

تأثیر ناهمسانگردی بر روی مقاومت و الگوهای گسیختگی اسلیت‌های منطقه بروجرد در آزمایش برزیلی

شکوفه جمشیدوند^۱، رضا زارعی‌سهامیه^{۲*}، یاسین عبدی^۳، احمد احمدی‌خلجی^۴ و امین جمشیدی^۵

۱، ۲، ۳، ۴ و ۵- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

نویسنده مسئول: zareisah@yahoo.com*

دریافت: ۹۷/۷/۱۸ پذیرش: ۹۷/۱۰/۵

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی تأثیر ناهمسانگردی بر روی رفتار مقاومتی و الگوهای گسیختگی اسلیت‌های منطقه بروجرد در آزمایش برزیلی می‌باشد. به این منظور تعداد ۶ بلوک از نقاط مختلف واقع در شمال و شرق بروجرد انتخاب شده است. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها و ارزیابی خصوصیات سنگ‌شناسی و فیزیکی آن‌ها، آزمایش مقاومت کششی برزیلی در ۷ زاویه ناهمسانگردی (زاویه بین جهت بارگذاری و سطح ناهمسانگردی) شامل صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه بر روی نمونه‌های دیسکی شکل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای تمامی نمونه‌ها، حداکثر مقاومت کششی برزیلی در زاویه ۹۰ درجه حاصل شده است. در حالی که کمترین مقاومت کششی در زوایای ۱۵ و ۳۰ درجه مشاهده شده است. هم‌چنین شاخص ناهمسانگردی برزیلی برای تمامی نمونه‌ها تعیین شده است. مشاهده الگوهای گسیختگی نمونه‌ها بعد از آزمایش برزیلی حاکی از وجود سه نوع گسیختگی غالب در جهت ناهمسانگردی (PA)، در عرض ناهمسانگردی (AA) و شکستگی منحنی شکل (CF) می‌باشد. هم‌چنین زاویه انتقال تغییر نوع گسیختگی غالب از شکستگی در جهت ناهمسانگردی به شکستگی در عرض ناهمسانگردی برای نمونه‌های مورد مطالعه تعیین شده است. در نهایت، ارتباط بین طول شکستگی‌ها و مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: ناهمسانگردی، مقاومت کششی برزیلی، الگوی گسیختگی، اسلیت، بروجرد

مقدمه

به طور کلی، ناهمسانگردی یکی از فاکتورهای تأثیرگذار بر روی رفتار مهندسی سنگ‌ها می‌باشد. خواص مهندسی چنین سنگ‌هایی با تغییر جهت ناهمسانگردی، دچار تغییر می‌شود. ناهمسانگردی سنگ عمدتاً ناشی از حضور فولیاسیون، کلیواژ، شیش‌توزیته، درزه‌ها، ترک‌های میکروسکوپی یا ماکروسکوپی و هم‌چنین سطوح لایه‌بندی است (الهراتی، ۱۹۹۸). در طبیعت، سنگ‌های دگرگونی و رسوبی نسبت به سنگ‌های آذرین از ناهمسانگردی بیش‌تری برخوردار هستند (رامامورتی، ۱۹۹۳). در سال‌های اخیر، تکنیک‌ها و روش‌های گوناگونی از قبیل آزمایش فشاری تک‌محوره و سه‌محوره، آزمایش بار نقطه‌ای، آزمایش پانچ و آزمایش مقاومت کششی برزیلی برای تعیین ویژگی‌های ژئوتکنیکی سنگ‌های ناهمسانگرد استفاده شده است. بر این اساس، محققین زیادی به مطالعه رفتار مقاومتی و هم‌چنین شناسایی الگوهای گسیختگی سنگ‌های ناهمسانگرد

پرداخته‌اند (اجل‌لوئیان و لشگری‌پور، ۲۰۰۲؛ بهلولی و همکاران، ۲۰۰۲؛ باسو و کامران، ۲۰۱۰؛ یون سی و همکاران، ۲۰۱۰؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۲؛ ایلماز و یوکسل، ۲۰۱۴؛ هنگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ خانلری و همکاران، ۲۰۱۴؛ ناصری و همکاران، ۱۹۹۷؛ سعیدی و همکاران، ۲۰۱۴). مقاومت کششی یک پارامتر مهم برای تعیین ظرفیت باربری سنگ‌ها، دگرشکلی و گسیختگی آن‌ها می‌باشد. این ویژگی برای آنالیز و بررسی پایداری ساختارهای سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این ارتباط اثر ناهمسانگردی بر روی مقاومت کششی سنگ‌ها در آزمایش برزیلی، توسط افراد مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (دی بکر و ورورت، ۲۰۰۹؛ بارلا، ۱۹۷۴؛ هابس، ۱۹۶۴؛ مک لامور و گری، ۱۹۶۷؛ تولالی و ورورت، ۲۰۱۰؛ چن و همکاران، ۱۹۹۸؛ قبادی و بهزادتبار، ۲۰۱۷؛ چو و همکاران، ۲۰۱۲). با این وجود، تاکنون مطالعه‌ای بر روی رفتار ناهمسانگردی سنگ‌های دگرگونی منطقه بروجرد انجام نشده است. سنگ‌های

حدوداً معادل ۰/۵ تهیه شده است (شکل ۲-ب). همان طور که در این شکل نشان داده شده است، زاویه ناهمسانگردی (β) بین صفر تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند.

مطالعات پتروگرافی

با مشاهده نمونه‌های دستی، سطوح تورق مختلف را با استفاده از رنگ‌های تیره و روشن می‌توان شناسایی نمود. سطوح تورق روشن عمدتاً از کوارتز، کلریت، مسکویت، فلدسپات، تورمالین، مواد آلی و کانی‌های اکسیدی تشکیل شده‌اند در حالی که لایه‌های تیره متشکل از بیوتیت و کانی‌های اوپک هستند. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی، می‌توان گفت که سنگ منشأ اسلیت‌های مورد مطالعه شیل می‌باشد. برای تعیین خصوصیات پتروگرافی اسلیت‌های مورد نظر، دو مقطع نازک از هر بلوک در دو جهت مختلف (موازی و عمود بر سطوح ناهمسانگردی) تهیه شده است. شکل ۳ تصاویر پتروگرافی از اسلیت‌های مطالعه شده را نشان می‌دهد. در این نمونه در مقاطع عمود بر ناهمسانگردی، لایه‌بندی اولیه مشاهده می‌شود که به صورت لایه‌های روشن غنی از کوارتز و فلدسپات و لایه‌های تیره غنی از بیوتیت می‌باشند. عرض لایه‌ها کم و اندازه کانی‌های تشکیل دهنده سنگ نیز ریزبلور است. تمام کانی‌ها اعم از کوارتز، فلدسپات و میکا دارای جهت‌یافتگی هستند. تماس بین دانه‌ها به دلیل ریزبلور بودن آن‌ها به درستی مشخص نمی‌باشد. بر اساس نتایج مطالعات پتروگرافی، بافت این سنگ‌ها عمدتاً لپیدوبلاستیک می‌باشد.

بحث و نتایج

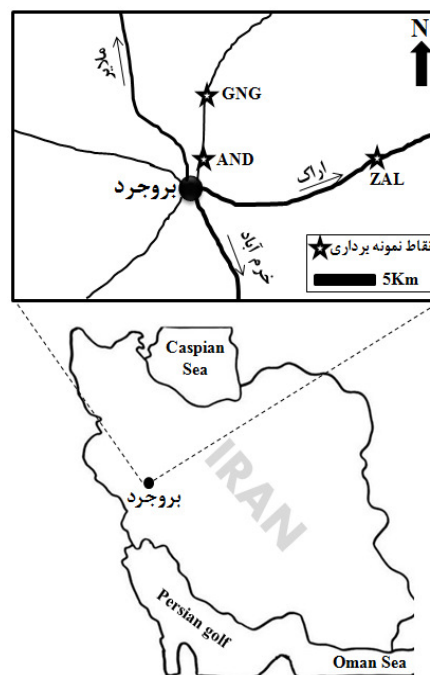
ویژگی‌های فیزیکی

ویژگی‌های فیزیکی مختلف شامل دانسیته خشک و اشباع، تخلخل مؤثر، وزن مخصوص، جذب آب و سرعت موج برای نمونه‌های مغزه اسلیت‌های مورد مطالعه مطابق با دستورالعمل ISRM (۱۹۸۱) تعیین شده است. برای تمامی نمونه‌ها، حداقل ۵ مغزه استوانه‌ای آماده شده است. نتایج آزمایش‌های دانسیته خشک (γ_d) و اشباع (γ_{sat})، تخلخل مؤثر (n)، وزن مخصوص (G_s) و درصد جذب آب (W_a) برای همه نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، دانسیته خشک نمونه‌های اسلیت مورد مطالعه بین ۲/۶۵

دگرگونی موجود در منطقه شامل سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای درجه پائین و مجاورتی درجه پائین تا درجه‌ی بالا می‌باشند. سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای منطقه مورد مطالعه شامل اسلیت و فیلیت هستند که تغییرات بافتی محسوسی را نشان نمی‌دهند. اسلیت‌ها و فیلیت‌های مورد مطالعه به صورت تپه ماهوری با رنگ‌های سیاه تا مایل به سبز دیده می‌شوند و به طور کلی تمام سنگ‌های دگرگونی درجه بالا به آن‌ها ختم می‌شوند. هدف از این مطالعه بررسی نتایج آزمایش برزیلی بر روی اسلیت‌های بروجرد به منظور تعیین اثر ناهمسانگردی بر روی مقاومت و الگوهای گسیختگی آن‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش، تعداد ۶ بلوک از ۳ نقطه شامل گردنه زالیان (ZAL)، شهرک اندیشه (AND) و روستای گندل گیان (GND) واقع در شمال و شرق بروجرد انتخاب و به آزمایشگاه انتقال داده شده‌اند (شکل ۱).

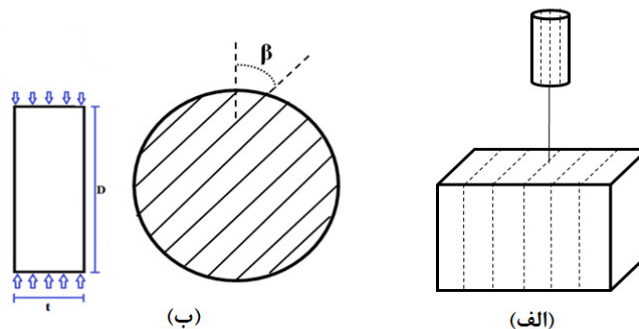


شکل ۱. موقعیت نقاط نمونه‌برداری

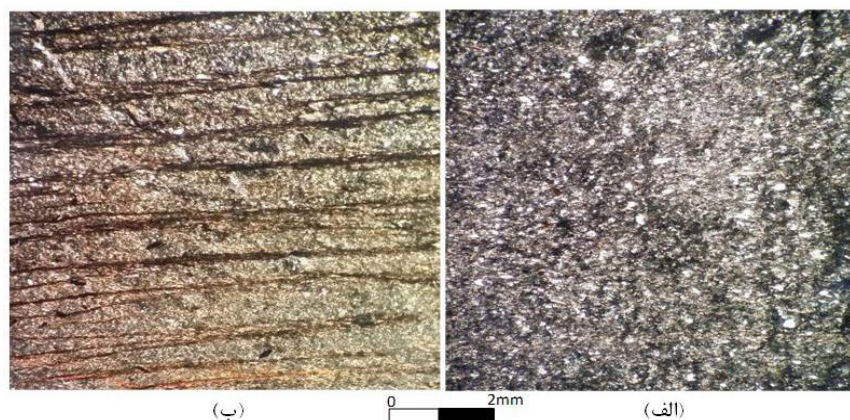
در آزمایشگاه با استفاده از یک دستگاه مغزه‌گیر دورانی با قطر سرمته ۵۴ میلی‌متر، از سنگ‌های مورد نظر در جهت موازی با ناهمسانگردی مغزه‌گیری به عمل آمده است (شکل ۲-الف). به منظور انجام آزمایش برزیلی، نمونه‌های دیسکی شکل با نسبت ضخامت (D) به قطر (t)

۲/۷۴ تا ۲/۸۱ متغیر است. بر اساس نتایج حاصل شده، مشخص شد که جذب سریع آب برای نمونه‌های اسلیت مورد مطالعه بین ۰/۴۹ تا ۲/۳۰ درصد متغیر است. میانگین جذب آب نمونه‌ها نیز ۱/۳۲ درصد حاصل شده است.

تا ۲/۷۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و دانسیته اشباع آن‌ها بین ۲/۷۱ تا ۲/۷۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب تغییر می‌کند. بر این اساس میزان حداقل، حداکثر و میانگین تخلخل مؤثر نمونه‌ها ۱/۳۴، ۵/۵۰ و ۳/۲۵ درصد می‌باشد. همچنین وزن مخصوص اسلیت‌های مورد مطالعه بین



شکل ۲. (الف) مغزه‌گیری از بلوک در جهت ناهمسانگردی، (ب) نمونه دیسکی شکل تهیه شده برای آزمایش برزیلی (β زاویه ناهمسانگردی، t ضخامت نمونه دیسکی شکل و D قطر نمونه دیسکی شکل که ۵۴ میلی‌متر است).



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های اسلیت مورد مطالعه در جهت (الف) موازی با ناهمسانگردی و (ب) عمود بر ناهمسانگردی

جدول ۱. نتایج ویژگی‌های فیزیکی برای نمونه‌های مورد مطالعه

نام نمونه	W_a (%)	G_s	n (%)	γ_{sat} (gr/cm ³)	γ_d (gr/cm ³)
زالپان (ZAL)	1.18	2.76	2.91	2.72	2.67
اندیشه (AND)	2.30	2.74	5.50	2.71	2.65
گندل گیان (GND)	0.49	2.81	1.34	2.74	2.73
میانگین	1.32	2.77	3.25	2.72	2.68

زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است (شارما و سینگ، ۲۰۰۸). بر این اساس سرعت موج نمونه‌های اسلیت مورد مطالعه در ۴ زاویه ناهمسانگردی (β) صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه اندازه‌گیری شده است که نتایج حاصل شده در جدول ۲ ارائه شده

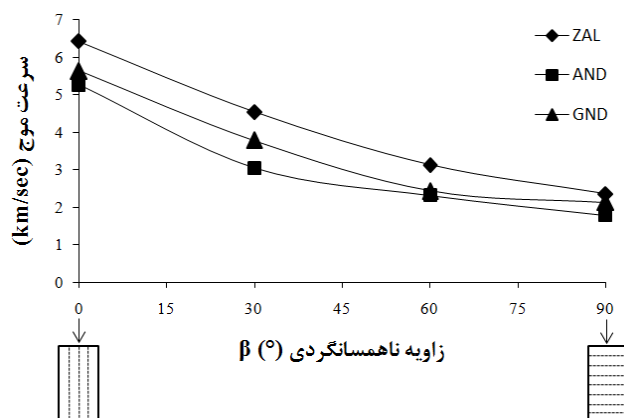
در این مطالعه، سرعت موج نمونه‌های استوانه‌ای اسلیت‌های مورد مطالعه با استفاده از یک دستگاه التراسونیک دیجیتال غیرمخرب و قابل حمل، مطابق با دستورالعمل ISRM (۱۹۸۱) تعیین شده است. از آنجائی‌که این روش غیرمخرب و ساده است، در

است که حداقل میزان سرعت موج نیز مطابق انتظار برای زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه یعنی عمود بر ناهمسانگردی حاصل شده است. همچنین شکل ۴، تغییرات سرعت موج اسلیت‌های مورد مطالعه را با توجه به افزایش زاویه ناهمسانگردی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که با افزایش زاویه ناهمسانگردی، سرعت موج برای تمامی نمونه‌ها روندی کاهشی را نشان می‌دهد.

است. لازم به ذکر است که برای هر یک از اسلیت‌های مورد مطالعه در هر زاویه، حداقل ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است و در نهایت میانگین نتایج در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، حداکثر میزان سرعت موج برای تمامی نمونه‌ها در زاویه ناهمسانگردی صفر درجه و یا به عبارتی در جهت موازی با ناهمسانگردی به‌دست آمده است. این در حالی

جدول ۲. نتایج آزمایش سرعت موج برای تمامی نمونه‌ها در زوایای مختلف ناهمسانگردی

$\beta(^{\circ})$	P – wave velocity (km/s)		
	ZAL	AND	GND
0	6.42	5.27	5.63
30	4.54	3.05	3.78
60	3.13	2.32	2.43
90	2.35	1.78	2.13



شکل ۴. تغییرات سرعت موج نمونه‌های اسلیت با توجه به زاویه ناهمسانگردی (β)

نشان می‌دهد که برای زاویه ناهمسانگردی ۱۵ درجه نسبت به جهت بارگذاری انجام شده است. نتایج آزمایش برزیلی برای تمامی اسلیت‌های مورد مطالعه، در جدول ۳ لیست شده است. همچنین شکل ۶، تغییرات مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها را در برابر زاویه ناهمسانگردی نشان می‌دهد.

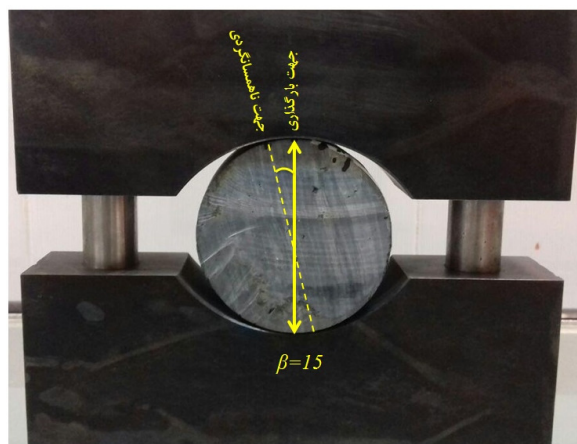
بر اساس نتایج به‌دست آمده ملاحظه می‌گردد که کمترین مقاومت کششی برزیلی برای نمونه‌های ZAL و AND به ترتیب با ۲/۸۳ و ۲/۲۱ مگاپاسکال در زاویه ناهمسانگردی ۳۰ درجه حاصل شده است. این در حالی است که کمترین مقاومت کششی برزیلی برای نمونه GND با ۱/۷۴ مگاپاسکال در زاویه ۱۵ درجه به‌دست آمده است. همچنین برای هر سه نمونه اسلیت ZAL،

مقاومت کششی برزیلی

به منظور بررسی تأثیر ناهمسانگردی بر روی مقاومت کششی اسلیت‌های مورد مطالعه، آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های دیسکی شکل با نسبت ضخامت به قطر ۰/۵ و مطابق با استاندارد ISRM (۱۹۸۱) انجام شده است. بدین منظور آزمایش برزیلی برای تمامی نمونه‌های اسلیت جمع‌آوری شده در ۷ زاویه ناهمسانگردی صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه انجام شده است. لازم به ذکر است که برای هر زاویه حداقل ۵ نمونه دیسکی شکل مورد آزمایش قرار گرفته است. به طور کلی در این مطالعه، حداقل ۱۲۰ آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌ها انجام شده است. شکل ۵ نحوه قرار گرفتن نمونه دیسکی شکل سنگ ناهمسانگرد را در فک‌های آزمایش برزیلی

۱/۳۳ و ۷/۴۳ مگاپاسکال در زوایای ۳۰ و ۹۰ درجه مشاهده شده است. همچنین آن‌ها نشان دادند که حداقل و حداکثر مقاومت کششی برزیلی برای فیلیت‌های آورزمان به ترتیب با ۱/۱۱ و ۵/۴۶ مگاپاسکال در زوایای ۱۵ و ۹۰ درجه حاصل شده است.

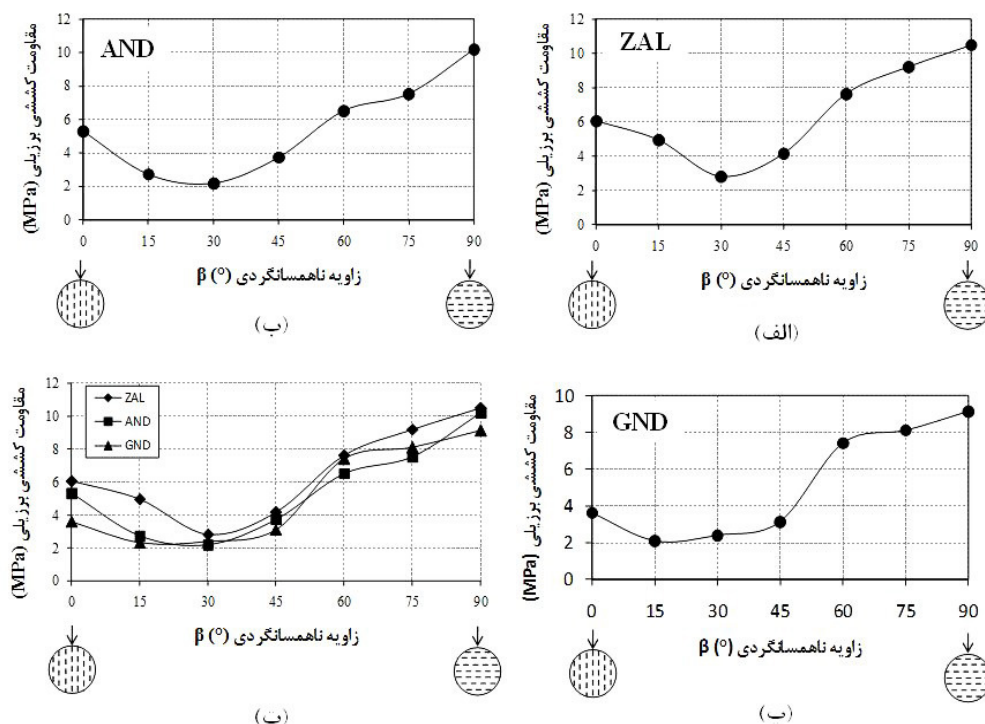
AND و GND حداکثر مقاومت کششی برزیلی به ترتیب با ۱۰/۵۱، ۱۰/۲۱ و ۹/۱۴ مگاپاسکال در زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه مشاهده شده است. خانلری و همکاران (۲۰۱۴) با مطالعه اسلیت‌های ملایر نشان دادند که حداقل و حداکثر مقاومت کششی برزیلی به ترتیب با



شکل ۵. فک‌های مورد استفاده در آزمایش برزیلی برای نمونه‌های ناهمسانگرد

جدول ۳. مقادیر مقاومت کششی برزیلی و شاخص ناهمسانگردی برزیلی برای اسلیت‌های مورد مطالعه

زاویه ناهمسانگردی β (°)		مقاومت کششی برزیلی (MPa)			میانگین مقاومت (MPa)
		نمونه ZAL	نمونه AND	نمونه GND	
0°		6.06	5.32	3.63	5.00
15°		4.96	2.74	2.11	3.27
30°		2.83	2.21	2.41	2.48
45°		4.17	3.75	3.13	3.68
60°		7.65	6.53	7.43	7.20
75°		9.21	7.54	8.13	8.29
90°		10.51	10.21	9.14	9.95
شاخص ناهمسانگردی برزیلی BAI		3.71	4.61	4.33	4.21



شکل ۶. تغییرات مقاومت کششی برزیلی در مقابل زاویه ناهمسانگردی برای (الف) اسلیت ZAL، (ب) اسلیت AND، (پ) اسلیت GND و (ت) ارتباط بین مقاومت کششی برزیلی و زاویه ناهمسانگردی برای تمامی نمونه‌ها

برزیلی حداکثر به حداقل) برای اسلیت‌های مورد مطالعه نیز با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است (نقل از خانلری و همکاران ۲۰۱۴):

$$BAI = \frac{BTS_{max}}{BTS_{min}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه BAI شاخص ناهمسانگردی برزیلی، BTS_{max} و BTS_{min} به ترتیب مقاومت کششی برزیلی حداکثر و حداقل می‌باشند. بر اساس نتایج، شاخص ناهمسانگردی برزیلی برای اسلیت‌های ZAL، AND و GND به ترتیب ۳/۷۱، ۴/۶۱ و ۴/۳۳ به دست آمده است. همچنین میانگین شاخص ناهمسانگردی برزیلی برای همه اسلیت‌های مطالعه شده، ۴/۲۱ حاصل شده است که نشان دهنده شدت بالای ناهمسانگردی در این دسته از سنگ‌ها می‌باشد. نتایج مشابهی توسط خانلری و همکاران (۲۰۱۴) برای اسلیت‌های ملایر گزارش شده است. همچنین خانلری و همکاران (۲۰۱۵) شاخص ناهمسانگردی برزیلی ماسه‌سنگ‌های سازند قرمز بالایی را ۲/۰۱ گزارش کرده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، یک زاویه انتقال بین ۴۵ و ۶۰ درجه برای هر سه نوع اسلیت مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌گردد که میانگین مقادیر مقاومت کششی برزیلی برای زوایای بیش‌تر از ۴۵ درجه به مراتب بزرگ‌تر از مقادیر کم‌تر از ۴۵ درجه است. بر این اساس، میانگین مقاومت کششی برزیلی برای مقادیر بزرگ‌تر از ۴۵ درجه (زوایای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) ۸/۴۸ مگاپاسکال و برای زوایای کوچک‌تر و مساوی ۴۵ درجه (زوایای ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه) ۳/۶۱ مگاپاسکال است. دلیل اصلی این موضوع این است که در زوایای کمتر از ۴۵ درجه، شکستگی عمدتاً به موازات ناهمسانگردی اتفاق می‌افتد، در حالی که برای زوایای بزرگ‌تر از ۴۵ درجه، شکستگی‌ها عمدتاً سطوح ناهمسانگردی را قطع می‌کنند. طبیعتاً زمانی که شکستگی لایه‌ها را قطع می‌کند نیاز به انرژی بیش‌تری برای عبور از میان سطوح ناهمسانگردی دارد که این موضوع با مقاومت بالاتر نمونه‌ها مرتبط می‌باشد.

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، شاخص ناهمسانگردی برزیلی (BAI^1) (نسبت مقاومت کششی

¹ Brazilian Anisotropy Index

ناهمسانگردی (AA) که معمولاً تمامی سطوح ناهمسانگردی را قطع می‌کند همراه با یک یا چند شاخه یا شکستگی‌های فرعی، الگوی گسیختگی غالب است. لازم به ذکر است که معمولاً برای زوایای ۶۰ و ۷۵ درجه، الگوی گسیختگی غالب از نوع منحنی شکل یا CF مشاهده شده است، در حالی که در زوایای ۹۰ درجه، الگوی گسیختگی AA غالب است.

آنالیز شکستگی‌ها

مشابه با کار خانلری و همکاران (۲۰۱۴) برای ماسه‌سنگ‌ها، در این مطالعه نیز به منظور تعیین زوایای انتقال بین نوع الگوی گسیختگی غالب، آنالیز طول شکستگی‌ها^۴ (FL) برای تمامی نمونه‌های آزمایش شده انجام شده است. شکل ۹ تغییرات طول انواع شکستگی‌ها (PA, AA) و همچنین تغییر در طول کلی آن‌ها را با توجه به زوایای ناهمسانگردی مختلف برای تمام اسلیت‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ - الف نشان داده شده است، برای زوایای کوچک‌تر و مساوی ۴۵ درجه ($\beta \leq 45^\circ$) طول شکستگی‌های در جهت ناهمسانگردی یا PA عمدتاً زیاد و بیش‌تر از ۴ سانتی‌متر است. این در حالی است که برای زوایای بزرگ‌تر از ۴۵ درجه (یعنی ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه)، طول شکستگی به موازات ناهمسانگردی بسیار کم ($< 2\text{cm}$) است. همچنین مشاهده می‌گردد که در زوایای بزرگ‌تر از ۴۵ درجه، طول شکستگی‌های در عرض ناهمسانگردی (یعنی سطوح ناهمسانگردی را قطع کرده باشند) یا AA عمدتاً بیش‌تر از ۵ سانتی‌متر است. در شکل ۹ - ب تغییرات طول نسبی شکستگی‌های نوع PA و AA برای اسلیت ۱ نشان داده شده است. به منظور محاسبه طول نسبی شکستگی از رابطه ۲ استفاده شده است (تولالی و ورورت، ۲۰۱۰). در این رابطه، RFL^۵ طول نسبی شکستگی، FL طول هر نوع شکستگی و TFL^۶ طول کلی شکستگی‌ها (مجموع طول شکستگی PA و AA) می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۹-ب نشان داده شده است، برای زوایای کمتر از ۴۵ درجه، شکستگی‌های به موازات ناهمسانگردی غالب و طول نسبی آن‌ها بیش‌تر از ۷۰ درصد است. در حالی که برای

الگوهای گسیختگی در آزمایش مقاومت کششی برزیلی

مشاهده نمونه‌های شکسته شده در آزمایش برزیلی حاکی از وجود سه نوع الگوی گسیختگی در امتداد ناهمسانگردی (PA)^۱، در عرض ناهمسانگردی (AA)^۲ و الگوی گسیختگی منحنی شکل (CF)^۳ در اسلیت‌های مورد مطالعه است (شکل ۷). همان‌طور که شکل ۷-الف نشان می‌دهد، در الگوی گسیختگی اول یا PA، شکستگی به موازات یک یا چند سطح ناهمسانگردی اتفاق می‌افتد. معمولاً این نوع گسیختگی همراه با چند شاخه یا شکستگی فرعی می‌تواند اتفاق بیافتد. این شکستگی‌های فرعی هم در جهت ناهمسانگردی و هم در عرض ناهمسانگردی اتفاق می‌افتند. در الگوی گسیختگی نوع دوم یا در عرض ناهمسانگردی (AA)، یک شکستگی اصلی در امتداد محور بارگذاری اتفاق می‌افتد که عمدتاً در بخش مرکزی نمونه دیسکی (تقریباً به موازات قطر نمونه) شکل قرار دارد. این نوع شکستگی تمام سطوح ناهمسانگردی را قطع می‌کند (شکل ۷-ب). همان‌طور که در شکل ۷-پ نشان داده شده است، شکستگی منحنی شکل یا CF نیز به مانند الگوی گسیختگی نوع دوم، یک نوع گسیختگی در عرض ناهمسانگردی است با این تفاوت که دارای انحناء بوده و اصطلاحاً کمائی شکل است. در این نوع الگوی گسیختگی، سطح شکستگی با اینکه تمام سطوح ناهمسانگردی را قطع می‌کند، اما در امتداد محور بارگذاری اتفاق نمی‌افتد و عمدتاً خارج از محدوده مرکزی نمونه قرار دارد. شکل ۸ الگوهای گسیختگی مشاهده شده در تمامی زوایای ناهمسانگردی را برای اسلیت‌های مطالعه شده نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که برای زوایای صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، الگوی گسیختگی غالب از نوع گسیختگی در امتداد ناهمسانگردی (PA) است. در این نوع گسیختگی، معمولاً یک یا چند شکستگی اصلی به موازات سطوح ناهمسانگردی اتفاق می‌افتد. همچنین شکستگی‌های فرعی یا جزئی نیز به موازات و یا در عرض سطوح ناهمسانگردی نیز مشاهده می‌شود. برای زوایای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه، عمدتاً یک شکستگی اصلی در عرض

^۴ Fracture Length (FL)

^۵ Relative Fracture Length (RFL)

^۶ Total Fracture Length (TFL)

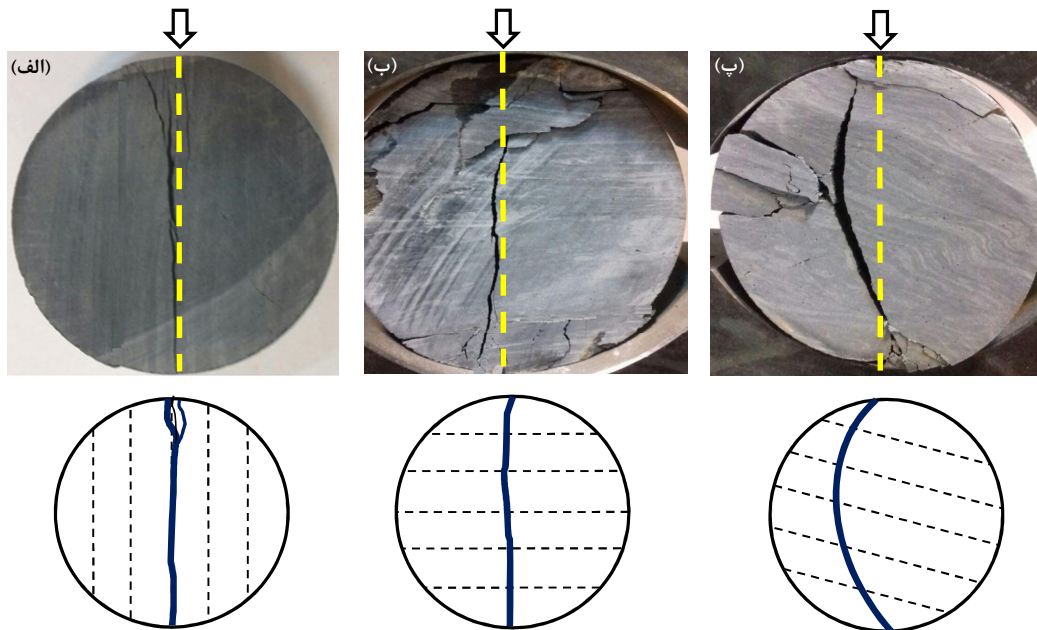
^۱ Parallel to the Anisotropy (PA)

^۲ Across the Anisotropy (AA)

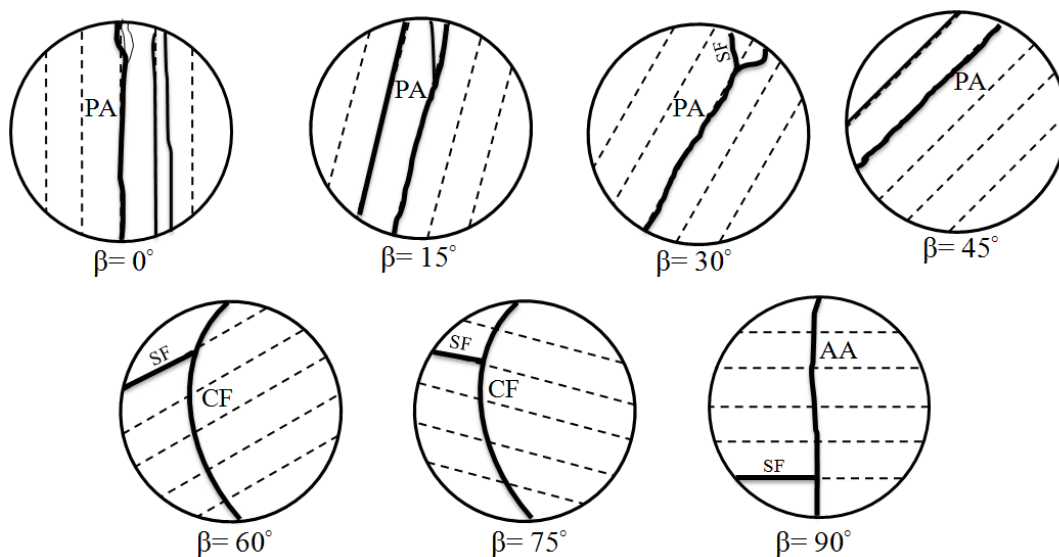
^۳ Curved Fracture (CF)

عبارتی زاویه‌ای که تغییر الگوی گسیختگی غالب از نوع PA به AA را نشان می‌دهد، برای هر ۳ نوع اسلیت مطالعه شده حدوداً ۵۰ درجه می‌باشد. همچنین محدوده زوایای ۴۵ تا ۶۰ درجه را می‌توان زون انتقال نوع گسیختگی غالب برای این دسته از سنگ‌ها در نظر گرفت.

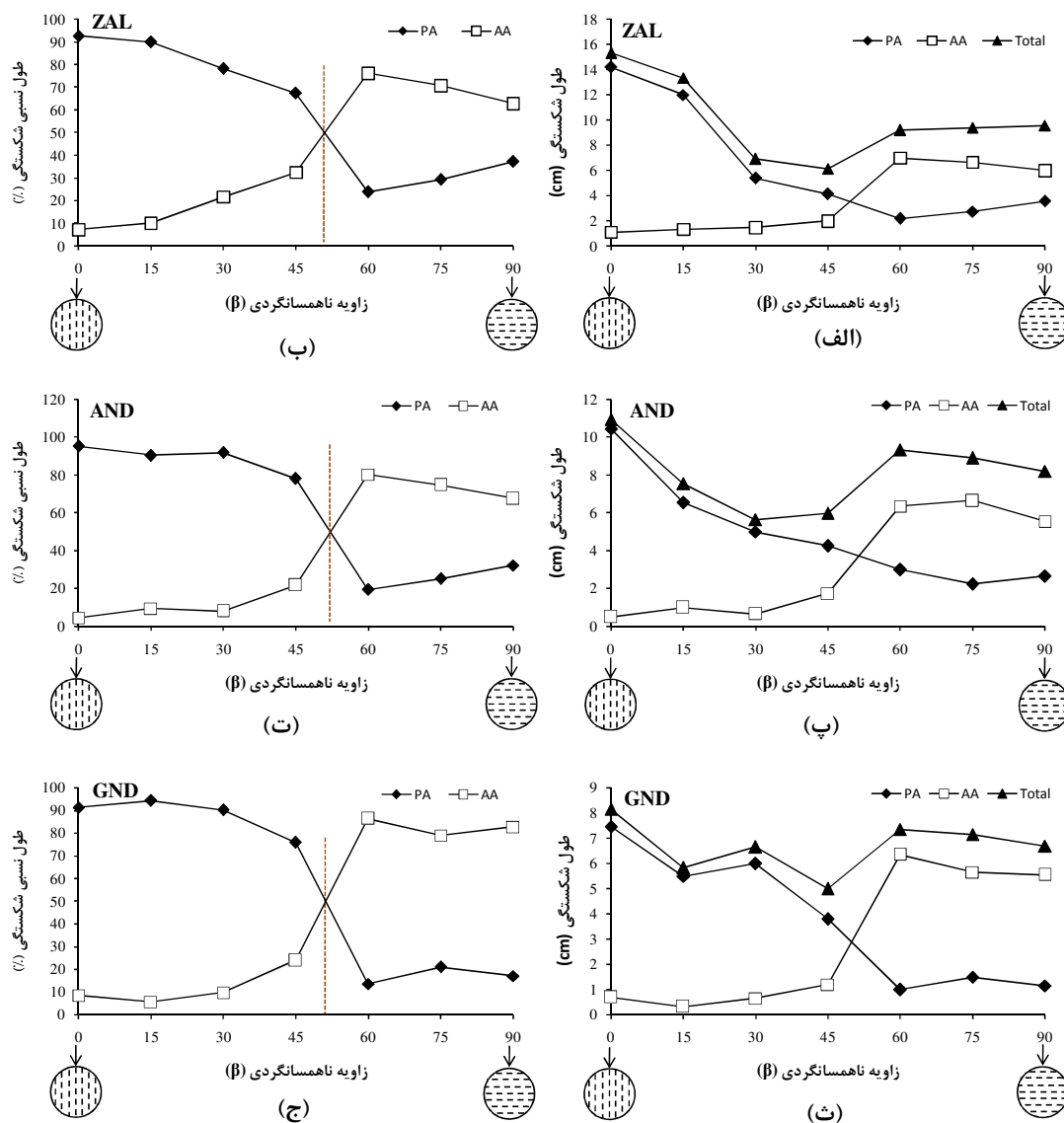
همین زوایا، طول نسبی شکستگی‌های در عرض ناهمسانگردی عمدتاً کمتر از ۳۰ درصد می‌باشد. همچنین نتایج مشابهی برای اسلیت‌های AND و GND در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به مطالب عنوان شده، می‌توان نتیجه گرفت که زاویه انتقال یا به



شکل ۷. انواع الگوهای گسیختگی مشاهده شده در آزمایش برزیلی: (الف) الگوی گسیختگی در امتداد ناهمسانگردی (PA)، (ب) الگوی گسیختگی در عرض ناهمسانگردی (AA)، (پ) الگوی گسیختگی منحنی شکل (CF) (خطچین‌های زرد رنگ جهت بارگذاری را نشان می‌دهند).



شکل ۸. الگوهای گسیختگی مشاهده شده برای اسلیت‌های مورد مطالعه در زوایای ناهمسانگردی مختلف (PA: گسیختگی به موازات ناهمسانگردی، AA: گسیختگی در عرض ناهمسانگردی، CF: شکستگی منحنی شکل و SF: شکستگی ثانویه یا جزئی)



شکل ۹. تغییرات طول شکستگی و طول نسبی شکستگی با توجه به زاویه ناهمسانگردی برای اسلیت‌های مورد مطالعه (خط‌چین‌های موجود در تصاویر، زاویه انتقال نوع شکستگی غالب را نشان می‌دهند).

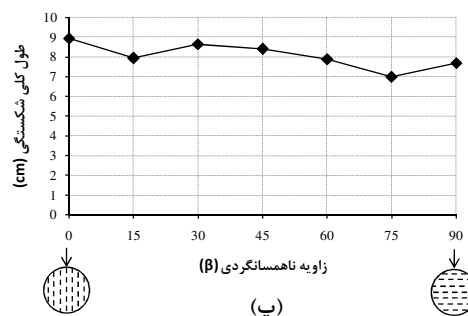
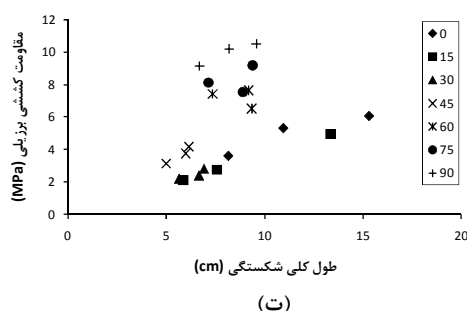
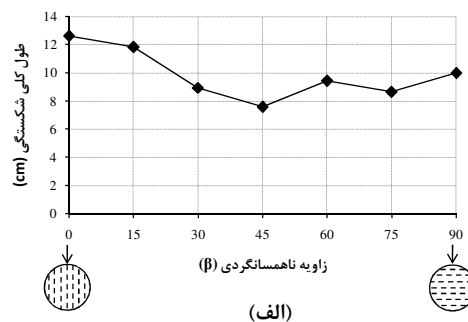
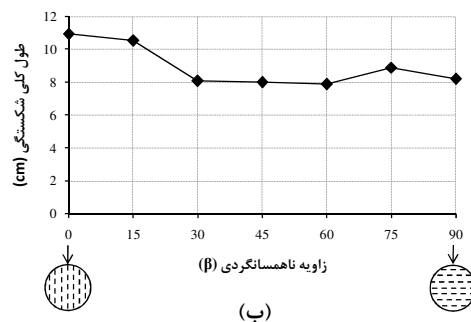
GND در زاویه ۴۵ درجه و نمونه AND در زاویه ۳۰ درجه مشاهده شده است. با توجه به اینکه در زاویه صفر درجه، نوع گسیختگی غالب متشکل از چند شکستگی اصلی در جهت ناهمسانگردی است، طول کلی شکستگی بالا قابل انتظار است. اما در زوایای ۳۰ و ۴۵ درجه عمده‌تاً گسیختگی غالب به صورت یک شکستگی اصلی در جهت ناهمسانگردی اتفاق افتاده است که در نتیجه باعث طول کم شکستگی‌ها شده است. هم‌چنین در شکل ۱۰-ت، ارتباط بین مقادیر مقاومت کششی برزیلی و میانگین طول کلی شکستگی‌ها برای تمامی نمونه‌ها نشان داده

ارتباط بین طول کلی شکستگی (TFL) و مقاومت کششی برزیلی (BTS)

شکل ۱۰ تغییرات میانگین طول کلی شکستگی‌ها برای هر ۳ اسلیت مطالعه شده را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که با افزایش زاویه ناهمسانگردی، تغییرات طول کلی شکستگی روندی کاهشی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، در زاویه ناهمسانگردی صفر درجه، بیش‌ترین طول کلی شکستگی برای تمامی نمونه‌ها مشاهده شده است. در حالی‌که کم‌ترین میزان طول شکستگی برای نمونه اسلیت ZAL و

نمونه‌های اسلیت ZAL که از مقاومت کششی بالاتری برخوردارند، در زوایای ناهمسانگردی مشابه دارای طول کلی شکستگی بیش‌تری در مقایسه با نمونه‌های دیگر می‌باشند.

شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، ارتباط مثبتی بین این دو پارامتر وجود دارد. بدین معنا که با افزایش طول شکستگی‌ها، تغییرات مقاومت کششی برزیلی نیز روندی صعودی را نشان می‌دهد و بالعکس. با توجه به مطالب عنوان شده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که



شکل ۱۰. ارتباط بین طول کلی شکستگی‌ها با زاویه ناهمسانگردی برای (الف) اسلیت ZAL، (ب) اسلیت AND، (پ) اسلیت GND و (ت) ارتباط بین مقاومت کششی برزیلی و میانگین طول کلی شکستگی‌ها برای تمامی نمونه‌ها

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر ناهمسانگردی بر روی رفتار مقاومتی و الگوهای گسیختگی اسلیت‌های شمال و شرق بروجرد در آزمایش برزیلی مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس، نمونه‌های دیسکی شکل در زوایای ناهمسانگردی (زاویه بین سطح ناهمسانگردی و جهت بارگذاری) صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه عبارتند از:

به ترتیب با ۱۰/۵۱، ۱۰/۲۱ و ۹/۱۴ مگاپاسکال در زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه مشاهده شده است.

- بر اساس نتایج مشخص شد که یک زاویه انتقال بین ۴۵ و ۶۰ درجه برای هر سه نوع اسلیت وجود دارد. بر این اساس ملاحظه گردید که میانگین مقادیر مقاومت کششی برزیلی برای زوایای بیش‌تر از ۴۵ درجه به مراتب بزرگ‌تر از زوایای کم‌تر از ۴۵ درجه است. به طور مثال میانگین مقاومت کششی برزیلی برای مقادیر بزرگ‌تر از ۴۵ درجه (زوایای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) ۸/۴۸ مگاپاسکال و برای زوایای کوچک‌تر و مساوی ۴۵ درجه (زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵ و صفر درجه) ۳/۶۱ مگاپاسکال است.

- بر اساس نتایج، شاخص ناهمسانگردی برزیلی (نسبت حداکثر مقاومت کششی به حداقل مقاومت کششی) برای اسلیت‌های ZAL، AND و GND به ترتیب ۳/۷۱،

- نتایج نشان داد که کم‌ترین مقاومت کششی برزیلی برای نمونه‌های ZAL و AND به ترتیب با ۲/۸۳ و ۲/۲۱ مگاپاسکال در زاویه ناهمسانگردی ۳۰ درجه حاصل شده است. در حالی که کم‌ترین مقاومت برای نمونه GND با ۱/۷۴ مگاپاسکال در زاویه ۱۵ درجه به دست آمده است. هم‌چنین برای هر سه نمونه اسلیت ZAL، AND و GND حداکثر مقاومت کششی برزیلی

- Cho, J., Kim, H., Jeon, S., Min, K (2012) Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 50: 158-169.
- Debecker, B., Vervoort, A (2009) Experimental observation of fracture patterns in layered Slate. *International Journal Fractal*, 159: 51-62.
- Ghobadi, M. H., Behzadtabar, P (2017) Deformation and strength anisotropy of calcareous slates under Brazilian tests. *Journal of Engineering Geology*, 11: 81-102.
- Heng, S., Guo, Y., Yang, Ch, et al. (2015) Experimental and theoretical study of the anisotropic properties of shale. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 74: 58-68.
- Hobbs, D. W (1964) The strength and stress-strain characteristics of coal in triaxial compression. *Journal of Geology*, 72: 214-231.
- ISRM (1981) Rock characterization, testing and monitoring, ISRM suggested methods. In: Brown ET (ed) Pergamon Press, Oxford, p 211.
- Khanlari, G. R., Heidari, M., Sepahigero, A. A., Fereidooni, D (2014) Quantification of strength anisotropy of metamorphic rocks of the Hamedan province, Iran, as determined from cylindrical punch, point load and Brazilian tests. *Journal of Engineering Geology*, 169: 80-90.
- Kim, H., Cho, J., Song, I., Min, K (2012) Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea. *Engineering Geology*, 147-148: 68-77.
- McLamore, R., Gray, K. E (1967) The mechanical behavior of transversely isotropic sedimentary rocks. *Transition in American Society of Mechanical Engineering Series B*, 12: 62-76.
- Nasseri, M. H., Rao, K. S., Ramamurthy, T (1997) Failure mechanism in schistose rocks". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 34: 3-4.
- Ramamurthy, T (1993) Strength and modulus responses of transversely isotropic rocks. in: Hudson, J. A. (Ed.), *Compressive Rock Engineering*, vol. 1. Oxford, Pergamon, pp. 313-329.
- Saeidi, O., Rasouli, V., Geranmayeh, Vaneghi, R., Gholami, R., Torabi, S. R (2014) A modified failure criterion for transversely isotropic rocks. *Geoscience Frontiers Journal*, 5: 215-225.
- Tavallali, A., Vervoort, A (2010) Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47: 313-322.
- ۴/۶۱ و ۴/۳۳ به‌دست آمده است. هم‌چنین میانگین شاخص ناهمسانگردی برزلی برای همه اسلیت‌های مطالعه شده، ۴/۲۱ حاصل شده است.
- مشاهده نمونه‌های شکسته شده در آزمایش برزلی حاکی از وجود سه نوع الگوی گسیختگی در امتداد ناهمسانگردی (PA) برای زوایای صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه، در عرض ناهمسانگردی (AA) و الگوی گسیختگی منحنی شکل (CF) برای زوایای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه می‌باشد.
 - نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که زاویه انتقال نوع گسیختگی غالب از PA به AA برای هر ۳ نوع اسلیت مطالعه شده حدوداً ۵۰ درجه می‌باشد. هم‌چنین محدوده زوایای ۴۵ تا ۶۰ درجه را می‌توان زون انتقال نوع گسیختگی غالب برای این‌دسته از سنگ‌ها در نظر گرفت.
 - نتایج نشان می‌دهد که ارتباط مثبتی بین مقادیر مقاومت کششی برزلی و میانگین طول کلی شکستگی‌ها وجود دارد. بدین معنا که با افزایش طول کلی شکستگی‌ها، تغییرات مقاومت کششی برزلی نیز روندی صعودی را نشان می‌دهد.
- ### منابع
- Ajalloeian, R., Lashkaripour, G. R (2002) Strength anisotropies in mudrocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59: 195-199.
- Al-Harhi A.A (1998) Effect of planar structures on the anisotropy of Ranyah sandstone Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 50: 49-57.
- Barla, G (1974) Rock anisotropy: Theory and laboratory testing, *Rock Mechanics*, ed. L. Miiller. Springer-Verlag, New York, pp. 132-169.
- Basu, A., Kamran, M (2010) Point load test on schistose rocks and its applicability in predicting uniaxial compressive strength. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47: 823-828.
- Bohlool, B., Ronge, B., Gustafson, G (2002) Laboratory examination of anisotropy in the foliation plane of metamorphic rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61: 43-47.
- Chen, C. S., Pan, E., Amadei, B (1998) Determination strength of anisotropic Brazilian tests of Deformability and Tensile Rock Using Brazilian tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35: 43-61.

- Yilmaz, I., Yucel, O (2014) Use of the core strangle test for determining strength anisotropy of rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 66: 57–63.
- Yun-si, L., Xiao, Z., Quan, Y (2010) Mechanical Properties for the Anisotropy of Slate under the Influence of Different Bedding Orientations. *EJGE*, 17: 3709-3716.

The effect of anisotropy on the strength and failure patterns of Borujerd area slates under Brazilian test conditions

Sh. Jamshidvand¹, R. Zarei Sahamieh^{2*}, Y. Abdi³, A. Ahmadi Khalaji⁴ and A. Jamshidi⁵

1, 2, 3, 4, 5- Dept., of Geology, Faculty of sciences, Lorestan University, Khoramabad

*zareisah@yahoo.com

Recieved: 2018/10/10 Accepted: 2018/11/26

Abstract

This study deal with the effect of anisotropy on strength behavior and failure patterns of Borujerd area slates under Brazilian test conditions. For this purpose, 6 rock blocks were taken from different locations in north and east of Borujerd. After sample preparation and assessment of mineralogical and physical properties, the Brazilian tensile strength test was performed on the disc-shaped samples in 7 anisotropy angles (between the loading direction and anisotropy plane) including 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90°. The results indicate that the maximum BTS is observed at $\beta = 90^\circ$ for all samples. While, the lowest value of BTS corresponds to anisotropy angles (β) equal to 15° and 30°. The observation of failure patterns of samples after Brazilian test shows that there are three types of dominant failure patterns including parallel to the anisotropy (PA), across the anisotropy (AA) and curved fracture (CF). Transitional angle, which indicates the change in dominant failure pattern from parallel to the anisotropy to across the anisotropy, were also determined. Finally, the relationship between fractures length and Brazilian tensile strength was determined for selected slates.

Keywords: Anisotropy, Brazilian tensile strength, Failure pattern, Slate, Borujerd