

ارزیابی اثر ناهمسانگردی بر رفتار مهندسی سنگ‌های ناهمسانگرد با استفاده از آزمایش پانچ استوانه‌ای

غلامرضا فانلری^{۱*}، مجتبی میدری^۲، علی‌اصغر سپاهی‌گرو^۳ و داود فریدونی^۴

(۱) استاد گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(۲) استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(۳) استادگروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(۴) دانشجوی دوره دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

(*) عهده‌دار مکاتبات

دریافت: ۱۳۹۲/۲/۸؛ دریافت اصلاح شده: ۱۳۹۲/۴/۲۸؛ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۷؛ قابل دسترس در تارنما: ۱۳۹۲/۹/۳۰

هکیده

به منظور بررسی تأثیر ناهمسانگردی بر رفتار مهندسی سنگ‌های ناهمسانگرد، پنج نمونه سنگ دگرگونی با لیتولوژی مختلف تهیه شده از قسمت‌های مرکزی و جنوبی استان همدان، در آزمایشگاه بررسی شدند. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی، علت ناهمسانگردی این سنگ‌ها حضور کانی‌های جهت یافته و صفحات ضعیف نظیر کلیواژ، شیسستوزیته، فولیاسیون و فابریک نواری در آنها می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل، خواص فیزیکی مختلف با یکدیگر مرتبط می‌باشند. در این پژوهش، علاوه بر معرفی آزمایش پانچ استوانه‌ای، ناهمسانی مقاومت سنگ‌های مورد مطالعه توسط این آزمایش نیز بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش پانچ استوانه‌ای نشان داد که خواص مقاومتی این سنگ‌ها تا حد زیادی به جهت اعمال نیرو نسبت به سطوح ناهمسانگردی سنگ در حین انجام این آزمایش بستگی دارد. بنابراین، کمترین مقدار مقاومت پانچ سنگ‌های مورد مطالعه در جهت موازی و بیشترین مقدار در جهت عمود بر سطوح ناهمسانگردی بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: سنگ دگرگونی، سطوح ناهمسانگردی، ناهمسانی مقاومت سنگ، آزمایش پانچ استوانه‌ای، شاخص پانچ استوانه‌ای.

۱- مقدمه

انواع سنگ‌ها، معمولاً بیشترین درجه ناهمسانگردی را از خود نشان می‌دهند (Ramamurthy et al. 1993). این ویژگی، یکی از مهمترین عوامل تأثیر گذار بر روی خواص مقاومتی سنگ‌ها می‌باشد. در مهندسی عمران و معدن، ناهمسانگردی بر روی پایداری حفاری‌های زیرزمینی، حفاری‌های سطحی و همچنین پایداری پی سازه‌ها مؤثر بوده و ممکن است در مقیاس مختلف، از نمونه‌های سنگ بکر تا توده سنگ مشاهده شود (Chen et al. 1998).

برخی از سنگ‌ها نظیر ماسه‌سنگ، شیل، اسلیت، فیلیت، گنیس و شیسست به هنگام تعیین خواص مقاومتی، ناهمسانگردی (Anisotropy) نشان می‌دهند. این ویژگی ناشی از حضور کانی‌های سوزنی یا صفحه‌ای شکل و یا صفحات ضعیف سنگ نظیر لایه‌بندی، کلیواژ، فولیاسیون، صفحات برشی و شیسستوزیته می‌باشد. از بین سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی، سنگ‌های دگرگونی نسبت به سایر

می‌باشد. بر اساس ایجاد ارتباط بین UCS و BPI، مشخص گردید که میزان خطای محاسبه مقاومت فشاری تک محوری با این روش در مقایسه با شاخص مقاومت بار نقطه‌ای بخصوص برای سنگ‌های سست لایه‌دار، کمتر می‌باشد (Ulusay & Gokceoglu 1997, 1999, 1998). همچنین پیشنهاد شد که BPI، به عنوان یک پارامتر ورودی از مقاومت سنگ بکر، در طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ استفاده شده و برای بررسی تأثیر ناهمسانگردی سنگ، نمونه‌های قرصی شکل با جهت‌یابی مختلف نیز بکار برده شوند.

بر اساس مطالعات جامع اولوسی و گوکسوگلو (Ulusay & Gokceoglu 1997)، یک رابطه تجربی برای محاسبه شاخص پانچ بلوکی اصلاح شده (Corrected Block Punch Index, BPIC) پیشنهاد شد. این رابطه بعداً توسط سالاکو و اولوسی (Sulukcu & Ulusay 2001)، بر اساس انجام آزمایشات بیشتر اصلاح گردید. اولوسی و همکاران (Ulusay et al. 2001)، با بررسی و جمع‌بندی کارهای گذشته، پیش نویس استاندارد ISRM را برای محاسبه شاخص پانچ بلوکی پیشنهاد نمودند. بر این اساس، شاخص پانچ بلوکی اصلاح شده بر حسب مگاپاسکال از رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\text{BPIC} = 3499D^{-1.3926} \times t^{-1.1265} \times P \quad (1) \text{ رابطه}$$

در این رابطه D و t به ترتیب قطر و ضخامت نمونه قرصی شکل سنگ بر حسب میلی‌متر و P نیروی لازم برای گسیختن نمونه بر حسب کیلونیوتن می‌باشد.

گوکسوگلو و آکسوی (Gokceoglu & Aksoy 2000) نیز ثابت کردند که BPI را می‌توان به عنوان یک پارامتر مناسب به منظور تعیین مقاومت سنگ بکر در طبقه‌بندی RMR استفاده نمود. سومز و تانوسلوگلو (sonmez & Tunusluoglu 2008)، رابطه محاسبه UCS بر اساس مقادیر BPI را با در نظر گرفتن ثابت m_i و معیار شکست هوک و براون ارائه نمودند. اولوسی و گوکسوگلو (Ulusay & Gokceoglu 1997) پیشنهاد کردند که هنگام استفاده از شاخص پانچ بلوکی برای تعیین مقاومت سنگ‌ها، باید به لیتولوژی سنگ و شرایط زمین‌شناسی آن نیز توجه کرد.

میشرا و باسو (Mishra & Basu 2012) قابلیت کاربرد شاخص پانچ بلوکی را در تعیین مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی، با آزمایش بر روی گرانیت، شیست و ماسه‌سنگ در کشور هند بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص مذکور در پیش‌بینی مقدار UCS به اندازه تعیین UCS از روی شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، دارای اهمیت است. این در حالی است که تعیین مقاومت کششی برزیلی با استفاده از شاخص پانچ بلوکی (BPI)، نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به شاخص مقاومت بار نقطه‌ای ارائه می‌دهد.

مطالعه ویژگی‌های مهندسی سنگ بکر ناهمسانگرد، مبتنی بر اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی آن و مطالعه مغزه‌های استوانه‌ای شکل با ناهمسانگردی تحت زوایای مختلف نسبت به محور بارگذاری (زاویه ناهمسانگردی (Anisotropy angle) یا زاویه β) در آزمایش‌های مکانیکی می‌باشد (Behrestaghi et al. 1996, Zhang et al. 2011). تهیه نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای شکل از سنگ‌های ناهمسانگرد بخصوص هنگام مغزه‌گیری در جهت عمود بر سطوح ناهمسانگردی، بسیار مشکل و گاه ناممکن است. زیرا مغزه‌های تهیه شده بصورت قرصی شکل در امتداد سطوح ناهمسانگردی شکسته می‌شوند. بنابراین، انجام روش‌های غیر مستقیم برای تعیین ویژگی‌های مقاومتی این سنگ‌ها پیشنهاد می‌شود.

یکی از آزمایش‌های شاخص و کاربردی برای تعیین غیر مستقیم مقاومت فشاری تک محوری، آزمایش پانچ بلوکی (Block Punch Test, BPT) می‌باشد. این آزمایش بر روی نمونه‌های قرصی شکل انجام می‌شود و توسط آی‌اس‌آر‌ام (International Society for Rock Mechanics, ISRM) به عنوان یک روش پیشنهادی پذیرفته شده است (Ulusay et al. 2001, Karakul et al. 2010). آزمایش پانچ بلوکی، اولین بار توسط شریر (van der Schrier 1988) در دانشگاه دلفت (Delft university) هلند به عنوان یک روش غیرمستقیم برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری، ابداع گردید. شریر (van der Schrier 1988)، ارتباط بین مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی را با شاخص پانچ بلوکی بدست آورد. این شاخص (بخصوص زمانی که امکان تهیه مغزه سنگی مناسب فراهم نباشد و یا نمونه‌های کوچک سنگ در دسترس باشند) می‌تواند برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌های ناهمسانگرد، شاخص مناسبی باشد. وی همچنین نشان داد که از تقسیم شاخص پانچ بلوکی حداکثر به مقدار حداقل آن، می‌توان متوجه شدت ناهمسانگردی سنگ شد.

تا کنون، محققین بسیاری برای تعیین مقاومت سنگ‌ها از آزمایش پانچ بلوکی استفاده نموده‌اند. این محققین با استفاده از نمونه‌های قرصی شکل و اعمال نیروی فشاری ناشی از دستگاه آزمایش پانچ، شاخص پانچ بلوکی (Block Punch Index, BPI) را محاسبه نمودند (Mishra & Basu 2012). علی‌رغم آنکه آزمایشات اولیه پانچ، بر روی نمونه‌های با قطر در حدود ۴۰ و ضخامت در حدود ۱۰ میلی‌متر انجام می‌شد، اما تأثیر اندازه نمونه در تعیین شاخص پانچ بلوکی (BPI) در نظر گرفته نمی‌شد. بر اساس مطالعات اولوسی و گوکسوگلو (Ulusay & Gokceoglu 1997, 1998, 1999)، اعمال ضریب تصحیح اندازه با توجه به انجام آزمایشات تجربی، ضروری

معادل ۱۵ مغزه NX بود. بنابراین برای هر تیپ از سنگ‌های مورد مطالعه، تعداد ۱۰۵ (۷×۱۵) و در مجموع ۵۲۵ (۵×۷×۱۵) مغزه قرصی شکل تهیه شد. ضخامت مغزه‌های مورد استفاده برای انجام آزمایش مذکور مطابق با پیشنهاد اولوسی و همکاران (Ulusay et al. 2001)، بین ۵ تا ۱۵ میلیمتر انتخاب گردید.

۴- بحث و تحلیل نتایج

۴-۱- مطالعات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی

بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه، با تهیه مقاطع نازک و مطالعه آنها توسط میکروسکوپ پلاریزان و انجام آزمایش ایکس آر دی (X-Ray Diffraction, XRD) مطابق با روش پیشنهادی آی اس آر ایم (ISRM 1978)، انجام شد. بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی و پتروگرافی سنگ‌ها به منظور مطالعه ویژگی‌های مهندسی آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، پس از تهیه مقاطع نازک در دو جهت موازی و عمود بر سطوح ناهمسانگردی سنگ‌ها، ابتدا نوع و درصد کانی‌های تشکیل دهنده هر سنگ مشخص گردید. سپس نام هر سنگ با توجه به کانی‌های تشکیل دهنده آن تعیین شد (جدول ۱). تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های مورد مطالعه به همراه کانی‌های اصلی تشکیل دهنده در دو جهت موازی و عمود بر سطوح ناهمسانگردی، در تصویر ۲ نشان شده‌اند. بر این اساس، در مقاطع عمود بر سطوح ناهمسانگردی سنگ، جهت‌یابی کانی‌های تشکیل دهنده و تورق سنگ‌ها به صورت باندهای تیره و روشن کاملاً مشخص است، در حالی که در مقاطع موازی با سطوح ناهمسانگردی، جهت‌یابی کانی‌ها و تورق سنگ، مشاهده نمی‌شود.

به منظور تشخیص صحت انجام مطالعات کانی‌شناسی و پتروگرافی سنگ‌های مورد مطالعه توسط میکروسکوپ پلاریزان، آزمایش ایکس آر دی (X-ray diffraction, XRD) نیز بر روی پودر سنگ‌های مورد مطالعه (از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده‌اند) در زاویه 20 بین ۲ تا ۷۰ درجه انجام شد. نتایج این آزمایش نشان داد که کوارتز، میکا و فلدسپات کانی‌های فراوان موجود در همه نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشند. این کانی‌ها به ترتیب در زاوایای 20 بین ۲۱ تا ۲۸، ۸ تا ۱۸ و ۲۴ تا ۲۸ تشخیص داده می‌شوند. همچنین نتایج نشان داد که درصد کانی‌های کوارتز، میکا و فلدسپات از درصد کانی‌های دگرگونی نظیر گارنت (آلماندین)، سیلیمانیت، آندالوزیت و استارولیت بیشتر می‌باشد. بنابراین نتایج آزمایش ایکس‌آردی (XRD)، با نتایج مطالعات میکروسکوپی نمونه‌ها کاملاً هم‌خوانی داشته و آنها را تأیید می‌نماید. نمودارهای حاصل از انجام آزمایش XRD بر روی سنگ‌های مورد مطالعه، در تصویر ۳ نشان داده شده است.

در سنگ‌های ناهمسانگرد، مقدار شاخص پانچ بلوکی با زاویه ناهمسانگردی سنگ (β) تغییر می‌کند. بنابراین، فاکتور تبدیل ناهمسانی مقاومت (K_a)، توسط اولوسی و گوکسوگلو (Ulusay & Gokceoglu 1997) به منظور بهینه سازی شاخص پانچ بلوکی (BPI) سنگ‌های ناهمسانگرد در زاویه $\beta=90$ درجه ارائه گردید.

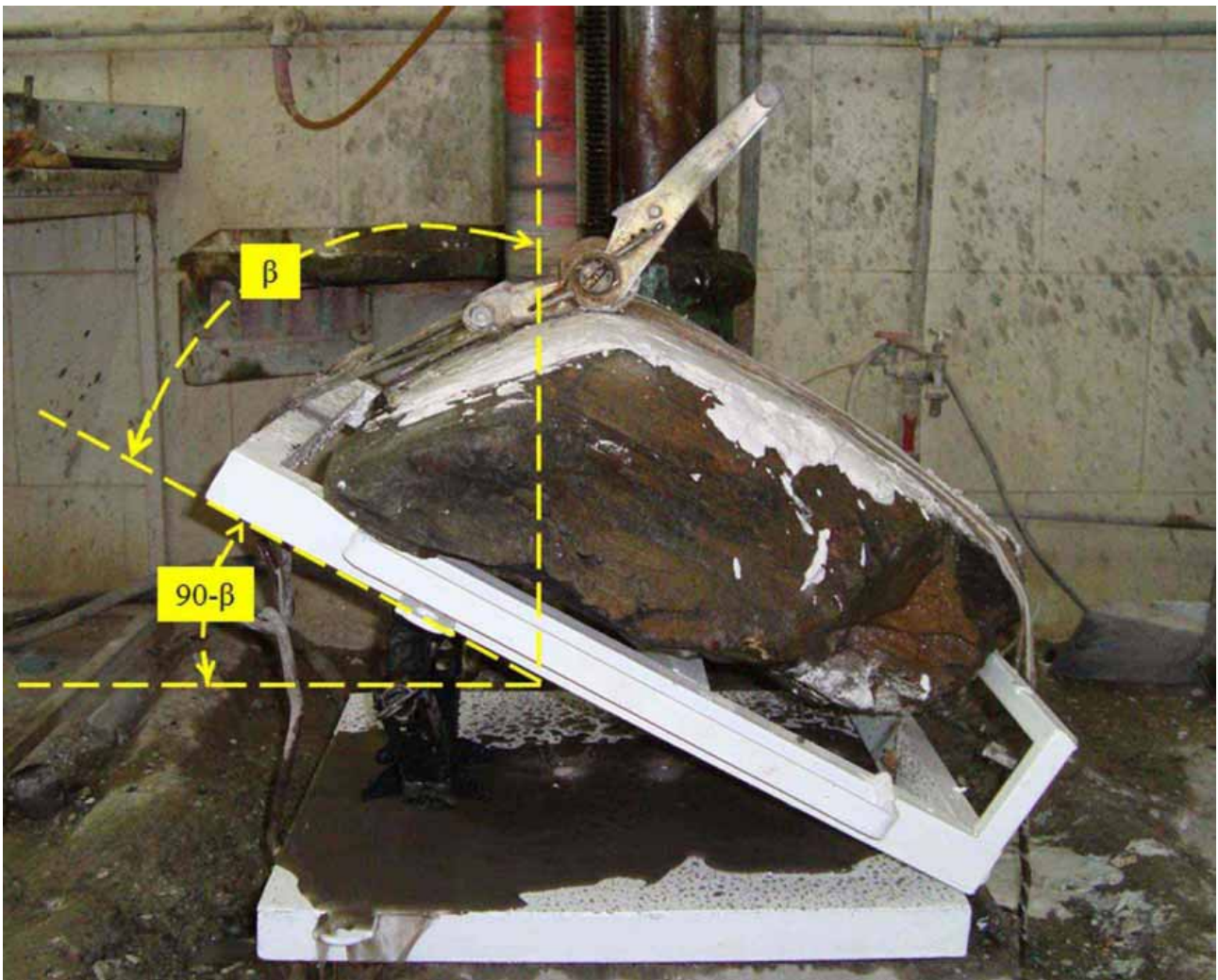
بر اساس نتایج آزمایشات تکمیلی، این فاکتور توسط کاراکول و همکاران (Karakul et al. 2010)، اصلاح گردید. در این پژوهش، به کمک آزمایش پانچ بلوکی، ضمن معرفی آزمایش پانچ استوانه‌ای، تأثیر ناهمسانگردی سنگ‌های دگرگونی بر رفتار مقاومتی آنها توسط آزمایش مذکور بررسی شد.

۲- پهنگی و ممل افذ نمونه‌ها

در این پژوهش، با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه و نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ همدان (G.S.I. 1977) و بر اساس بازدیدهای صحرائی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی سنگ‌های دگرگونی ناهمسانگرد موجود در محدوده استان همدان بررسی شدند. در ادامه، ۵ تیپ سنگ با لیتولوژی و ویژگی‌های متفاوت انتخاب شدند. برای انجام مطالعات آزمایشگاهی، از این سنگ‌ها بلوک‌هایی بعنوان نمونه تهیه و به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی‌سینا منتقل شدند. مرحله نمونه برداری به دلیل ناهمسانگردی و وجود درزه و شکستگی‌های فراوان در سنگ‌ها، جزو حساس‌ترین و دشوارترین مراحل این پژوهش بود. بنابراین، به منظور اطمینان از عدم وجود درزه و شکستگی، علاوه بر دقت در بررسی چشمی هر بلوک سنگی، صدای ناشی از ضربه چکش زمین‌شناسی بر روی آن نیز بررسی شد. ۵ نمونه انتخاب شده در این پژوهش، شامل نمونه‌های آورزمان (AVZ)، حیدره (HDR)، ملایر (MLR)، ورکانه (VRK) و زاغه (ZGH) می‌باشند. این نمونه‌ها به ترتیب از مناطق آورزمان، حیدره، ملایر، ورکانه و زاغه که در قسمت‌های مرکزی و جنوبی استان همدان واقع گردیده‌اند، تهیه شدند.

۳- مغزه‌گیری از نمونه‌های مورد مطالعه

در این مرحله، در آزمایشگاه از بلوک‌های سنگی تهیه شده، در ۷ زاویه ناهمسانگردی (β) مختلف (زوایای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه)، مغزه‌گیری انجام شد. به منظور افزایش دقت مغزه‌گیری در این ۷ زاویه، یک سطح شیبدار با قابلیت تنظیم در زوایای مختلف طراحی و ساخته شد (تصویر ۱). تعداد مغزه‌های قرصی شکل مورد نیاز برای انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای برای هر زاویه ناهمسانگردی،

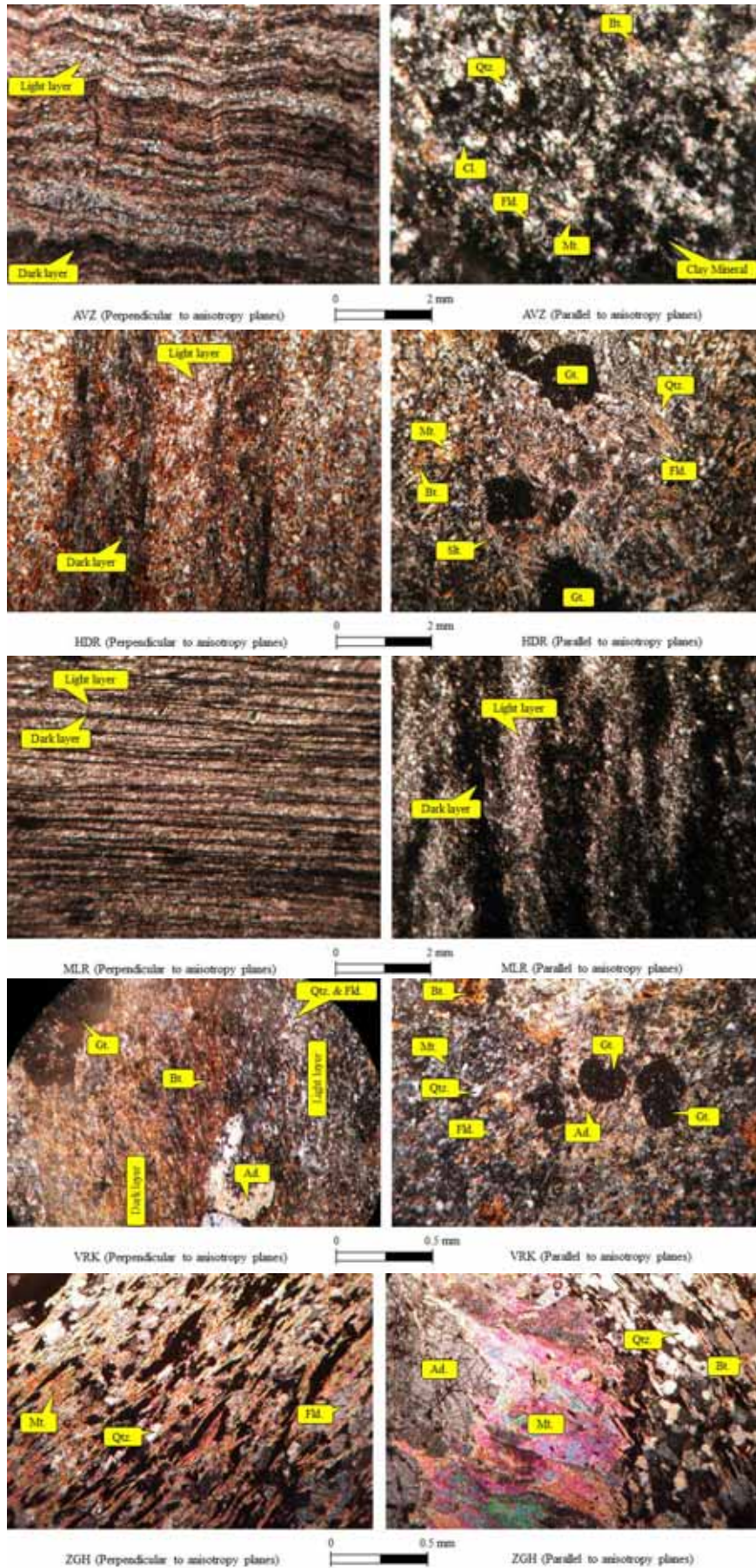


تصویر ۱- تصویری از سطح شیب‌دار ساخته شده برای مغزه‌گیری از سنگ به صورت زاویه‌دار

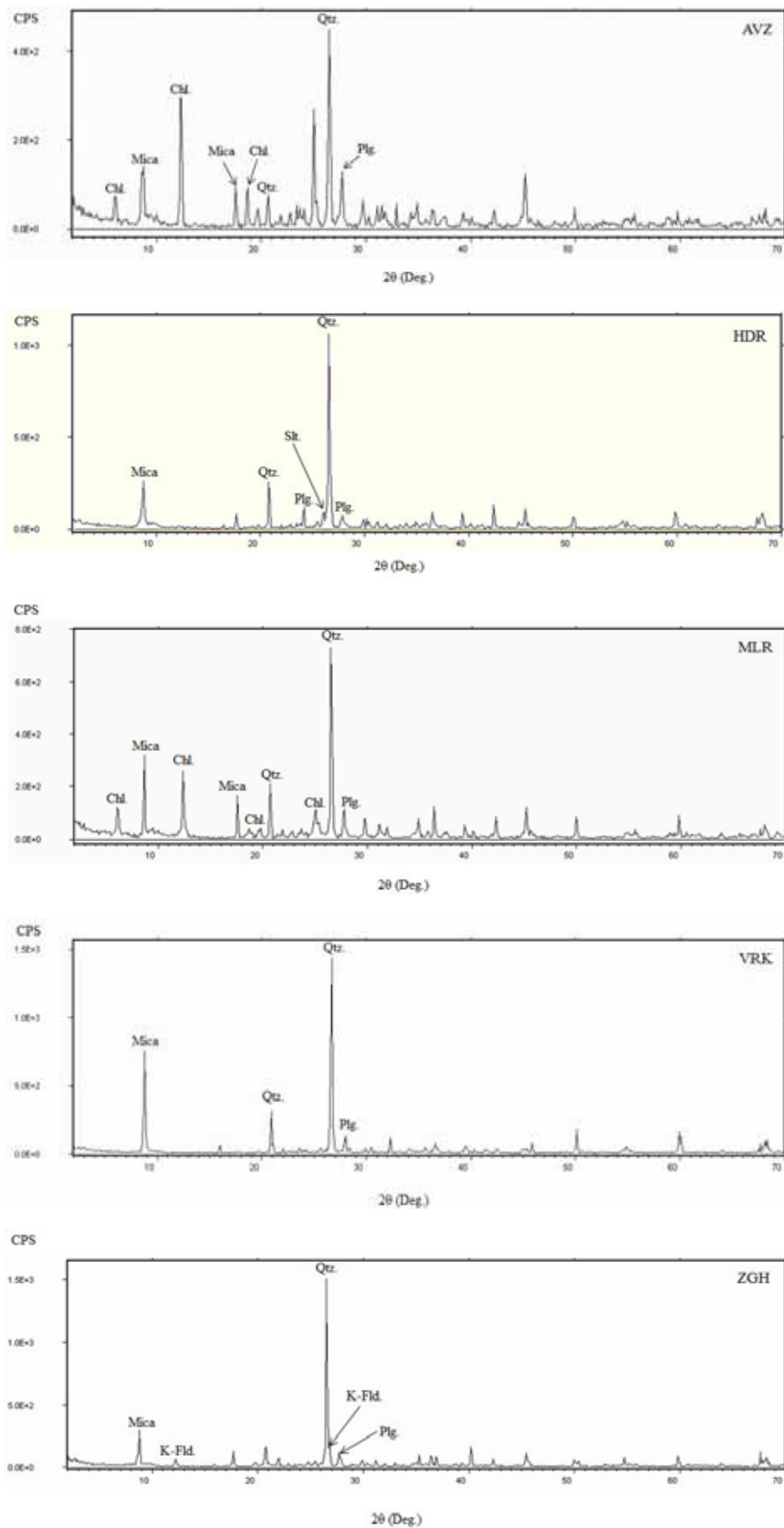
جدول ۱- ویژگی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی سنگ‌های مورد مطالعه

کانی‌های تشکیل دهنده (%)											
نمونه	نام سنگ	کوارتز	فلدسپات	په‌په	مسکونین	گارنت	آندالوزیت	سیلیمانیت	استارولین	کلرین	سایر کانی‌ها
AV Z	فیلیت	۲۰	۱۰	۴۰	۷	-	۳	-	-	۱۲	A.(3%), T.(1%), Z.(1%), P.(3%)
HD R	سیلیمانیت گارنت هورنفلس	۱۶	۹	۳۸	۵	۱۳	۴	۱۳	۱	-	T.(1%)
ML R	اسلیت	۲۰	۱۰	۳۲	۷	-	-	-	-	۳	G.(12%), CM(10%), H(7%)
VR K	آندالوزیت گارنت هورنفلس	۲۰	۱۰	۴۱	۴	۱۰	۶	-	۵	-	T.(1%), Z.(1%)
ZG H	استارولیت آندالوزیت شیست	۲۰	۵	۲	۲۰	-	۱۸	۱۴	۴	-	T.(2%), H.(15%)

: کانی‌های رسی می‌باشند. CM: هماتیت و H: پره‌نیت، P: زیرکن، Z: تورمالین، T: آپاتیت، A: گرافیت، G* در این جدول:



تصویر ۲- عکس‌های میکروسکوپی سنگ‌های مورد مطالعه در دو جهت موازی و عمود بر جهت ناهمسانگردی آنها



تصویر ۳- نمودارهای آزمایش XRD سنگ‌های مورد مطالعه

۴-۲- بررسی ویژگی‌های فیزیکی

ارتفاع و میانگین اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های فیزیکی مورد محاسبه شامل وزن واحد حجم خشک، وزن واحد حجم اشباع، وزن مخصوص، تخلخل و جذب آب می‌باشند که مطابق با روش پیشنهادی آئی‌اس‌آر‌ام (ISRM 1972) تعیین شده‌اند. میانگین نتایج بدست آمده برای هر نمونه در جدول ۲ ارائه شده است.

ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های مورد مطالعه در این پژوهش، با استفاده از ۵ سری آزمایش در ۷ زاویه ناهمسانگردی ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه تعیین شده‌اند. به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی میانگین نمونه‌ها، برای هر نوع سنگ ۳۵ نمونه استوانه‌ای شکل مورد استفاده قرار گرفت. برای هر نمونه استوانه‌ای وزن خشک، وزن اشباع، قطر،

جدول ۲- مقادیر میانگین ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های مورد مطالعه

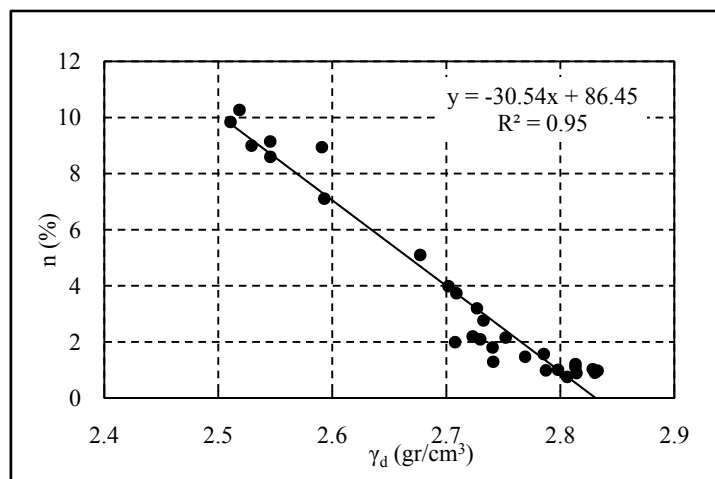
نمونه	وزن واحد حجم خشک (gr/cm ³)	وزن واحد حجم اشباع (gr/cm ³)	وزن مخصوص	تخلخل (%)	جذب آب (%)
AVZ	۲/۷۳	۲/۷۴	۲/۷۷	۱/۷۴	۰/۶۴
HDR	۲/۸۱	۲/۸۲	۲/۸۴	۱/۱۳	۰/۴۰
MLR	۲/۷۱	۲/۷۵	۲/۸۲	۳/۷۶	۱/۳۳
VRK	۲/۷۹	۲/۸۰	۲/۸۲	۱/۱۶	۰/۴۱
ZGH	۲/۵۵	۲/۶۴	۲/۸۰	۸/۹۹	۳/۵۵

تخلخل سنگ‌های مورد مطالعه نیز باعث کاهش وزن واحد حجم و وزن مخصوص و افزایش جذب آب آنها می‌شود (این موضوع در نمونه ZGH قابل مشاهده است). ارتباط بین خواص فیزیکی مختلف که حاصل میانگین ۳۵ نمونه برای هر سنگ می‌باشد، در تصویرهای ۴ تا ۶ ارائه شده است. با توجه به تصویر ۴، ارتباط بین تخلخل و وزن واحد حجم خشک هر پنج نمونه سنگ مورد مطالعه به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$n = 89.39 - 31.65\gamma_d \quad \text{رابطه (۲)}$$

بر این اساس، رابطه بین دو پارامتر فوق به صورت یک رابطه معکوس می‌باشد.

تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از خواص فیزیکی سنگ‌های مورد مطالعه، نشان داد که خواص فیزیکی مختلف با یکدیگر دارای ارتباط معنی داری می‌باشند. این موضوع توسط کیانپور و همکاران (۱۳۹۰) نیز به اثبات رسیده است. خواص فیزیکی از جمله وزن واحد حجم، تحت تأثیر کانی‌های تشکیل دهنده سنگ می‌باشد. بنابراین، هر چه درصد کانی‌های با وزن واحد حجم زیاد در سنگ بیشتر باشد، وزن واحد حجم سنگ نیز بیشتر خواهد بود. این موضوع برای همه نمونه‌های مورد مطالعه به ویژه نمونه‌های HDR و VRK صادق است. در این دو نمونه، حضور کانی‌های دگرگونی با وزن واحد حجم زیاد مانند گارنت، باعث افزایش وزن واحد حجم سنگ شده است. افزایش

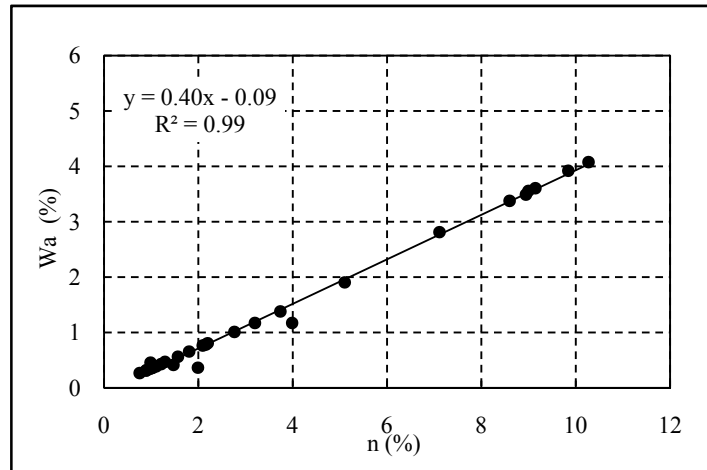


تصویر ۴- رابطه بین تخلخل و وزن واحد حجم خشک سنگ‌های مورد مطالعه

بر اساس تصویر ۵، ارتباط بین جذب آب و تخلخل سنگ‌های مورد مطالعه به صورت رابطه (۳) می‌باشد:

این رابطه نشان می‌دهد که ارتباط بین دو پارامتر مذکور به صورت یک رابطه خطی مستقیم می‌باشد.

$$W_a = 0.40n - 0.08 \quad \text{رابطه (۳)}$$

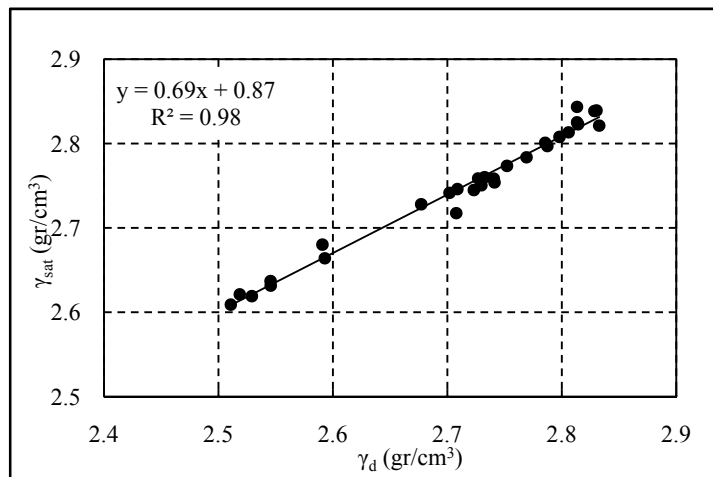


تصویر ۵- رابطه بین جذب آب و تخلخل سنگ‌های مورد مطالعه

بر اساس تصویر ۶، ارتباط بین وزن واحد حجم اشباع و حجم خشک هر پنج نمونه سنگ مورد مطالعه، به صورت رابطه (۴) می‌باشد:

بر اساس رابطه فوق، ارتباط بین دو پارامتر مذکور به صورت مستقیم می‌باشد.

$$\gamma_{sat} = 0.67\gamma_d + 0.92 \quad \text{رابطه (۴)}$$



تصویر ۶- رابطه بین وزن واحد حجم اشباع و حجم خشک سنگ‌های مورد مطالعه

۳-۴- نتایج آزمایش پانچ استوانه‌ای

Punch Test, CPT) استفاده شد. شاخص مورد محاسبه توسط این آزمایش، شاخص پانچ استوانه‌ای (Cylinder Punch Index, CPI) نامیده می‌شود. بدین منظور دستگاه آزمایش پانچ استوانه‌ای، طراحی و ساخته شد (تصویر ۷). برای اعمال نیروی فشاری به نمونه، این دستگاه قابلیت جایگذاری در دستگاه‌های آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت بار نقطه‌ای را دارا می‌باشد.

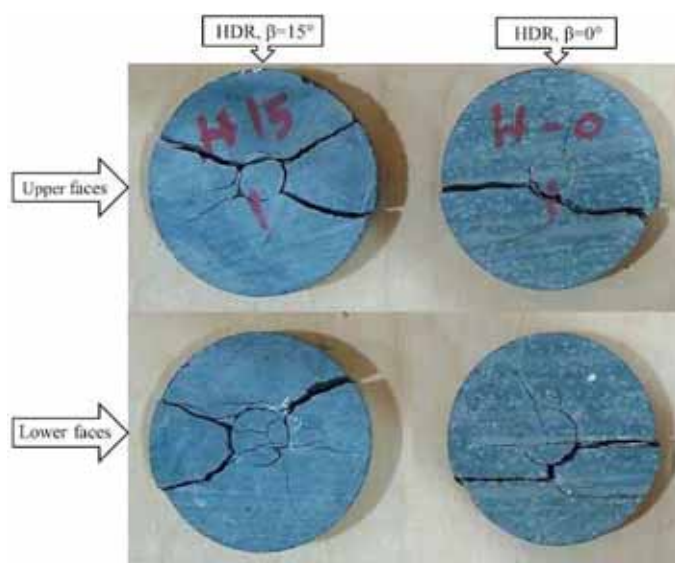
یکی از آزمایش‌های مقاومتی شاخص و کاربردی برای تعیین غیر مستقیم مقاومت سنگ‌ها، آزمایش پانچ بلوکی (Block Punch Test, BPT) می‌باشد که بر روی نمونه‌های قرصی شکل صورت می‌گیرد. در این پژوهش، با الهام از آزمایش پانچ بلوکی، برای بررسی ناهمسانی مقاومت سنگ‌های مورد مطالعه، از آزمایش پانچ استوانه‌ای (Cylinder



تصویر ۷- مراحل استفاده از دستگاه آزمایش پانچ استوانه‌ای ساخته شده در این پژوهش

بصورت محوری و در جهت قائم صورت گیرد. مراحل جایگذاری نمونه قرصی شکل در درون دستگاه آزمایش پانچ استوانه‌ای ساخته شده و جایگذاری آن در درون دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در تصویر ۷ نشان داده شده است. گسیختگی نمونه در حین انجام آزمایش باید به نحوی باشد که استوانه برش بطور کامل تشکیل شده و اثر آن در دو سطح بالایی و زیرین نمونه بخوبی قابل مشاهده باشد (تصویر ۸)، در غیر اینصورت، نتیجه آزمایش مردود می‌باشد.

برای انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای، ابتدا نمونه قرصی شکل که دو سطح آن کاملاً با یکدیگر موازی است، از مغزه‌ها تهیه می‌گردد. سپس نمونه در داخل فک‌های دستگاه گذاشته شده و دو پیچ کناری آن به مقدار یکسان محکم می‌گردد. در ادامه، دستگاه آزمایش در درون دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یا دستگاه مقاومت بار نقطه‌ای جایگذاری می‌شود. در نهایت، نمونه با سرعتی در حدود $0/05$ کیلونیوتن بر ثانیه بارگذاری می‌شود تا در مدت زمان بین 30 تا 60 ثانیه گسیخته گردد (Ulusay et al. 2001). بارگذاری نمونه باید



تصویر ۸- نمونه‌های آزمایش شده توسط دستگاه آزمایش پانچ استوانه‌ای (تصاویر بالا سطح بالایی دو نمونه برش خورده و تصاویر پایین سطح زیرین همان دو نمونه را نشان می‌دهند).

ناهمسانگردی به غیر از زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه، صادق است. در این زاویه، محور بارگذاری نمونه عمود بر سطوح ناهمسانگردی سنگ است، بنابراین گسترش ترک‌های کششی از امتداد سطوح ناهمسانگردی سنگ تبعیت نمی‌کند (تصویر ۹).

تصویر ۹، نمونه‌های قرصی شکل مربوط به نمونه ZGH در زاویه ناهمسانگردی صفر درجه بعد از انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای را نشان می‌دهد. بر این اساس، همه ترک‌های کششی اطراف استوانه پانچ شده در امتداد سطوح ناهمسانگردی نمونه‌ها، تمایل به گسترش دارند. این موضوع برای همه نمونه‌های مورد مطالعه در همه زوایای



تصویر ۹- گسترش ترک‌های کششی بعد از انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای در امتداد ناهمسانگردی سنگ (نمونه ZGH در زاویه ناهمسانگردی صفر درجه)



تصویر ۱۰- گسترش ترک‌های کششی بعد از انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای در همه جهات بوده و از امتداد ناهمسانگردی سنگ تبعیت نمی‌نماید (نمونه VRK در زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه).

جانبی استوانه برش تالبه مغزه قرصی شکل نمونه مورد آزمایش، یکسان است. در آزمایش پانچ بلوکی این فاصله یکسان نبوده، و این موضوع بر نتایج آزمایش تأثیر گذار خواهد بود. چرخش احتمالی نمونه ناهمسانگرد حول نقطه مرکزی آن در آزمایش پانچ استوانه‌ای، بر نتیجه آزمایش بی‌تأثیر بوده ولی در آزمایش پانچ بلوکی اینگونه نمی‌باشد. توزیع تنش در سطح نمونه در این آزمایش نسبت به آزمایش پانچ بلوکی از یکنواختی بیشتری برخوردار می‌باشد.

مزایای آزمایش پانچ استوانه‌ای نسبت به آزمایش بلوکی به شرح زیر می‌باشد. دستگاه آزمایش پانچ استوانه‌ای نسبت به آزمایش پانچ بلوکی، کوچکتر و حمل و نقل آن برای استفاده در صحرا آسانتر می‌باشد. این دستگاه برای گسیختن نمونه، نیروی کمتری لازم دارد. سطح برش نمونه در آزمایش پانچ استوانه‌ای، سطح جانبی یک استوانه می‌باشد. این سطح از یکنواختی بیشتری نسبت به سطح برش آزمایش پانچ بلوکی برخوردار است. در آزمایش پانچ استوانه‌ای، فاصله سطح

مقدار عددی شاخص پانچ استوانه‌ای (CPI)، تابعی از زاویه ناهمسانگردی سنگ (β) می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده و رسم منحنی شاخص پانچ استوانه‌ای در مقابل زاویه ناهمسانگردی (CPI- β)، مقدار این شاخص برای همه نمونه‌های مورد مطالعه، در زاویه ناهمسانگردی صفر درجه دارای کمترین مقدار و در زاویه ۹۰ درجه دارای بیشترین مقدار است (تصویر ۱۱). همچنین نرخ افزایش مقدار CPI در زوایای صفر تا ۱۵ درجه بیشتر از سایر زوایا می‌باشد. به عبارت دیگر، شیب این منحنی در زوایای ناهمسانگردی بین صفر تا ۱۵ درجه دارای بیشترین مقدار است. با افزایش زاویه ناهمسانگردی از صفر تا ۹۰ درجه، نرخ افزایش CPI و شیب منحنی‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع، بخصوص برای نمونه HDR واضح‌تر می‌باشد. پس از تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای بر روی سنگ‌های ناهمسانگرد مورد مطالعه در ۷ زاویه ناهمسانگردی مختلف و رسم نمودارهای مورد نظر، رابطه (۶) برای تعیین شاخص پانچ استوانه‌ای در هر زاویه دلخواه ($CPI_{\beta=i}$) پیشنهاد می‌شود:

$$CPI_{\beta=i} = CPI_{\beta=90} - K(1 - \sin\beta) \quad \text{رابطه (۶)}$$

اهمیت این رابطه آن است که با انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای در زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه و محاسبه $CPI_{\beta=90}$ ، می‌توان مقدار CPI را در هر زاویه دیگری بین صفر تا ۹۰ درجه تعیین کرد. لازم به ذکر است که برای انجام آزمایش پانچ استوانه‌ای در زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه، نیازی به مغزه‌گیری از سنگ نمی‌باشد. زیرا اینگونه سنگ‌ها همیشه در امتداد سطوح ناهمسانگردی خود شکسته می‌شوند و با انجام آزمایش مذکور بر روی قطعات شکسته شده سنگ، می‌توان مقدار $CPI_{\beta=90}$ را تعیین نمود. در این رابطه، K اختلاف بین شاخص پانچ استوانه‌ای در زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه و هر زاویه دیگر است ($K = CPI_{\beta=90} - CPI_{\beta=i}$). با رسم نمودار $K-\beta$ ، رابطه استخراج شده برای تعیین مقدار این شاخص در زوایای ناهمسانگردی مختلف، بصورت رابطه (۷) می‌باشد:

$$K = 2.35 - (0.03 \times \beta) \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه، β زاویه ناهمسانگردی بر حسب درجه می‌باشد. مقادیر محاسبه شده ضریب K برای زوایای مختلف بین صفر تا ۹۰ درجه با اختلاف ۱۵ درجه در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس رابطه ۵، مقادیر شاخص پانچ استوانه‌ای به منظور مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، برای همه نمونه‌های مورد مطالعه، در ۷ زاویه ناهمسانگردی مختلف محاسبه شد. تصویر ۱۲، ارتباط بین مقادیر شاخص پانچ استوانه‌ای آزمایش شده و محاسبه شده از طریق رابطه (۵) در ۷ زاویه ناهمسانگردی بین صفر تا ۹۰ درجه با اختلاف ۱۵

مشابه آزمایش پانچ بلوکی، در آزمایش پانچ استوانه‌ای نیز نیازی به تصحیح شاخص محاسبه شده (CPI) نمی‌باشد، زیرا قطر استوانه پانچ شده همواره ثابت و مستقل از قطر نمونه است.

برای تعیین شاخص پانچ استوانه‌ای (CPI)، ابتدا قبل از انجام آزمایش، قطر و ضخامت نمونه اندازه‌گیری می‌شود. پس از انجام آزمایش، نیروی لازم برای گسیختگی نمونه از روی دستگاه خوانده می‌شود. با مشخص بودن قطر میله بارگذاری نمونه، شاخص پانچ استوانه‌ای (CPI) را می‌توان از طریق رابطه (۵) محاسبه نمود.

$$CPI = \frac{P}{\pi Dt} \quad \text{رابطه (۵)}$$

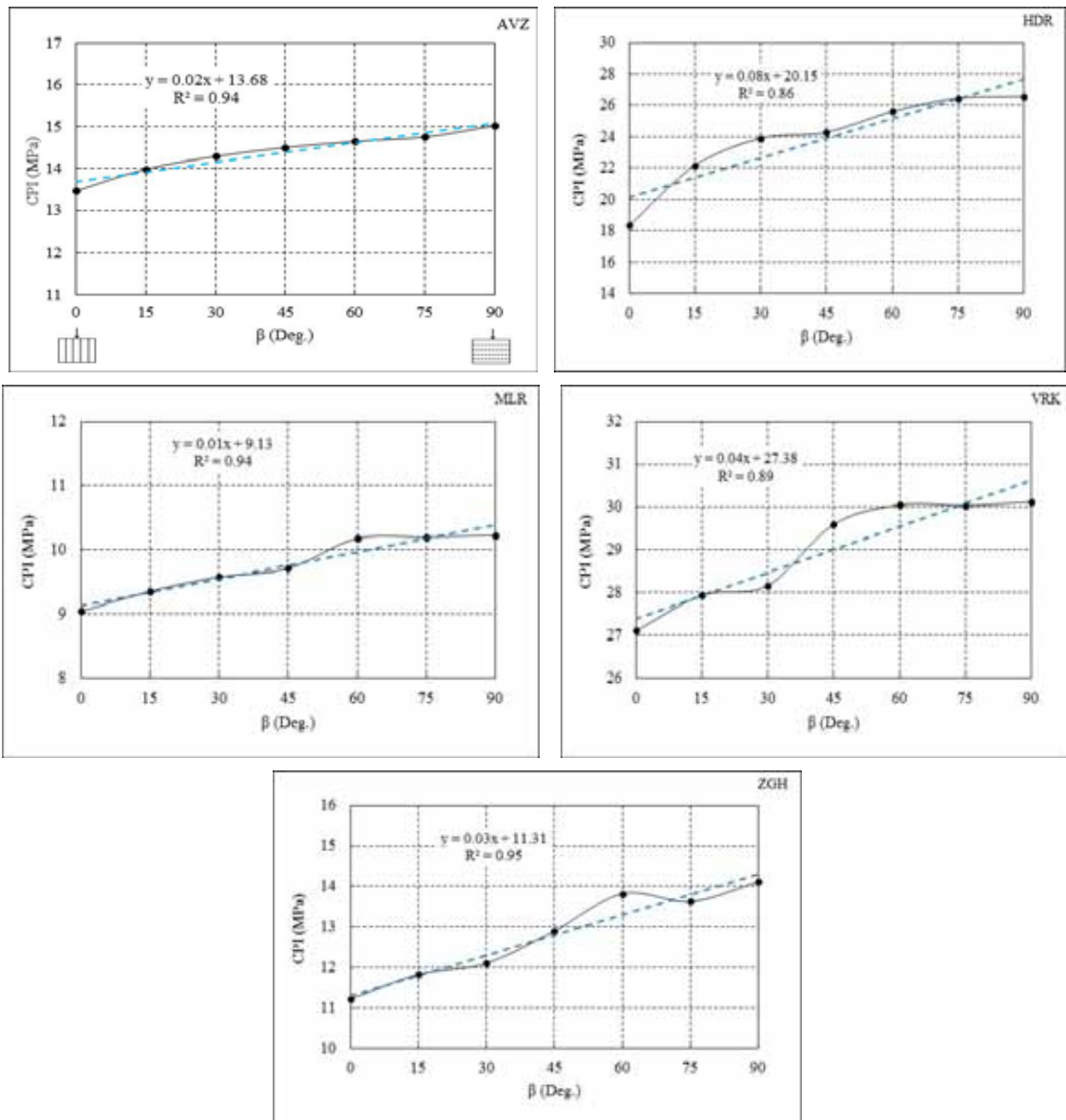
در این رابطه، CPI مقاومت برشی سطح جانبی استوانه برش در جهت موازی با محور بارگذاری، P حداکثر نیروی اعمال شده به نمونه بر حسب نیوتن (در لحظه گسیختگی حاصل می‌شود)، D قطر استوانه برش خورده و t ضخامت نمونه بر حسب میلیمتر می‌باشد. بر این اساس، مقدار CPI بر حسب مگاپاسکال بدست خواهد آمد. مقادیر CPI محاسبه شده برای سنگ‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

شاخص ناهمسانی پانچ استوانه‌ای (Punch Anisotropy Index, PAI) به عنوان معیاری برای سنجش شدت ناهمسانگردی سنگ‌ها در نظر گرفته شده است. این شاخص از تقسیم شاخص پانچ استوانه‌ای حداکثر (در زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه) به مقدار حداقل آن (در زاویه ناهمسانگردی صفر درجه) حاصل می‌شود. مقدار عددی این شاخص برای سنگ‌های همسانگرد معادل واحد است و هرچه مقدار آن بزرگتر باشد، درجه ناهمسانگردی سنگ نیز بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، مقدار PAI برای نمونه HDR دارای بیشترین مقدار (۱/۴۵) و برای نمونه VRK دارای کمترین مقدار (۱/۱۱) می‌باشد.

جدول ۳- مقادیر CPI برای سنگ‌های مورد مطالعه

ZGH	CPI (MPa)				β (Deg.)
	VRK	MLR	HDR	AVZ	
۱۱/۲۲	۲۷/۱۱	۹/۰۴	۱۸/۳۸	۱۳/۴۷	۰
۱۱/۸۳	۲۷/۹۴	۹/۳۵	۲۲/۱۶	۱۳/۹۹	۱۵
۱۲/۱۱	۲۸/۱۷	۹/۵۸	۲۳/۹۱	۱۴/۲۹	۳۰
۱۲/۹۰	۲۹/۶۰	۹/۷۱	۲۴/۳۰	۱۴/۵۰	۴۵
۱۳/۸۲	۳۰/۰۵	۱۰/۱۸	۲۵/۶۰	۱۴/۶۵	۶۰
۱۳/۶۳	۳۰/۰۴	۱۰/۲۰	۲۶/۴۶	۱۴/۷۵	۷۵
۱۴/۱۱	۳۰/۱۲	۱۰/۲۳	۲۶/۵۷	۱۵/۰۲	۹۰
۱/۲۶	۱/۱۱	۱/۱۳	۱/۴۵	۱/۱۲	PAI

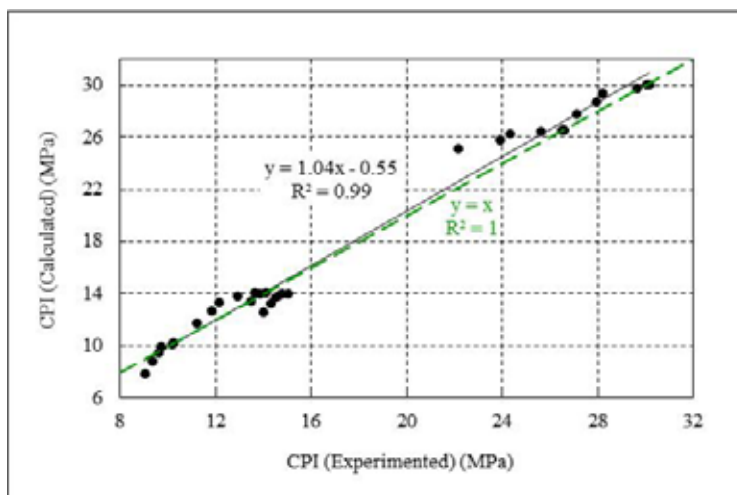
درجه را نمایش می‌دهد. بر اساس ضریب رگرسیونی (R²) بالای بین دو پارامتر مذکور و انطباق بسیار خوب این منحنی با خط ۴۵ درجه اعتماد می‌باشد. (X=Y)، نتایج حاصل از این رابطه دقت بالایی داشته و کاملاً قابل



تصویر ۱۱- ارتباط بین شاخص پنج استوانه‌ای با زاویه ناهمسانگردی برای سنگ‌های مورد مطالعه

جدول ۴- مقادیر ضریب K در زوایای ناهمسانگردی مختلف

مقدار ضریب K	زاویه ناهمسانگردی β (درجه)
۲/۳۵	۰
۱/۹۰	۱۵
۱/۴۵	۳۰
۱/۰۰	۴۵
۰/۵۵	۶۰
۰/۱۰	۷۵
۰/۰۰	۹۰



تصویر ۱۲- ارتباط بین شاخص پانچ استوانه‌ای آزمایش شده و محاسبه شده برای سنگ‌های مورد مطالعه

۵- نتیجه‌گیری

MLR در زاویه ناهمسانگردی صفر درجه، معادل ۹/۰۴ مگاپاسکال و مقدار حداکثر آن برای نمونه VRK در زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه، معادل ۳۰/۱۲ مگاپاسکال بدست آمد.

شاخص ناهمسانی پانچ (PAI)، معیار مناسبی برای تعیین شدت ناهمسانگردی سنگ‌های مختلف است. مقدار این شاخص برای سنگ‌های همسانگرد برابر یک می‌باشد که با افزایش شدت ناهمسانگردی مقدار آن نیز افزایش می‌یابد. در بین نمونه‌های مورد مطالعه، نمونه VRK دارای کمترین مقدار PAI (۱/۱۱) و نمونه HDR دارای بیشترین مقدار (۱/۴۵) می‌باشد.

مراجع

کیانپور، م. ارومیه‌ای، ع. و نیکودل، م. ر.، ۱۳۹۰، "بررسی روش‌های غیر مستقیم تخمین مقاومت تراکمی شیل‌های سازند شمشک"، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۷ (۱): ۹۰-۷۷.

Behrestaghi, M. H. N., Rao, K. S. & Ramamurthy, T., 1996, "Engineering geological and geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India", *Engineering Geology*, Vol. 44(1-4): 183-201.

Chen, C.S., Pan, E. & Amadei, B., 1998, "Determination of Deformability and Tensile Strength of Anisotropic Rock Using Brazilian Tests", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 35 (1): 43-61.

G.S.I., (Geological Society of Iran), 1977, "Geological quadrangle map of Iran", No. D6, Scale 1:250000, Printed by Offset Press Inc. Tehran.

Gokceoglu, C. & Aksoy, H., 2000, "New approaches to the characterization of clay-bearing, densely jointed and weak rock masses", *Engineering Geology*, Vol. 58 (1): 1-23.

ISRM, 1972, "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related

بر اساس مطالعه کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی، ناهمسانگردی سنگ‌های مورد مطالعه، ناشی از حضور کانی‌های جهت یافته و صفحات ضعیف نظیر کلیواژ، شلیستوزیته، فولیاسیون و فابریک نواری می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که بین ویژگی‌های فیزیکی مختلف ارتباط معنی داری وجود دارد. بنابراین، با افزایش تخلخل سنگ‌های مورد مطالعه، وزن واحد حجم خشک و حجم اشباع و وزن مخصوص کاهش و جذب آب آنها افزایش می‌یابد. بر این اساس، نمونه HDR کمترین مقدار تخلخل و جذب آب و بیشترین مقدار وزن واحد حجم خشک، وزن واحد حجم اشباع و وزن مخصوص را در بین نمونه‌های مورد مطالعه دارا می‌باشد. نمونه ZGH نیز بیشترین مقدار تخلخل و جذب آب و کمترین مقدار وزن واحد حجم خشک، وزن واحد حجم اشباع و وزن مخصوص را دارا می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصل، آزمایش پانچ استوانه‌ای از پتانسیل بالایی جهت مطالعه ویژگی‌های مقاومتی این گروه از سنگ‌ها برخوردار است. در این آزمایش، الگوی گسیختگی و نحوه گسترش ترک‌های کششی ایجاد شده در نمونه، توسط سطوح ناهمسانگردی سنگ کنترل می‌شوند. همچنین مقدار شاخص پانچ استوانه‌ای (CPI)، به زاویه ناهمسانگردی سنگ وابسته می‌باشد. این شاخص در زاویه ناهمسانگردی صفر درجه دارای کمترین مقدار و در زاویه ناهمسانگردی ۹۰ درجه دارای بیشترین مقدار است. همچنین با افزایش زاویه ناهمسانگردی از صفر تا ۹۰ درجه، مقدار این شاخص نیز افزایش می‌یابد. نرخ افزایش این شاخص در زوایای بین صفر تا ۱۵ درجه بیشتر بوده که تا زاویه ۹۰ درجه به تدریج نرخ آن کاهش می‌یابد. در بین نمونه‌های مورد مطالعه، مقدار حداقل CPI برای نمونه

properties and swelling and slake-durability index properties", *Document No. 2*: 36 pp.

ISRM, 1978, "Suggested methods for determining petrographic description of rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 15: 43-45.

Karakul, H., Ulusay, R. & Isik, N. S., 2010, "Empirical models and numerical analysis for assessing strength anisotropy based on block punch index and uniaxial compression tests", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 47 (4): 657-65.

Mishra, D. A. & Basu, A., 2012, "Use of the block punch test to predict the compressive and tensile strengths of rocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 51: 119-127.

Ramamurthy, T., Rao, G. V. & Singh, J., 1993, "Engineering behavior of phyllites", *Engineering Geology*, Vol. 33 (3): 209-225.

van der Schrier, J. S., 1988, "The block punch index test", *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 38 (1): 121-126.

Sonmez, H. & Tunusluoglu, C., 2008, "New considerations on the use of block punch index for predicting the uniaxial compressive strength of rock material", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 45: 1007-1014.

Sulukcu, S. & Ulusay, R., 2001, "Evaluation of the block punch index test with particular reference to the size effect, failure mechanism and its effectiveness in predicting rock strength", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 38: 1091-1111.

Ulusay, R. & Gokceoglu, C., 1997, "The modified block punch index test", *Can Geotech. J.*, Vol. 34: 991-1001.

Ulusay, R. & Gokceoglu, C., 1988, "An experimental study on the size effect in block punch index test", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 35 (4-5): 628-629. (In: *NARMS'98 ISRM International Symposium. Cancun, Mexico, Paper No. 008*).

Ulusay, R. & Gokceoglu, C., 1999, "A new test procedure for the determination of the Block Punch Index and its possible uses in rock engineering", *ISRM News J.*, Vol.6 (1): 50-54.

Ulusay, R., Gokceoglu, C. & Sulukcu, S., 2001, "Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI)", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 38 (8): 1113-1119.

Zhang, X. P., Wong, L. N. Y., Wang, S. J. & Han, G. Y., 2011, "Engineering properties of quartz mica schist", *Eng. Geology*, Vol. 121 (3-4): 135-149.