۵			۰/۵۰			۰/۲۵			بار عمودی (MPa)
k_2	k_1	c	k_2	k_1	c	k_2	k_1	c	k_2	k_1	c	ضرایب
۶/۷۲	-۰/۱۸	۳/۳	-۱/۲	-۱/۷	-۰/۷۵	-۳/۴۷۰۸	-۰/۷۶۹۲	-۰/۱۸۶۱۵	۲/۷۶	-۱/۶	۰/۵۴	پرکننده ماسه-رسی
-۰/۲۴	-۱/۸	-۰/۵۶	-۰/۳۷۰۹	-۲/۱۶۳۶	-۰/۷۶۳۶	-۰/۲۹۰۷	-۲/۱۶۸۹	-۰/۵۱۳۳	-۱/۳۲	-۵/۶	-۱/۸	پرکننده ماسه ای
-۰/۲۸۱۴	-۱/۶۸۹۷	-۰/۴۳۴۵	-۲/۲۴	-۳/۴	-۲/۱۶	-۰/۴۸	-۱/۸	-۰/۴	-۱/۰۸	-۲/۰۸	-۰/۸	پرکننده رسی

همان طوری که در خود رابطه ۶-۹ نیز دیده می شود، این رابطه دربرگیرنده هر دو پارامتر زبری سطوح درزه ها و ضخامت ماده پرکننده می باشد، بنابراین می توان گفت که تا حد بسیار بالایی توانسته است اهداف اولیه تحقیق را ارضاء نماید. چنین معیاری قادر است با در دست بودن ضرایب تجربی،

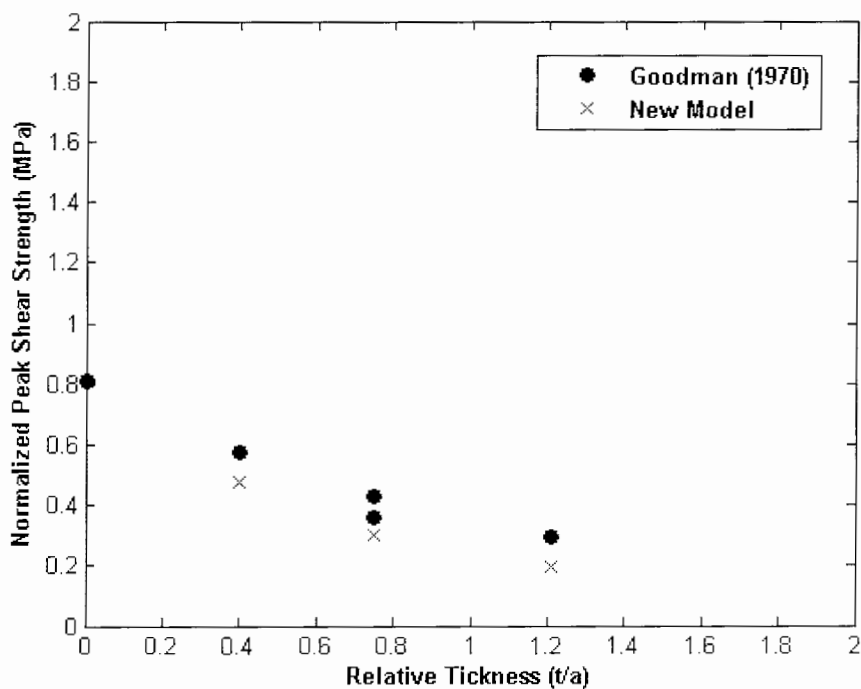
مقاومت برشی درزه های پرشده در شرایط مشابه را تخمین بزند، ولی این معیار تنها از داده های تجربی به دست آمده از درزه های موجود در شیب های سنگی و آزمایش تحت شرایط CNL منتج شده است. بنابراین به طور کلی می توان گفت که این معیار برای موقعیت هایی که در شرایط بارگذاری CNL قرار دارند (نظیر شیب های سنگی جاده ها، پله های معادن روباز، ترانشه ها و سقف و دیواره تونل های زیرزمینی) نتایج معتبرتری ارائه می دهد.

۳-۶-۴- اعتبارسنجی تجربی^۱ مدل ارائه شده

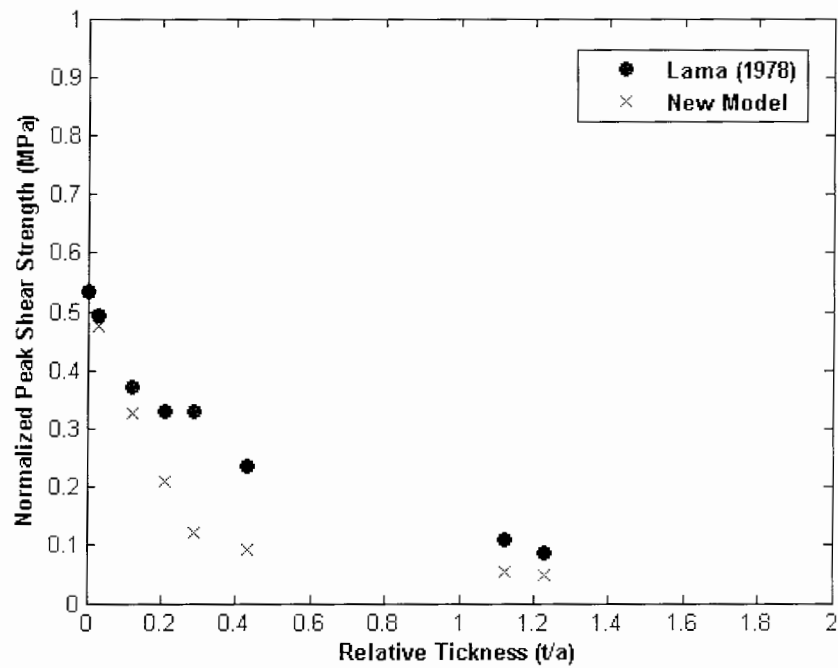
به منظور اعتبارسنجی تجربی مدل، داده های منتشر شده توسط محققین مختلف جمع آوری شد. این داده ها به محققینی چون گودمن (۱۹۷۰)، لاما (۱۹۷۸)، فین و ج (۱۹۹۰)، پاپالیانگاس (۱۹۹۰ و ۱۹۹۳) و دتولدو و دفریتاس (۱۹۹۳) تعلق داشت. از این میان آزمایش های مربوط به پاپالیانگاس (۱۹۹۰ و ۱۹۹۳) در تنش های عمودی بسیار پایین (کمتر از ۰/۰۵ مگاپاسکال) انجام شده بود و بدین ترتیب داده های مربوط به این محقق در این قسمت حذف گردید. در سایر موارد نوع پرکننده موجود از نظر دانه بندی با پرکننده های موجود در جدول ۶-۱۰ تطبیق داده شد. داده های تجربی به دست آمده توسط گودمن که در شرایط تنش قائم ۷۴۶ مگاپاسکال و پرکننده پودر میکا به دست آمده است (Goodman, 1970)، در مدل جدید وارد شد و نتایج به صورت نمودار شکل ۶-۱۰ با یکدیگر مقایسه شدند. لاما آزمایش های خود را در تنش قائم ۰/۳۵ مگاپاسکال و با پرکننده کائولینیت انجام داده است (Lama, 1978). نتایج مقایسه در نمودار شکل ۶-۱۱ دیده می شود.

^۱ Empirical Validation

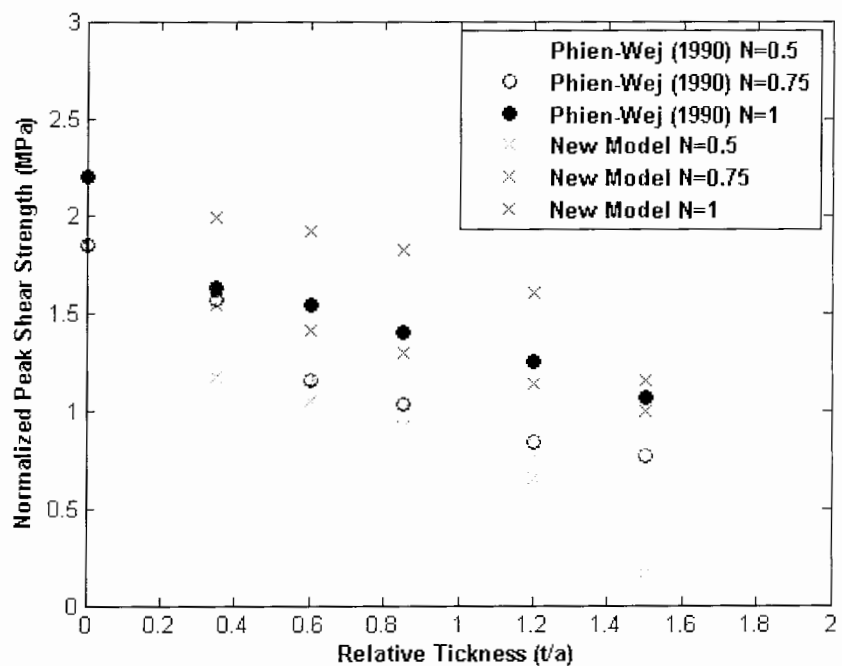
داده‌های به دست آمده توسط فین وچ که آزمایش‌های گسترده‌ای در شرایط تنش قائم 0.5 ، 0.75 و 1 مگاپاسکال و پرکننده بنتونیت انجام داده است (Phien-Wej et al, 1990)، وارد معادله ارائه شده گردید و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. این مقایسه در نمودارهای شکل ۶-۱۲ آورده شده است. آخرین مقایسه مربوط به داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده به وسیله دتولدو و دفریتاس می‌باشد که در آن‌ها درزه‌ها تحت تنش قائم 1 مگاپاسکال بوده و با رس گاولت پر شده‌اند (DeToledo & DeFreitas, 1993). نتایج مقایسه با مدل در شکل ۶-۱۳ قابل مشاهده است.



شکل ۶-۱۰- مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط گودمن (۱۹۷۰) و محاسبه شده با مدل جدید

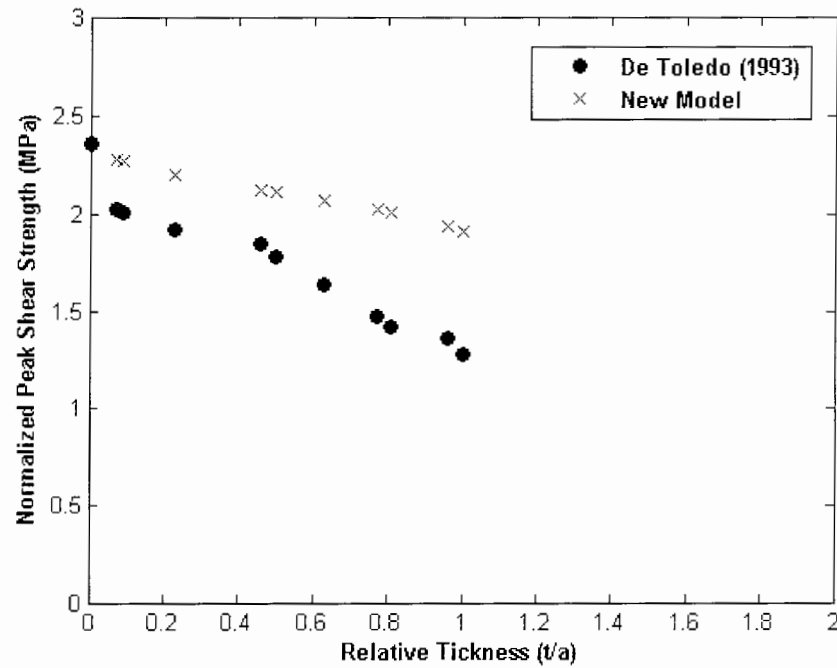


شکل ۶-۱۱- مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط لاما (۱۹۷۸) و محاسبه شده با مدل جدید



شکل ۶-۱۲- مقایسه سه سری از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط فین وج (۱۹۹۰) و محاسبه شده با مدل

جدید

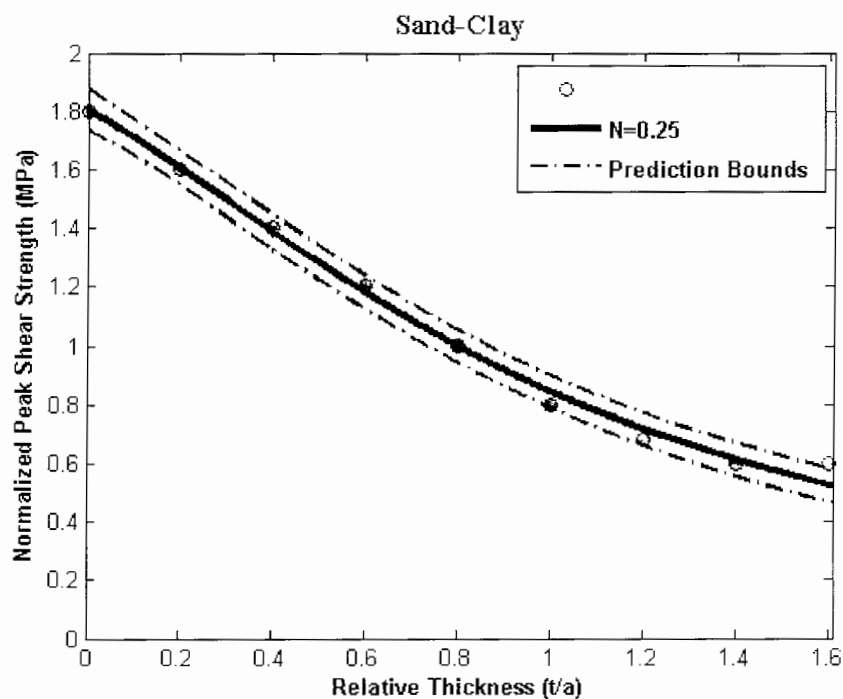


شکل ۶-۱۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط دتولدو و دفریتاس (۱۹۹۳) و محاسبه شده با مدل جدید پارامتر مجذور میانگین مربعات خطاها (RMSE) برای هر یک از مجموعه داده‌ها محاسبه گردید که در جدول ۶-۱۱ آورده شده است.

جدول ۶-۱۱- مقادیر RMSE مربوط به هریک از مقایسه‌ها و میانگین کل آن‌ها

RMSE	داده‌های منتشر شده
۰/۱۵۷۱	گودمن (۱۹۷۰)
۰/۲۱۲۰	لاما (۱۹۷۸)
۰/۲۶۷۶	فین وج (۱۹۹۰)
۰/۳۶۳۶	دتولدو و دفریتاس (۱۹۹۳)
۰/۲۵۰۱	میانگین تمام مقایسه‌ها

با کم کردن مقدار RMSE از یک، می توان درجه اطمینان^۱ مدل را به دست آورد (Papoulis, 1990) که در این مورد ۰/۷۴۹۹ می باشد. بدین ترتیب با اعتبارسنجی تجربی توسط چند سری از داده های منتشرشده، درجه اطمینان معیار ارائه شده ۰/۷۵ به دست می آید که عدد تقریباً قابل قبولی است. نمونه ای از محدوده پیش بینی^۲ معیار با درجه اطمینان ۰/۷۵ برای پرکننده ماسه-رسی تحت تنش قائم ۰/۲۵ مگاپاسکال در شکل ۶-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۴- نمونه ای از محدوده پیش بینی مدل ارائه شده برای پرکننده ماسه-رسی تحت تنش قائم ۰/۲۵ مگاپاسکال

در کل می توان گفت که معیار مقاومت برشی ارائه شده (معادله ۶-۹) می تواند با دقت نسبتاً بالایی رفتار آزمایشگاهی را پیش بینی کند و اگر بتوان زبری سطح درزه های طبیعی را تعیین نمود، از این

¹ Confidence Level

² Prediction Bounds

معادله می توان با اطمینان برای وضعیت صحرایی استفاده کرد.

امید آن می رود که در آینده با انجام آزمایش های بیشتر در شرایط گوناگون و همچنین اعتبارسنجی به روش های عددی^۱ و استفاده از نرم افزارهایی مانند 3DEC و UDEC، صحت مدل ارائه شده با دقت بیشتری سنجیده شود و در انتها معیار اصلاح شده ارائه گردد.

^۱ Numerical Methods

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- جمع‌بندی مطالب و نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر نیاز به ساخت سازه‌های سنگی و زیرزمینی نظیر تونل‌ها، پی سدها، نیروگاه‌های زیرزمینی و مغارهای احداث شده برای نگهداری نفت، گاز و زباله‌های هسته‌ای افزایش چشمگیری یافته است. از آنجایی که این قبیل سازه‌ها عمدتاً در توده‌های سنگی درزه و شکاف‌دار احداث می‌شوند، مشخصات مکانیکی توده‌سنگ می‌بایست به طور دقیق شناسایی گردد. وجود درزه‌ها می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر رفتار مکانیکی توده‌های سنگی تأثیرگذار باشد. در واقع مهم‌ترین عاملی که در توده‌سنگ باعث کاهش مقاومت و افزایش تغییرشکل پذیری می‌شود وجود درزه‌هاست. این عامل در شناخت و طبقه‌بندی توده‌سنگی اهمیتی بیشتر از مقاومت و خصوصیات سنگ سالم دارد، به طوری که در شناخت توده‌سنگ، ویژگی‌های گوناگون درزه‌ها از جمله زبری، امتداد، فاصله درزه‌ها از یکدیگر، نوع پرشدگی و رطوبت از موارد مهم در طبقه‌بندی به شمار می‌روند.

هندسه سطح یک درزه (زبری سطح درزه) از اهمیت بسزایی در رفتار برشی سنگ‌های درزه‌دار برخوردار است. این اهمیت به دلیل تأثیر فوق‌العاده زبری در به وجود آمدن اتساع یا جابجایی عمودی و به تبع آن در مقاومت ناپیوستگی طی جابجایی افقی می‌باشد. زبری سطح درزه هر سه پارامتر زاویه

اصطکاک، اتساع و مقاومت برشی حداکثر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شاید بتوان موثرترین عامل پس از زبری را حضور پرکننده‌ها در بین صفحات درزه‌ها عنوان کرد. وجود مصالح پرکننده نرم می‌تواند اثرات نامطلوبی بر مقاومت برشی و نیز سختی برشی درزه داشته باشد. مقایسه نسبت ضخامت پرشدگی به ارتفاع زبری سطح درزه، مشخص کننده این امر خواهد بود که آیا در حین برش تماس مستقیم بین دیواره‌های درزه برقرار خواهد شد یا خیر.

همان طور که در فصل اول نیز اشاره گردید، در گذشته مطالعات بسیاری بر روی بررسی تأثیر پرکننده‌ها و به منظور ارائه معیار مقاومت برشی درزه‌های پر شده انجام شده است. ولی بر اساس بررسی سوابق انجام شده، در هیچ یک از این تحقیقات، داده‌های آزمایشگاهی به منظور ارائه معیار، به صورت دقیق تحلیل نشده و معیار ارائه شده تنها با توجه به روند نسبی تغییرات مقاومت درزه‌ها ارائه شده است. بنابراین نیاز به انجام یک تحقیق مستقل بر روی درزه‌های سنگی که به ارائه یک مدل نسبتاً جامع منتهی شود، احساس می‌شود.

به منظور بررسی تأثیر توام پرکننده‌ها و زبری سطوح درزه‌ها بر مقاومت برشی سنگ‌ها، تحقیق اخیر در مسیری هدایت شد که بتوان با یک کار گسترده آزمایشگاهی و ایجاد یک جامعه آماری از نمونه‌های سنگی با زبری طبیعی، به نهایی‌ترین هدف پروژه که همان پیشنهاد معیاری کاربردی بود، رسید. برای این منظور در ابتدا چند منطقه به عنوان مناطق مورد نظر اولیه انتخاب شده و پس از انجام مشاهدات و بازدیدهای صحرائی از این مناطق، شیب‌های سنگی واقع در جاده خوش‌بیلاق به عنوان منطقه نمونه‌برداری اصلی انتخاب شد. سپس نمونه‌برداری با تعداد بالا از این منطقه انجام گردید. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و درآوردن آن‌ها به ابعاد مورد نظر، مطالعات آزمایشگاهی شروع شد.

در این مرحله، ابتدا برای تمام نمونه‌ها ضریب زبری سطح درزه محاسبه شد. برای این منظور از آزمایش کجی و سختی اشمیت استفاده گردید. این آزمایش‌ها به تعداد زیاد انجام شد تا دقت در محاسبه ضریب زبری درزه بالا باشد. سپس نمونه‌هایی که از نظر میزان ضریب زبری در یک محدوده خاص قرار می‌گرفتند، انتخاب شده و بقیه نمونه‌ها حذف شدند.

خاک پرکننده درزه‌ها نیز از خود منطقه نمونه‌برداری برداشت شد. خاک مذکور به سه قسمت مجزا (از روی دانه‌بندی و با توجه به مش موردنیاز) که شامل ماسه (ابعاد $0/06$ تا 2 میلی‌متر)، رس (ابعاد کمتر از $0/06$ میلی‌متر) و مخلوط ماسه و رس (طبیعی) بود، تقسیم شد. سپس مقاومت برشی هر سه قسمت جداگانه به دست آمد. پس از اضافه کردن مواد پرکننده با ضخامت‌های مختلف به سطوح درزه‌های مورد نظر، نمونه‌ها در جعبه برش قرار گرفته و تحت بارهای عمودی مختلف آزمایش شدند. به منظور تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت برشی، نمودارهای مقاومت برشی-جابجائی برشی و مقاومت برشی-تنش عمودی رسم شدند. بدین ترتیب با بررسی این نمودارها تأثیر توأم پرکننده و زبری سطح درزه بر مقاومت نهایی آن مطالعه گردید. نتایج اولیه نشان داد که مقاومت برشی درزه‌ها با افزودن لایه بسیار نازکی از پرکننده (به ضخامت $0/5$ میلی‌متر) به میزان زیادی افت می‌کند. همچنین مشخص شد که مقاومت برشی درزه‌ها در نسبت‌های t/a مختلفی بسته به اینکه ماده پرکننده رس، ماسه یا مخلوط این دو است با مقاومت ماده پرکننده برابر می‌شود. ضخامت نسبی $1/6$ نیز به عنوان ضخامت بحرانی پرکننده تعیین شد، چرا که وقتی نسبت t/a به این مقدار نزدیک می‌شد، تغییرات تنش برشی ناچیز می‌گردید. بدین معنی که وقتی نسبت t/a کمتر از $1/6$ بود، هر دو

عامل زبری سطح درزه و ضخامت پرکننده رفتار برشی را کنترل می‌کرد، اما وقتی این نسبت از مقدار بحرانی بیشتر می‌شد، رفتار برشی فقط در کنترل ماده پرکننده بود.

در مرحله بعد کارهای آماری بر روی داده‌های آزمایشگاهی انجام گردید تا پروژه به هدف نهایی خود نزدیک‌تر گردد. برای این منظور از پارامترهای آماری تعیین کننده در برازش منحنی‌های توابع ریاضی گوناگون بر داده‌ها استفاده شد. این پارامترها با یکدیگر مقایسه شده و بهترین برازش‌ها بر داده‌ها به دست آمدند. سپس با در نظر گرفتن کمترین خطاهای آماری و بیشترین همبستگی‌ها، بهترین تابع ریاضی که همان تابع گویا با صورت ثابت و مخرج با درجه دوم بود، انتخاب شد. با وارد کردن سایر پارامترها در تابع مذکور و تصحیح آن بر روی نمودارها، معیار جدید پیش‌بینی مقاومت برشی درزه‌های پرشده معرفی گردید. سپس اعتبارسنجی تجربی بر روی مدل انجام گردید، بدین صورت که داده‌های منتشر شده قبلی که در شرایط نسبتاً مشابه به دست آمده بودند، وارد مدل شده و نتایج مقایسه گردید. از بررسی‌های اولیه چنین نتیجه‌گیری شد که مدل پیشنهادی تا حد بسیاری (با درجه اطمینان ۷۵٪) قادر است با در اختیار بودن اطلاعات مربوط به زبری سطح درزه، رفتار برشی درزه پرشده در شرایط بارگذاری سطحی را پیش‌بینی نماید. بنابراین هدف نهایی تحقیق نیز به این صورت ارضاء گردید.

در انتهای این بخش، نوآوری‌های تحقیق انجام شده به صورت خلاصه مرور می‌شوند:

✓ برای اولین بار از درزه‌های طبیعی و برداشت شده از صحرا برای مشاهده رفتار برشی درزه‌های پرشده استفاده شد.

✓ به منظور تعیین زبری سطح درزه‌ها در تمامی نمونه‌ها از پارامترهای زاویه اصطکاک پایه و

مقاومت فشاری دیواره درزه‌ها استفاده شد (آزمایش کجی) تا بدین ترتیب مهم‌ترین

پارامترهای دخیل در رفتار ناهمواری‌ها در حین برش در نظر گرفته شده باشند.

✓ مواد پرکننده که از صحرا جمع‌آوری شده بودند، با ضخامت‌های مختلف آزمایش شدند تا

نسبت بحرانی مناسب که به خوبی نشان‌دهنده وضعیت‌های صحرائی است، تعیین شود.

✓ به دلیل تعداد بالای داده آزمایشگاهی، استفاده از این داده‌ها به منظور ارائه معیار تجربی

مناسب تشخیص داده شد و به این ترتیب یک معیار قوی برای پیش‌بینی و تخمین مقاومت

درزه‌های پر شده به دست آمد.

۷-۲- پیشنهادات

با وجود این که سعی گردید در این تحقیق با صرف زمان و هزینه کافی برای پروژه و

سازماندهی منظم مراحل انجام آن، درستی و اعتبار نتایج به دست آمده در بالاترین حد ممکن بوده

باشد، ولی با این حال در هیچ تحقیقی نمی‌توان تمام عوامل موثر را در نظر گرفته و جامع‌ترین کار

ممکن را ارائه داد.

با توجه به پارامترهایی که در طول انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته نشد و همچنین کارهایی که

می‌توان برای معتبرتر کردن نتایج انجام داد، موارد زیر به عنوان پیشنهادات آتی توصیه می‌شوند:

✓ انجام آزمایش‌ها به همین روش با استفاده از دستگاه برش بزرگ مقیاس^۱

همان طور که قبلاً اشاره شد، توسط کارهای آزمایشگاهی که در گذشته انجام شده است، ثابت

^۱ Large Scale Shear Box

شده که مقیاس نمونه تأثیری در نتایج مقاومت برشی درزه‌های پر شده نخواهد داشت. با این حال در مورد درزه‌های خالی نمی‌توان از تأثیر کاهش مقاومت در اثر افزایش اندازه نمونه چشم‌پوشی کرد. چون معیار ارائه شده، برای درزه‌های خالی تأثیر اندازه نمونه را در نظر نمی‌گیرد، پیشنهاد می‌شود که در آینده در آزمایش‌های انجام شده این تأثیر وارد شده و بر همین اساس در مدل تجدید نظر به عمل آید. اما برای تعیین مقاومت برشی درزه‌های پر شده همچنان می‌توان معیار ارائه شده را بدون اصلاح به کار برد.

✓ در نظر گرفتن ریزترک‌ها^۱

با وجود این که به عقیده برخی، وجود ریزترک از خصوصیات ذاتی سنگ است، ولی به دلیل تأثیر در مقاومت نهایی، در نظر گرفتن تعداد ریزترک‌ها در هر نمونه و تأثیر دادن عدد آن در نتایج می‌تواند در افزایش دقت موثر باشد.

✓ کار بیشتر بر روی دانه‌بندی مواد پرکننده

با وجود مطالعات اولیه انجام شده در گذشته بر روی تأثیر دانه‌بندی ذرات پرکننده بر مقاومت درزه‌ها و همچنین اعمال این مطالعات در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان این کار را با دقت بیشتری انجام داد و تأثیر دانه‌بندی‌های مختلف در نتایج را مورد بررسی قرار داد.

✓ اعتبارسنجی معیار ارائه شده به وسیله روش‌های عددی

به منظور اعتبارسنجی کامل مدل و اصلاح آن می‌توان از روش‌های عددی و برخی نرم‌افزارهای

^۱ Microcracks

کامپیوتری استفاده نمود. در آینده امید آن می‌رود که با نوشتن تعدادی برنامه کامپیوتری و افزودن آن به روند محاسباتی UDEC و 3DEC، این نرم‌افزارها بتوانند نقش زبری‌های نامنظم، تأثیرات پرکننده‌ها، اثر مقیاس و نیز فشار منفذی آب داخل درزه را نیز در نظر بگیرند.

✓ انجام آنالیز حساسیت^۱ بر روی معیار ارائه شده

برای آگاهی از تأثیر هر یک از عوامل بر روی جواب‌های به دست آمده توسط معیار مذکور، می‌توان آنالیز حساسیت بر روی آن انجام داد. برای این منظور بایستی هر یک از عوامل موثر به صورت جداگانه و بدون در نظر گرفتن سایر عوامل تغییر داده شوند تا تأثیر آن‌ها بر روی جواب‌ها سنجیده شود. بدین ترتیب می‌توان حساسیت مدل را نسبت به تک تک عوامل به دست آورد که آگاهی از چنین پارامترهایی به میزان اعتماد به تخمین مدل کمک بسیاری می‌نماید.

^۱ Sensitivity Analysis

فهرست منابع

فهرست منابع فارسی:

اداره کل آمار و فناوری اطلاعات، (۱۳۸۵-۱۳۷۵). *سالنامه آماری هواشناسی*. ناشر سازمان هواشناسی کشور.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰. *نقشه زمین‌شناسی منطقه خوش‌بیلاق*.

فهمی‌فر، احمد، سروش، حامد. ۱۳۸۰. *آزمایش‌های مکانیک سنگ؛ مبانی نظری و استانداردها، جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی*. شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، تهران.

مؤسسه جغرافیایی ایران، ۱۳۸۰. *اطلس راه‌های ایران*. مؤسسه جغرافیایی، کارتوگرافی و گیتاشناسی.

فهرست منابع انگلیسی:

Bandis, S. C. 1990. *Scale Effects in the Strength and Deformability of Rocks and Rock Joints*. Proc. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, Leon, Norway. Balkema Publishers, Rotterdam. pp. 59-76.

Barla, G., Forlati, F., Zaninetti, A. 1985. *Shear Behaviour of Filled Discontinuities*. Proc. Int. Symp. on Fundamentals of Rock Joints. Bjorkliden. 163-172.

Barton, N., Bandis, S. 1990. *Review of Predictive Capabilities of JRC-JCS Model in Engineering Practice*. In: Barton N., Stephansson O., editors. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway. Rotterdam: Balkema. pp. 603-10.

Barton, N. 1987. *Predicting the Behavior of Underground Openings in Rock*. 4th Manuel Rocha Memorial Lecture, Lisbon. Oslo: Norwegian Geotech. Inst.

Barton, N. R., Bandis, S. C., 1982. *Effects of Block Size on the Shear Behavior of Jointed Rock*. 23rd U.S. Symp. on Rock Mechanics, Berkeley, pp. 739-760.

Barton N, Choubey V. 1977. *The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice*, Rock. Mech.; Vol. 10(1-2) pp. 1-54.

Barton, N. 1976. *The Shear Strength of Rock and Rock Joints*. International Journal of Rock Mechanics and Mineralogical Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol 13. p. 1.

Barton, N. 1974. *Review of Shear Strength of Filled Discontinuities in Rock*. Publication No. 105. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, 38 pages.

Barton, N. 1973. *Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints*. Engineering geology. Vol. 7, pp. 287-332.

- Bernaix, J. 1967. *New Laboratory Methods of Studying the Mechanical Properties of Rock*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 6, pp. 43-90.
- Blejwas, T. E., Hansen, F. D. 1990. *Scale Effects in the Shear Behavior of Joints in Welded Tuff*. Proc. Int. Symp. on Rock Joints. Barton & Stephansson (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 185-198.
- Brady, B. H. G., Brown, E. T. 1993. *Rock Mechanics for Underground Mining*. Second Edition. London, Chapman & Hall.
- Cheng, F., Haberfield, C. M., Seidel, J. P. 1996. *Laboratory Study of Bonding and Wall Smear in Rock Socketed Piles*. Proc. 7th ANZ Conf. on Geomechanics, Adelaide. pp. 69-74.
- Clark, J. I., Mayerhof, G. G. 1972. *The Behavior of Piles Driven in Clay. An Investigation of Soil Stress and Pore Pressure as Related to Soil Properties*. Can. Geotech. J. Vol. 9, pp. 351-373.
- Coulson, J. H. 1970. *Shear Strength of Flat Surfaces in Rock: Stability of Rock Slopes*. In: Cording E. J., editor. Proceedings of the 13th US. symposium on rock mechanics, Urbana, IL. New York: ASCE, pp. 77-105.
- DeToledo, P. E. C., DeFreitas, M. H. 1995. *The peak shear strength of filled joints. Fractured and Jointed Rock Masses*. (eds. Myer, Cook, Goodman & Tsang), Balkema (Rotterdam), pp. 385-391.
- DeToledo, P.E.C., DeFreitas, M. H. 1993. *Laboratory Testing and Parameters Controlling the Shear Strength of Filled Rock Joints*. Géotechnique. Vol. 43. No 1. pp. 1-19.
- Deere, D. U., Miller, R. P. 1966. *Engineering Classification and Index Properties of Rock*. Air Force Weapons Laboratory. Technical Report No. AFNL-TR-65-116. p. 300. Albuquerque, NM.
- Deng D., Simon R., Aubertin M. 2006. *Modelling Shear and Normal Behavior of Filled Rock Joints*. Preocceedings of International Geo Congress, ASCE. pp. 1-6.
- Ehrle, H. 1990. *Model Material for Shear Tests of Filled Joints*. Mechanics of Jointed and Faulted Rock (ed. Rossmannith). Balkema (Rotterdam). pp. 37 1-374.
- Eurenius, J., Fagerstrom, H. 1969. *Sampling and Testing of Soft Rock with Weak Layers*. Géotechnique. Vol. 19. No. 1. pp. 133-139.
- Franklin, J. A., Dusseault, M. B., 1989. *Rock Engineering*, McGraw-Hill Publishing Company, Printed in the U.S.A. Vol. 2.
- Giuseppe, B. 1970. *The Shear Strength of Some Rocks by Laboratory Tests*. Proc. 2nd Cong. ISRM, Belgrade, Vol.2, pp. 3-24.

- Goodman, R. E. 1976. *Methods in Geological Engineering in Discontinuous Rock*. West Publishing Company, St Paul. 472p.
- Goodman, R. E. 1970. *The Deformability of Joint; Determination of the In-situ Modulus of Rocks*. ASTM Special Tech. Publ., No.477, pp.174-196.
- Grasselli, G. 2001. *Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description*. Ph.D. Thesis, University of Parma, Italy. 124 pages.
- Haramy, K. Y., DeMarco, M. J. 1985. *Use of the Schmidt Hammer for Rock and Coal Testing*. Proceedings of 26th US. Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, SD. pp. 549-555.
- Hencher, S. R., Richards, L. R. 1989. *Laboratory direct shear testing of rock discontinuities*. Ground Eng; 22. pp. 24–31.
- Hoek E. 2000. *Practical Rock Engineering*. Chapter 4, <http://www.rocscience.com>
- Hoek, E., Bray, J. W. 1981. *Rock Slope Engineering*. 3rd edition. London: Institution of Mining and Metallurgy. 358 pages.
- Hoek, E., Brown, E. T. 1980. *Underground Excavations in Rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London. 527 pages.
- Hudson. J. A., Harrison. J. P. 1997. *Engineering Rock Mechanics; an Introduction to the Principles*. Elsevier Science Ltd. Oxford. UK. 444 pages.
- Indraratna, B., Haque, A., Aziz, N. 1999. *Shear Behaviour of Idealised joints under Constant Normal Stiffness*. Géotechnique, Vol. 49. No.3. pp. 331-355.
- Indraratna, B., Haque, A. 2000. *Shear Behaviour of Rock Joints*. Balkema (Rotterdam), 164 pages.
- Indraratna, B., Welideniya, H. S. 2003. *Shear Behaviour of Graphite Infilled Joints Based on Constant Normal Stiffness (CNS) Test Conditions*. Proc. of 10th Int. Cong. Soc. Rock Mech. Technology roadmap for rock mechanics, Johannesburg, Vol. 1, pp. 569-574.
- Infanti, N., Kanji, M. A. 1978. *In-Situ Shear Strength, Normal and Shear Stiffness Determinations at Agua Vermelha Project*. Proc. Int. Congress of IAEG, Buenos Aires, pp. 371-373.
- ISRM, In: Brown, E .T., editor. 1981. *Rock Characterization Testing and Monitoring ISRM Suggested Methods*. Oxford: Pergamon Press. p. 211.
- ISRM, 1979. *Suggested Methods for Determining In Situ Deformability of Rock*. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr; 16(3) pp.195–214.

- ISRM, 1978. *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. & Geomech. Abstr; 15(6) pp. 319–68.
- Jeager, C. 1979. *Rock Mechanics and Engineering*. Cambridge University Press. Cambridge. 417 pages.
- Jeager, J. C., Cook, N. G. W. 1979. *Fundamental of Rock Mechanics*. Third Edition. Chapman-Hall, London.
- Kanji, M. A. 1974. *Unconventional Laboratory Tests for the Determination of the Shear Strength of Soil-Rock Contacts*. Proc. 3rd Int. Cong. Soc. Rock Mech. Denver. Vol. 2. pp. 241-247.
- Kutter, H. K, Rautenberg, A. 1979. *The Residual Shear Strength of Filled Joints in Rock*. Proc. 4th Int. Cong. Rock Mech. Montreux. Vol. 1. pp. 221-227.
- Ladanyi, B., Archambault, G. 1977. *Shear Strength and Deformability of Filled Indented Joints*. Proc. 1st Int. Symp. Geotechnics of Structurally Complex Formations, Capri. pp. 317-326.
- Ladanyi, B, Archambault, G. 1970. *Simulation of Shear Behaviour of a Jointed Rock Mass*. In: Somerton W. H., editor. *Rock mechanics; theory and practice*. Proc 11th Symp. on Rock Mechanics, American Institute of Mining and Metallurgy, New York. pp. 105–125.
- Lama, R. D. 1978. *Influence of Clay Fillings on Shear Behavior of Joints*. Proc. 3rd Int. Cong. Assoc. Eng. Geol., Madrid. Vol. 2, pp. 27-34.
- Lee, Y. H., Carr, J. R., Barr, D. J., Haas, C. J. 1990. *The Fractal Dimension as a Measure of the Roughness of Rock Discontinuity Profile*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr; Vol. 27. pp. 453, 464.
- Mandelbrot, B. B. 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, New York. 468 pages.
- Morris, J. P. 2003. *Review of Rock Joint Models*. U.S. Department of Energy, Report No. UCRL-ID-153650.
- Nagy, M. 2007. *Influence of Pore Pressure on the Shear Behaviour of Infilled Rock Joints*. Unpublished Ph.D. Thesis., University of Wollongong, NSW. Australia.
- Nieto, A. S. 1974. *Experimental Study of the Shear Stress-Strain Behaviour of Clay Seams in Rock Masses*. Ph.D. Thesis, University of Illinois, USA.
- Papaliangas, T., Lumsden, A. C., Hencher, S. R., Manolopoulou, S. 1990. *Shear Strength of Modelled Filled Rock Joints*. Rock Joints (Barton & Stephansson eds.). Balkema (Rotterdam). pp. 275-282.

- Papaliangas, T., Hencher, S. R., Lumsden, A. C., Manolopoulou, S. 1993. *The Effect of Frictional Fill Thickness on the Shear Strength of Rock Discontinuities*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No. 2. pp. 81-91.
- Papoulis, J. 1990. *Probability and Statistics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Patton, F. D. 1966. *Multiple Modes of Shear Failure in Rock*. Proceedings of the First International Congress on Rock Mech., ISRM, Lisbon, Vol. 1. p. 509.
- Pereira, J. P. 1997. *Rolling Friction and Shear Behavior of Rock Discontinuities Filled with Sand*. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 34. 3-4. Paper No. 244.
- Pereira, P. J. 1990a. *Shear Strength of Filled Discontinuities*. Proceedings of the International Conference on Rock Joints (eds. Barton & Stephansson). Balkema (Rotterdam), pp. 283-287.
- Pereira, P. J. 1990b. *Mechanics of Filled Discontinuities*. In Mechanics of Jointed and Faulted Rock (ed. Rossmannith). Balkema (Rotterdam). pp. 375-380.
- Phien-wej, N., Shrestha, U. B., Rantucci, G. 1990. *Effect of Infill Thickness on Shear Behavior of Rock Joints*. Rock Joints, Proc. Int. Conf. on Rock Joints, Loen (eds. N. R. Barton & O. Stephansson). Balkema. (Rotterdam), pp. 289-294.
- Romero, S. V. 1968. *In Situ Direct Shear on Irregular-Surface Joints Filled with Clayey Material*. ISRM Rock Mech. Symp., Madrid.1:189-94.
- Saeb, S., Amadei, B. 1992. *Modelling Rock Joints under Shear and Normal Loading*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 29, No.3, pp. 267-278.
- Salas, I. A. J. 1968. *Mechanical Resistances*. Proc. Int. Symp. on Rock Mechanics, Madrid, Theme II, pp. 115-130.
- Schnitter, N. J., Schneider, T.R. 1970. *Abutment Stability Investigations for Emossen Arch Dam*. In: Proceedings of the 10th International Congress on Large Dams, Montreal, vol. 2; pp. 69-87.
- Selvadurai, A. P. S., Yu Q. 2005. *Mechanics of a discontinuity in a geomaterial*. Computers and Geotechnics., 32. pp. 92-106.
- Sun, Z. 1981. *Fracture Mechanics and Tribology of Rocks and Rock Joints*. Doctoral thesis:22D. Lulea University of Technology.
- Tulinov, R., Molokov, L. 1971. *Role of Joint Filling Material in Shear Strength of Rocks*. ISRM Symp., Nancy, Paper II-1-II-24.
- Tse, R., Cruden, D. M. 1979. *Estimating Joint Roughness Coefficient*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Absrr., 16., pp. 303-307.

Van Sint Jan, M. L. 1990. *Shear Tests of Model Rock Joints under Stiff Normal Loading*. Rock Joints (Barton & Stephansson eds.), Balkema. (Rotterdam), pp. 323-327.

Wanhe, S., Tiemin, Z., Mingying, L. 1981. *The Mechanical Effect of the Thickness of the Weak Intercalary Layers*. Proc. Int. Symp. on Weak Rock, Tokyo , pp. 49-54.

Welideniya, H. S., 2005. *Laboratory Evaluation and Modelling of Shear Strength of Infilled Joints under Constant Normal Stiffness (CNS) Conditions*. Ph.D. Thesis. Uinv. of Wollongong. NSW. Australia. 285 pages.

Wittke, W. 1990. *Rock Mechanics- Theory and Applications with Case Histories*, Springer-Verlag, Berlin.

Xu, S. 1989. *The Relationship between Stress and Displacement for Rock Surfaces in Shear*. Ph.D. Thesis, University of London.

Zare Naghadehi, M., Torabi, S. R., KhaloKakaie, R. 2007. *Studying the Effect of Mechanical Properties of Discontinuities on the Slope Stability in Part of Angouran Open Pit Mine, IRAN*. Proceedings of the 7th International Scientific Conference SGEM. Bulgaria. p. 58.

پیوست الف

خلاصه‌ای از روش‌های تعیین ضریب زبری سطح درزه

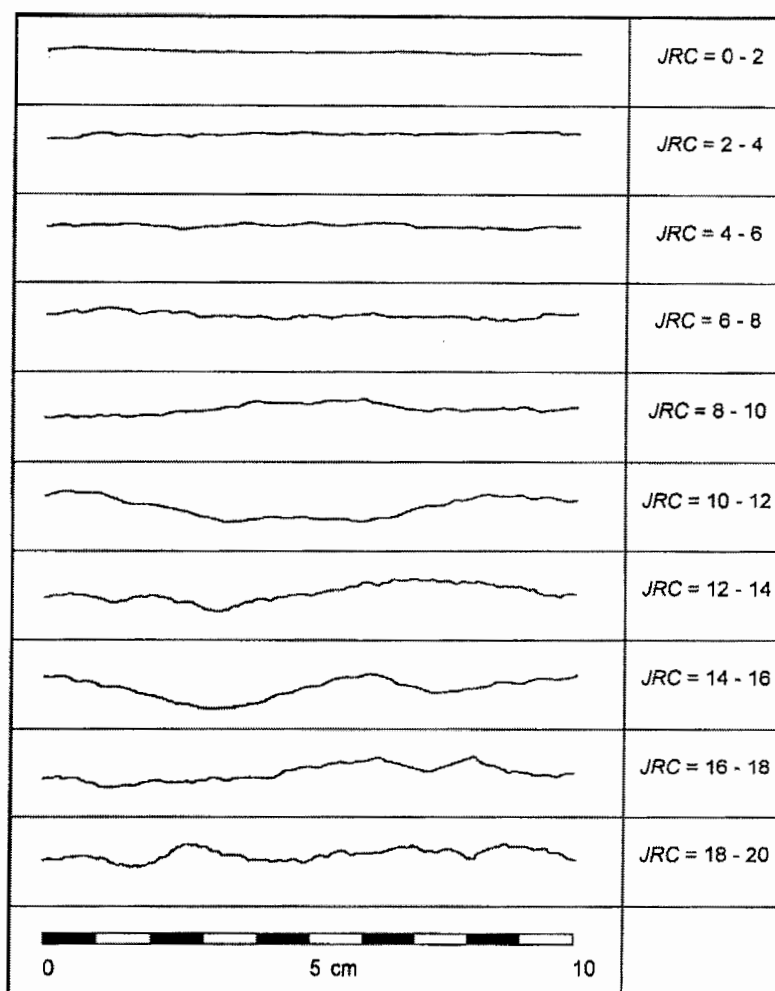
الف-۱- تعیین JRC با استفاده از مدل‌های استاندارد

بارتون و کوبی برای تعیین ناهمواری درزه‌ها در سال ۱۹۷۷، مجموعه استانداردی ارائه کردند که در هر مورد با مقایسه وضعیت ناپیوستگی موجود با این مدل‌های استاندارد می‌توان ضریب JRC را تخمین زد (Barton & Choubey, 1977). این مجموعه در جدول الف-۱ نشان داده شده است (همان طور که از جدول الف-۱ مشخص است با داشتن J_r در سیستم Q می‌توان مقدار JRC را تعیین نمود). مدل استاندارد اصلی بارتون در شکل الف-۱ ارائه شده است.

سطح ظاهری یک ناپیوستگی، از طریق مشاهدات چشمی دقیق با پروفیل نشان داده شده مقایسه گردیده و سپس مقدار JRC که از لحاظ شکل ظاهری، معادل و مشابه به آن است، انتخاب می‌شود. در مورد نمونه‌های آزمایشگاهی کوچک مقیاس، مقیاس زبری سطح ناپیوستگی‌ها تقریباً همان مقیاسی خواهد بود که در پروفیل‌های استاندارد نشان داده شده است. به هر حال در صحرا، طول سطح اندازه‌گیری ممکن است چند متر و یا حتی ده‌ها متر بوده باشد. در این گونه موارد، مقدار JRC بایستی با در نظر گرفتن مقیاس کامل سطح و همچنین تغییرات آن برگزیده شود.

جدول الف-۱- رابطه بین J_r و JRC برای نمونه‌های ۲۰۰ میلی‌متری و ۱۰۰۰ میلی‌متری (Barton & Choubey, 1977)

نیمرخ	شرح	J_r	JRC (200 mm)	JRC (1 m)
پله‌ای	زبر	۴	۲۰	۱۱
	نرم	۳	۱۴	۹
	سطح گسل	۲	۱۱	۸
موج‌دار	زبر	۳	۱۴	۹
	نرم	۲	۱۱	۸
	سطح گسل	۱/۵	۷	۶
صفحه‌ای	زبر	۱/۵	۲/۵	۲/۳
	نرم	۱/۰	۱/۵	۰/۹
	سطح گسل	۰/۵	۰/۵	۰/۴

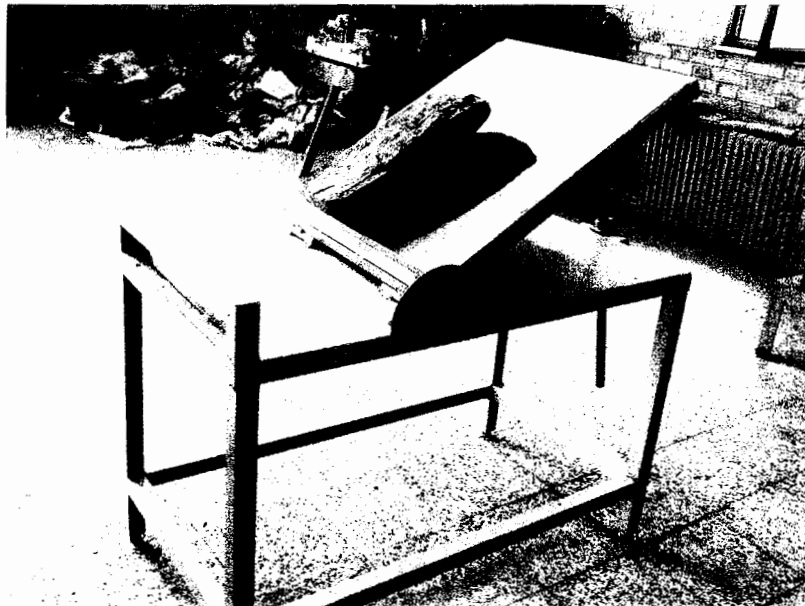


شکل الف-۱- پروفیل زبری و مقادیر JRC مربوط به آن (Barton & Choubey, 1977)

الف-۲- تعیین JRC با استفاده از سطح شیب‌دار (Tilt Test)

بارتون و بندیس در سال ۱۹۹۰ روش دیگری را نیز برای تعیین ضریب JRC پیشنهاد کردند. در این روش، دو سطح با ناهمواری مورد نظر را روی هم قرار می‌دهند و آن‌ها را کج می‌کنند تا سطح رویی بلغزد (شکل الف-۲). با توجه به زاویه تمایل α (زاویه سطح شیب‌دار) و زاویه اصطکاک باقیمانده ϕ_r ، ضریب JRC از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Barton & Bandis, 1990):

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\text{Log} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)} \quad (\text{الف-۱})$$



شکل الف-۲- تعیین JRC با استفاده از سطح شیب‌دار

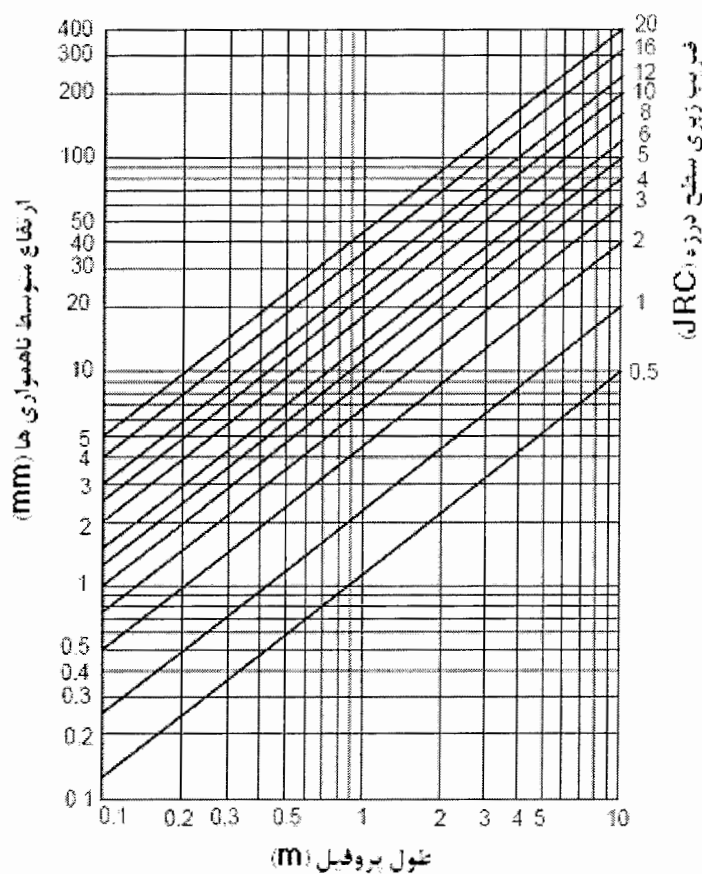
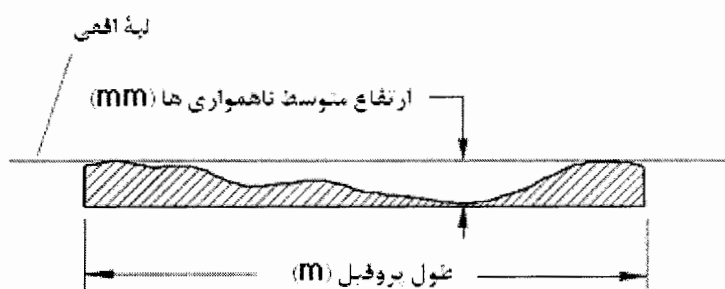
برای نمونه‌های کوچک، تنش عمودی σ_n می‌تواند کمتر از ۰/۰۰۱ مگاپاسکال باشد. مثلاً برای حالتی که زاویه شیب $\alpha = 65$ ، زاویه اصطکاک پایه $\phi_b = 30$ درجه و مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS) برابر با ۱۰۰ مگاپاسکال است، مقدار $JRC = 7$ به دست می‌آید.

الف-۳- تعیین JRC در صحرا

روش دیگر ارزیابی مقدار JRC، استفاده از تخته تراز می‌باشد. در این روش با معلوم بودن طول

پروفیل و دامنه نوسان ناهمواری‌ها، مقدار JRC تعیین می‌شود (شکل الف-۳) (Barton & Bandis,)

(1982).



شکل الف-۳- تعیین مقدار JRC در صحرا (Barton & Bandis, 1982)

الف-۴- تعیین JRC با استفاده از Z_2

تس^۱ و کرادن^۲ یک ارتباط آماری تجربی میان JRC و Z_2 (ریشه متوسط مربع مشتق اول

پروفیل) به دست آوردند (با ضریب همبستگی $R=0.986$) (Tse & Cruden, 1979):

$$JRC = 32.2 + 32.47 \text{Log} Z_2 \quad (\text{الف-۲})$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{m(\Delta x)^2} \sum_{i=0}^m (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{الف-۳})$$

که در آن m تعداد نمونه‌گیری، Δx فاصله نمونه‌گیری‌ها و y_i و y_{i+1} ارتفاع دو نقطه مجاور هم می‌باشد.

مقدار Z_2 به فاصله نمونه‌گیری برای تخمین JRC حساس است و باید تا حد امکان فاصله نمونه‌گیری را کوچک در نظر گرفت تا دقت محاسبه JRC افزایش یابد.

رابطه‌ای بین JRC و تابع ساختاری (SF^3) به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$$JRC = 37.28 + 16.5847 \text{Log} SF \quad (\text{الف-۴})$$

که $SF = (Z_2)^2$ می‌باشد. معادله الف-۲ نسبت به معادله الف-۴ مشهورتر است و کاربرد بیشتری دارد.

با پیشرفت‌های حاصل شده در آنالیز تصویر، استفاده از روش فوق ارزش بسیاری یافته است. برای به

دست آوردن رابطه الف-۲، ۱۰ پروفیل استاندارد JRC به طول ۱۰ cm را ۲/۵ مرتبه در جهت x و y

بزرگ کرده، هندسه پروفیل به دوپست نقطه مجزا با $\Delta x = 1/27 \text{mm}$ تقسیم می‌شود و آنالیز انجام

می‌گیرد (Tse & Cruden, 1979).

¹ Tse

² Cruden

³ Structure Function

الف-۵- استفاده از هندسه فرکتال در تعیین زبری درزه

با معرفی هندسه فرکتال به وسیله ماندلبروت^۱ (Mandelbrot, 1982)، محققان زیادی مفهوم بعد فرکتال را برای درزه سنگ به کار بردند. آن‌ها تلاش کردند به وسیله بعد فرکتال مقدار JRC را مشخص کنند. همبستگی خوبی میان JRC و بعد فرکتال بدست آمد، بدین ترتیب که هر چه JRC افزایش می‌یافت، بعد فرکتال نیز بزرگ‌تر می‌شد. روش‌های مختلفی وجود دارد که با آن‌ها بعد فرکتال ناپیوستگی‌ها محاسبه می‌شود (Lee et al, 1982):

- روش تقسیم‌کننده اصلاح شده
- روش ریشه متوسط مربع (RMS^2)
- روش وریوگرام
- روش پنجره میانگین ریز زاویه (WAM^3)

هر یک از این روش‌ها دقت مخصوص به خود را داشته و با توجه به شرایط مورد استفاده قرار می‌گیرند.

¹ Mandelbrot

² Root Mean Square

³ Window Average Microangle

Abstract

Nearly all of the rocks excluding ones at deep areas naturally have some joints and discontinuities. The related parameters of these joints such as existing of infill material, plurality, form of distribution and the strength of contact areas of walls, control their mechanical behavior. Among these parameters, the effect of strength reduction of infill material is very outstanding. Almost, the cause of failure of rocks is shearing; therefore, the shear strength of rocks is considered as the main strength criterion.

In this research, the parallel influence of infill materials and joint surface roughness on the shear strength of natural rock joints has been experimentally studied. For this purpose, after preliminary surveys, rock slopes of Shahrood-Azadshahr connecting road was selected as the sampling region. After rock-soil sampling and transferring to the rock mechanics laboratory, great numbers of shear tests were performed on the specimens under various normal load and infill material conditions. Finally, after statistical analysis of the results and using fitting of multiple curves on the experimental data, a new empirical criterion was proposed for the prediction of behavior and the estimation of shear strength of filled joints. The accuracy and precision of this criterion was partly approved by empirical validation. Preliminary studies demonstrate that the proposed criterion would be able to predict the shear behavior of infilled rock joints under surface loading conditions, if the joint roughness data are available.

Keywords: *Jointed Rocks, Shear Strength, Infill Material, Joint Surface Roughness, Empirical Criterion.*