



بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ مخزنی سازند شوربچه در

یکی از چاه‌های واقع در حوضه کپه داغ (شمال خاور ایران)

مسن باقری^{۱*}، سیدهاشم طباطبایی رئیس^۲، لایلا فضل^۳ و فرامرز دولتی ارده‌بانی^۴

۱) کارشناس ارشد زمین‌شناسی نفت دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، bagheri6464@yahoo.com

۲) دانشیار، اداره ژئوفیزیک، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، dr_tabatabaee@yahoo.com

۳) استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دماوند، fazli52@yahoo.com

۴) استاد، دانشکده معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، fdoulati@ut.ac.ir

(* عهده‌دار مکاتبات)

دریافت: ۹۱/۴/۱۰؛ دریافت اصلاح شده: ۹۲/۵/۶؛ پذیرش: ۹۲/۵/۷؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۲/۶/۱۵

پیکیده

سازند شوربچه یکی از سازندهای مخزنی گازی واقع در حوضه کپه داغ شمال خاور ایران می‌باشد که جزء سازندهای بسیار سخت از لحاظ حفاری است. شناخت خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این سازند سبب برنامه ریزی دقیق‌تری برای انجام عملیات حفاری آن خواهد شد و می‌توان از صرف هزینه‌های بالای حفاری در برخورد با این سازند تا حدودی جلوگیری نمود. در این مطالعه با انجام آزمایشات مقاومت فشاری سه محوری، آزمایش تخلخل (با اشباع آب و گاز هلیوم) و شاخص سایش سرشار (CAI) بر روی نمونه‌های مغزه گرفته شده از این سازند و همچنین تهیه مقاطع نازک از این نمونه‌ها و تعیین کانی‌شناسی و بافت آنها، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این سازند مورد مطالعه قرار گرفت که در نهایت مشخص شد این نمونه‌ها حاوی کانی کوارتز فراوان و دارای بافت ساب آرکوز می‌باشند. همچنین، مقاومت فشاری این نمونه‌ها تحت آزمایش سه محوره در سه سطح تنش ۵، ۱۰ و ۱۵ (Mpa) بررسی و پارامترهای مقاومت برشی C و Φ برای این نمونه‌ها به ترتیب ۱۵/۳ مگاپاسکال و ۵۳/۷۹ درجه بدست آمد. بعلاوه، آزمایشات بیشتر نشان می‌دهد که این نمونه‌ها از لحاظ سایشی با توجه به میزان کوارتز بالا، در محدوده سنگ‌های خیلی ساینده قرار دارند. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در طراحی روش مناسب حفاری سازند شوربچه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سرعت حفاری، مقاومت برشی، مقاومت فشاری سه محوری، سایش سرشار.

۱- مقدمه

مشکلاتی برای دستگاه حفاری، مته و ... ایجاد می‌شود. در نتیجه پیشروی در این سازندها کند شده و یا با پیشروی کمتری در روز مواجه خواهیم شد. در این حالت سرعت حفاری پایین می‌آید و متقابلاً هزینه‌ها هم افزایش پیدا می‌کند. بطور عمده متغیرها در عملیات حفاری به خصوصیات سازند وابسته است. متغیرهای حفاری

تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، امری حیاتی جهت برنامه‌ریزی عملیات حفاری می‌باشد. در حین عملیات حفاری با توجه به هزینه‌های سنگین آن، در هنگام برخورد با سازندهای بسیار سخت، در صورت عدم اطلاعات کافی درباره خصوصیات این لایه‌ها،

لایه‌های سخت مخزنی (مخزن گازی) در این حوضه می‌باشد، مشکل اصلی حفاری و زمان‌بری در هر عملیات حفاری بشمار می‌رود. در تصویر ۱ علاوه بر مشخص کردن لیتولوژی سازندهای حفاری شده در میدان خانگیران، قابلیت حفاری این سازندها برحسب فوت بر ساعت تعیین شده است که ملاحظه می‌شود پایین‌ترین نرخ حفاری در این میدان متعلق به سازند شوربجه می‌باشد.

پارامترهایی از قبیل وزن روی مته، سرعت دوران مته، وزن گل حفاری و ... می‌باشند. هرچند که خصوصیات سنگ و شرایط زمین شناسی، پارامترهای غیرقابل کنترل هستند (McGregor 1967, Beste et al. 2007). با این حال نرخ نفوذ مطلوب، انتخاب دستگاه حفاری مناسب، ساختار پتروگرافی سنگ، سختی آن، سایش، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ در مرحله اول توسط مطالعات آزمایشگاهی تعیین می‌گردد (Bilim 2011). در حوضه کپه داغ، سازند شوربجه که جزء

سازند	قابلیت حفاری ft/hr (بهاری، ۱۳۸۶)	حد زمانی	لیتولوژی	توصیف
خانگیران	۵۰.۱	پالتوسن فوقانی تا اواخر انوسن .		شیل آهکی سبز- خاکستری در قانده ماسه سنگ
چهل کمان	۱۱	پالتوسن		کربناته با میان لایه های شیل و مارن آهکی و تا حدودی ماسه سنگ
کلات	۲۰	ماستریشین		آهک ماسه ای- شیل آهکی و لایه های نازک ماسه سنگ
نیزار	۸.۴	ماستریشین		ماسه سنگ ضخیم لایه و شیل
آبلاغ	۱۶.۷	ساتونین - کامپانین تا ماستریشین زیرین		شیل آهکی خاکستری و میان لایه های مارن
آبدراز	۷.۲	تورونین- کونیاسین		شیل خاکستری روشن تا سفید و آهک خاکستری
آیتامیر	۱۰	سنومانین		شیل و ماسه سنگ گلوکونیتی سبز
سنگانه	۷.۱	آلبین		شیل خاکستری تا سبز همراه با میان لایه های سیلت و ماسه سنگ
سرچشمه	۴.۷	آپسین		شیل و مارن خاکستری همراه با میان لایه های آهک
شوربجه	۳.۹	تنوکومین		تناوب شیل و رس قهوه ای- قرمز همراه با ماسه سنگ و کنگلومرا
مزدوران	۴.۶	آکسفوردین- کیمریچین		آهک همراه با میان لایه هایی از مارن و شیل

تصویر ۱- مشخصات سازندهای حفاری شده و قابلیت حفاری آنها در میدان خانگیران

لذا پایین آمدن تعداد روزهای کارکرد دکل حفاری و سریع‌تر رسیدن به لایه هدف با حفظ شرایط ایمنی دکل، تا حد زیادی از هزینه‌های این بخش خواهد کاست. این امر زمانی امکان پذیر است که با آگاهی از خصوصیات لایه‌های درون زمین، یک برنامه‌ریزی دقیق را جهت بالا بردن نرخ نفوذ و سرعت حفاری داشته باشند.

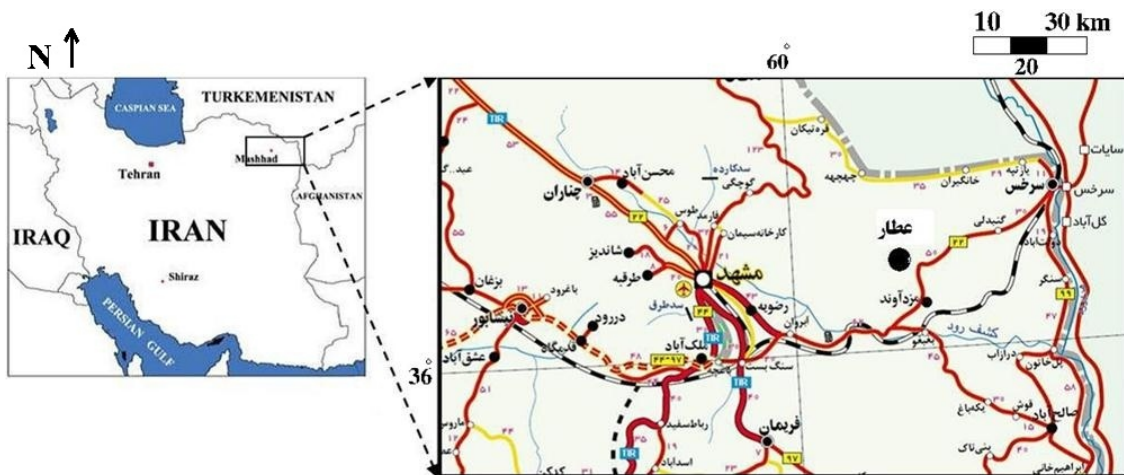
۲- زمین شناسی و موقعیت جغرافیایی نامیه مورد مطالعه

حوضه درون قاره‌ای کپه داغ در شمال شرق ایران، جنوب غرب ترکمنستان و شمال افغانستان پس از کوهزایی سیمیرین پیشین و بسته شدن پالتوتیس بین دو صفحه ایران و توران تشکیل شده است (Buryakovsky 2001, Alavi et al. 1997, Ruttner 1991, Berberian & King 1981). حوضه کپه داغ در ژوراسیک زیرین - میانی طی یک رژیم کششی شکل گرفته است (Garzanti & Gaetani 2002). بیش از ۶۰۰۰ متر از رسوبات این حوضه در محدوده سنی ژوراسیک میانی تا میوسن نهشته شده‌اند (Afsharharb 1979) و به پنج سکانس اصلی پیشرونده- پسرورنده اختصاص داده می‌شوند (Moussaviharami & Bernner 1992). موقعیت جغرافیایی این حوضه بین ۳۰'، ۳۵° تا ۱۵'، ۳۸° عرض شمالی و ۰'، ۵۴° تا ۱۳'، ۶۱° طول شرقی قرار دارد. وسعت آن ۵۵۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد که ۳/۳ مساحت کل کشور را به خود اختصاص می‌دهد. این حوضه دومین حوضه هیدروکربنی ایران است (کاوسی ۱۳۸۸ (تصویر ۲)).

در نقاط زیادی از کپه داغ به جز پایانه باختری آن (نواحی گنبد کاووس) سنگ آهک‌های ژوراسیک بالا (سازند مزدوران) با ردیف آواری سرخ رنگی پوشیده می‌شود که از آن به نام سازند شوربجه یاد می‌شود (افشارحرب ۱۳۷۳).

تاکنون مطالعات زیادی بر روی خصوصیات سازند شوربجه انجام شده است. موسوی- حرمی و برنر (Moussaviharami & Brenner 1992, 1993) روی تاریخچه دیانزنی رسوبات سازند شوربجه و همچنین روی خصوصیات مخزنی این سازند مطالعاتی انجام دادند. موسوی حرمی (۱۳۶۶) محیط رسوبی سازند شوربجه را در شرق کپه داغ مورد مطالعه قرار داده است. اخوان و همکارانش (۱۳۸۰) بر روی سیالات منفذی سازند شوربجه با استفاده از نمودارهای ژئوفیزیکی مطالعاتی را انجام داده‌اند. بهاری (۱۳۸۶) ضرابی را برای مدل نرخ نفوذ بورگوینه و یانگ جهت پیش‌بینی سرعت حفاری در سازندهای مختلف میدان خانگیران محاسبه نموده است.

نجفی و همکارانش (۱۳۸۷) سنگ چینه‌شناسی سازند شوربجه را در مقطع رادکان- بارو مورد مطالعه قرار داده است. جمالی و همکارانش (۱۳۸۹) بر روی رخساره‌ها و محیط رسوبی سازند شوربجه در برش حمام قلعه مطالعاتی انجام داده‌اند ولی تاکنون خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این سازند جهت برنامه‌ریزی‌های مناسب برای رفع مشکل زمان‌بری حفاری آن انجام نشده است. آگاهی از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سازند شوربجه، سبب برنامه‌ریزی بهتری برای مقابله با این سازند در حین حفاری خواهد شد. از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر سرعت حفاری می‌توان به زایش و منشأ تشکیل سنگ‌ها، سختی سنگ، بافت سنگ (شکل و اندازه دانه‌های سنگ)، تخلخل، چگالی، ساینده‌گی، الاستیسیته و پلاستیسیته، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سفتی سنگ، RQD و ویژگی‌های توده سنگ (درزه، شکاف و لایه‌بندی) اشاره کرد (Hoseinie et al. 2008). از بین ویژگی‌های ماده سنگ، مقاومت فشاری، ساینده‌گی و سختی از اهمیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها برخوردار می‌باشند. از آنجایی که بیش از نیمی از هزینه‌ها جهت استحصال هیدروکربن، صرف عملیات حفاری چاه‌ها می‌شود،



تصویر ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه واقع در قسمت شرقی ناحیه کپه داغ

آزمایش تعیین تخلخل با گاز هلیوم که توسط اداره مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران در دسترس قرار گرفته بود مقایسه گردید. در نهایت نیز آزمون شاخص سایش سرشار (CAI) بر روی دو نمونه (برای هر نمونه ۵ آزمایش) توسط اولین دستگاه ساخته شده ایران در دانشکده فنی دانشگاه تهران انجام شد.

۳-۲- بررسی کانی شناسی و بافتی نمونه ها

تأثیر خصوصیات بافتی روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، سال‌های زیادی است که مورد مطالعه قرار گرفته است و ارتباط نزدیکی بین این پارامترها وجود دارد (Ozturk et al. 2004). با توجه به مطالعات کانی‌شناسی و بافتی نمونه‌های اخذ شده از این سازند توسط تهیه مقاطع نازک (تصویر ۳) و استفاده از میکروسکوپ الکترونی، درصد کانی کوارتز این نمونه‌ها بیش از ۷۵ درصد تخمین زده شد که همراه با کانی فلدسپات، کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این نمونه‌ها می‌باشند. اطراف این کانی‌ها را سیمان سیلیسی فرا گرفته است. همچنین، از پدیده‌های قابل مشاهده در این مقاطع، سوسوریتی شدن کانی پلاژیوکلاز می‌باشد یا عبارتی پلاژیوکلاز به مسکوویت و بیوتیت تبدیل می‌شود که در نهایت بافت رسوبی این نمونه‌ها بر اساس مطالعه مقاطع نازک و بر اساس طبقه بندی فولک (۱۹۷۴)، ساب آرکوز شناخته شد.

۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری سه مموری (TCS)

از آنجایی که سنگ‌های پوسته زمین را معمولاً سنگ‌های اطراف محاصره کرده اند، بر هر بخش کوچک آنها یک فشار جانبی اعمال می‌شود. بنابراین هر بخش (المان) در موقعیت فشاری سه محوره (سه جانبه) قرار دارد، بنابراین برای پی بردن به رفتار واقعی سنگ در مقابل بارهای وارده در محل، اندازه گیری مقاومت فشاری سه محوره آنها اهمیت بسزایی دارد (Vutukuri & Katsuyama 1994). این آزمایش برای تعیین مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای سنگ تحت فشار سه محوری به کار می‌رود و در واقع شبیه‌سازی شرایط واقعی سنگ در محل می‌باشد (فهمی‌فر و سروش ۱۳۸۰). مقاومت فشاری و قابلیت حفاری بطور تجربی و از طریق انجام آزمایش در اوایل دهه ۱۹۶۰ به یکدیگر ارتباط داده شده‌اند. هرچند که مقاومت فشاری باید به عنوان یک تابع از میزان تنش جانبی توصیف شود، این مفهوم که مقاومت فشاری با افزایش تنش جانبی افزایش می‌یابد به خوبی شناخته شده و به سادگی با معیار شکست موهر - کلمب قابل توصیف می‌باشد (Spar et al. 1995). آنالیز فرآیند شکست سنگ (RFPA) بعنوان ابزاری از سال ۱۹۹۵ ارائه شده است (Tang & Tang 2011). بررسی شکست

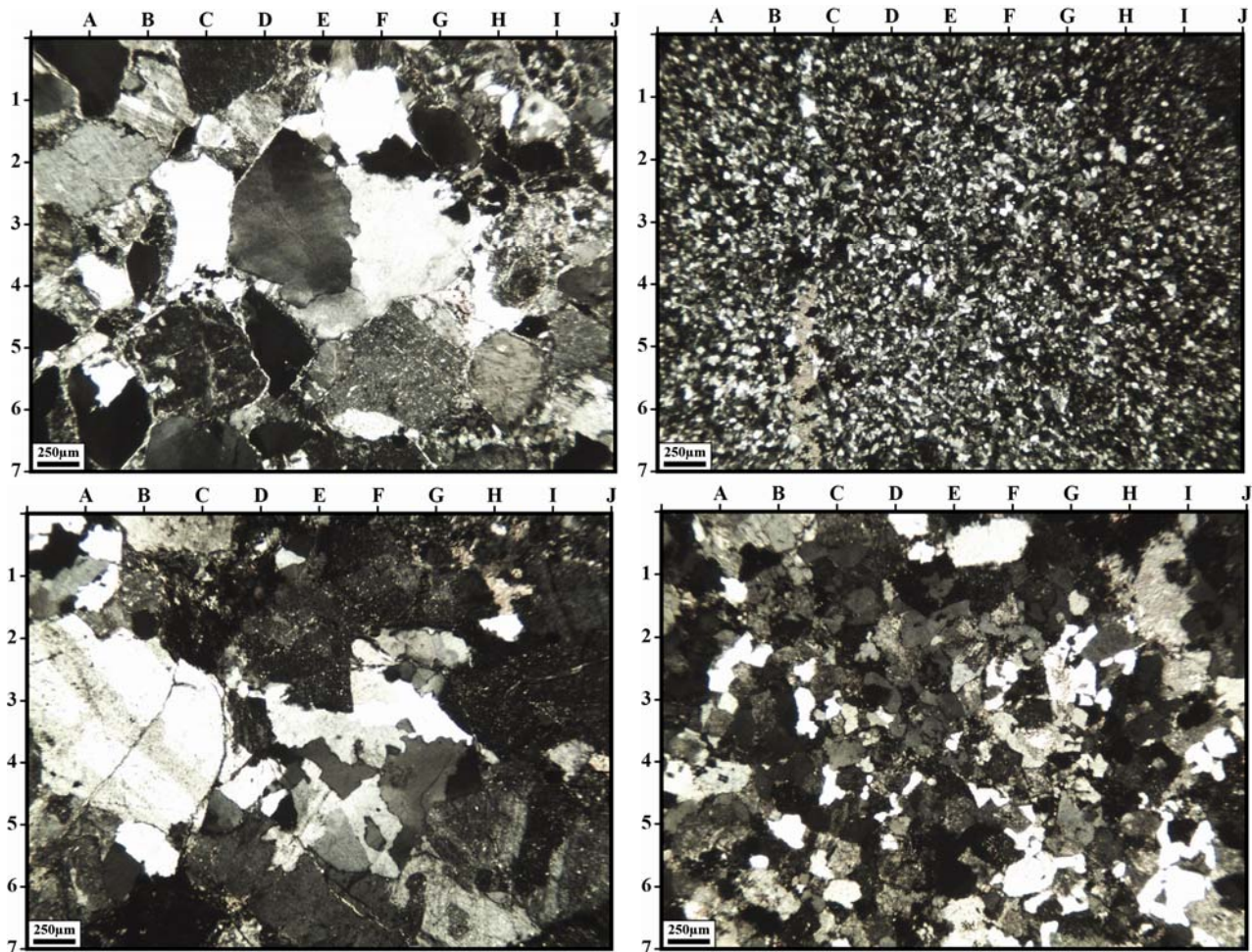
گاز در کربنات‌های سازند مزدوران (ژوراسیک بالایی) و سیلیسی-آواری‌های سازند شوربجه (نئوکومین) در این حوضه وجود دارد. بخش شرقی این حوضه توسط دریای اپی کانتیننتال اواخر ژوراسیک تا اوائل کرتاسه پوشیده شده و در همین زمان دریا به سمت شمال غرب عقب نشینی کرد. نتیجه این فاز عقب‌نشینی در ستون چینه‌شناسی این حوضه، تشکیل باندهای قرمز رنگ ضخیمی است که در محیط رودخانه‌ای Fluvial رسوب کرده‌اند، و بنام سازند شوربجه ثبت شده است. افشارحرب (۱۳۷۳) سازند شوربجه را در محل برش الگو (دره خور) به سه بخش آواری تخیری زیرین، کربناتی تخیری میانی و بخش آواری بالایی معرفی کرده است. تجزیه و تحلیل رسوب‌شناسی این رسوبات پس رونده نشان می‌دهد که رسوبات دانه درشت‌تر مربوط به بخش پائینی و میانی و به شکل توده‌های صفحه مانند در یک سیستم رودخانه‌ای بریده بریده دانه درشت کم انحنای (Low sinuosity coarse-grained braided stream system) رسوب کرده‌اند. بخش بالایی از رسوبات دانه ریزتر که در یک سیستم رودخانه مئاندری با زاویه شیب کم بنام رسوبات پوینت بار (Point Bar)، تشکیل شده است. سازند شوربجه از انتهایی‌ترین نقطه مرز شمال خاوری ایران تا برش خاجه روشنایی، فاقد نهشته‌های دریایی است و تنها براساس موقعیت چینه‌شناسی، سن این سازند را نئوکومین در نظر گرفته اند (افشارحرب ۱۳۷۳). در مطالعه حاضر از اطلاعات زمین شناسی و حفاری مربوط به یک حلقه چاه که در رأس ساختمان عطار حفاری گردیده است استفاده شد. ساختمان عطار حدوداً ۱۰ کیلومتری شمال شرقی مزدواند، در فاصله ۱۰۰ کیلومتری شرق-شمال شرق مشهد و ۶۵ کیلومتری جنوب غربی سرخس قرار دارد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- روش مطالعه

در مطالعه حاضر که بر مبنای کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته است، از مغزه‌های تهیه شده سازند شوربجه (که از طرف اداره مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران در دسترس قرار گرفته بود)، استفاده گردید. ابتدا تعدادی مقطع نازک برای مشخص نمودن وضعیت کانی‌شناسی و خصوصیات بافتی نمونه‌های موجود تهیه گردید. سپس بر روی سه نمونه از مغزه‌های موجود، آزمایش مقاومت فشاری سه محوری که شبیه‌سازی شرایط نمونه سنگ در محل می‌باشد، در سه سطح تنش جانبی ۵، ۱۰ و ۱۵ مگاپاسکال در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تهران طبق استاندارد آی‌اس‌آرام (International Society for Rock Mechanics, ISRM) انجام گردید. پس از آن، آزمایش تخلخل به روش اشباع آب بر روی یک نمونه انجام شده و با نتایج

سنگ در بسیاری از موارد از قبیل سدها، تونل‌ها، حفاری‌ها و ... پارامتر مهمی محسوب می‌شود (Tang & Hudson 2010).



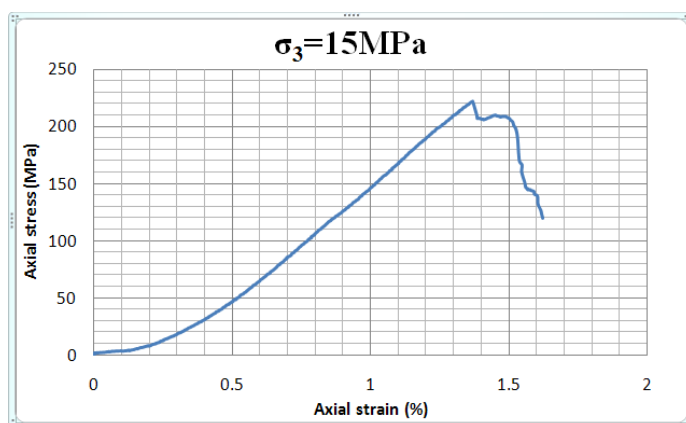
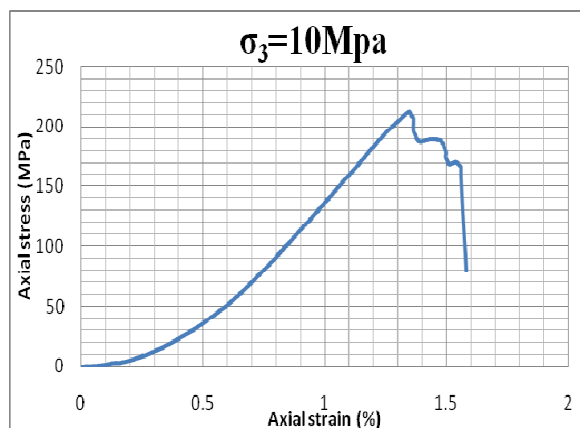
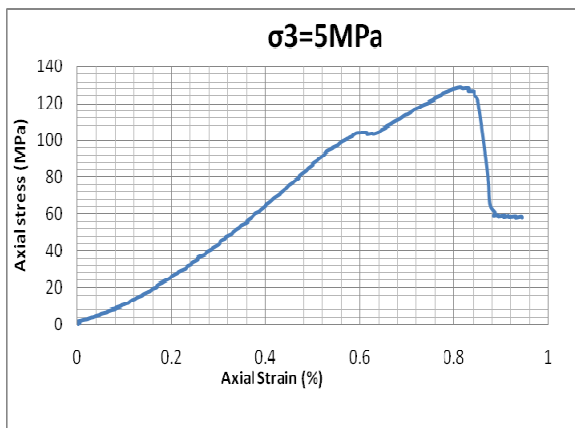
تصویر ۳- مقادیر بالای کانی کوارتز در مقاطع تهیه شده از نمونه‌های مغزه سازند شوربجه

رفته این فشار افزایش یافته و پس از تغییر شکل، نمونه با شکست مواجه شد. برای دو نمونه دیگر نیز با اعمال فشار جانبی (σ_۳) مورد نظر، فشار عمودی (σ_۱) اعمال و نمونه شکسته شد.

نتایج بدست آمده حاکی از افزایش فشار عمودی بر حسب افزایش فشار جانبی می‌باشد که پس از تغییر شکل معین، شکست در نمونه حاصل گردیده است. در تصویر ۵ نمودار (σ_۳ - σ_۱) بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش سه محوری در سه سطح تنش ترسیم شده است. تصویر ۶ شکست برشی یکی از نمونه‌ها پس از بارگذاری در آزمایش سه محوره را نشان می‌دهد.

مشخصات سه نمونه مورد آزمایش در شرح جدول ۱ به ترتیب آورده شده است همچنین به همراه این مشخصات، نتایج حاصل از اعمال فشارهای جانبی و عمودی در لحظه شکست سنگ نیز در شرح جدول مربوطه ارائه گردیده است.

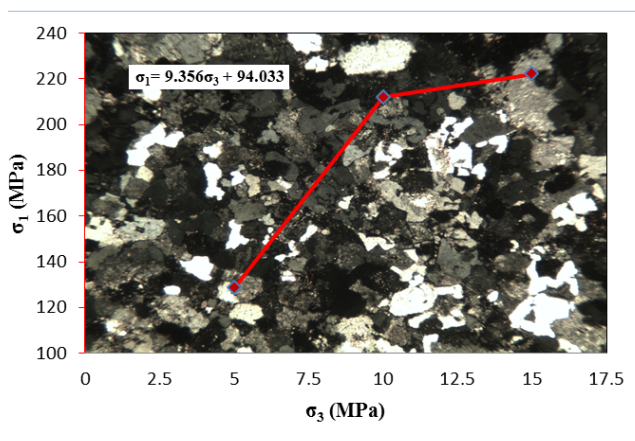
برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه سنگ در شرایط تنش-های جانبی ۵، ۱۰ و ۱۵ مگاپاسکال، آزمون ۳ محوری بر روی سه نمونه سنگ با نسبت طول به قطر (L/D) بین ۲ تا ۳ طبق استاندارد ISRM انجام گردید. در تصویر ۴ نمودارهای تنش- کرنش برای هر یک از نمونه‌ها در سه سطح تنش یاد شده که معرف تغییرات شکل نمونه (کرنش) بر حسب افزایش نیرو (تنش) تا لحظه شکست نمونه می‌باشد، نشان داده شده است. این نمونه‌ها ابتدا توسط دستگاه برش با نسبت (L/D) مشخص در دو طرف بصورت کاملاً مسطح برش داده شدند سپس نمونه‌ها به ترتیب در سه سطح تنش جانبی مختلف مورد آزمایش قرار دادند به این صورت که هر یک از نمونه‌ها بوسیله غشاء لاستیکی محصور و در سلول مخصوص آزمایش سه محوره قرار داده شدند. پس از اعمال فشار جانبی (σ_۳) مورد نظر برای نمونه اول در اطراف غشاء لاستیکی، فشار عمودی (σ_۱) به نمونه اعمال و رفته



تصویر ۴- نمودار تنش- کرنش آزمون سه محوری در سه سطح تنش جانبی ۵، ۱۰ و ۱۵ مگاپاسکال



تصویر ۶- شکست برشی در یکی از نمونه‌ها پس از بارگذاری



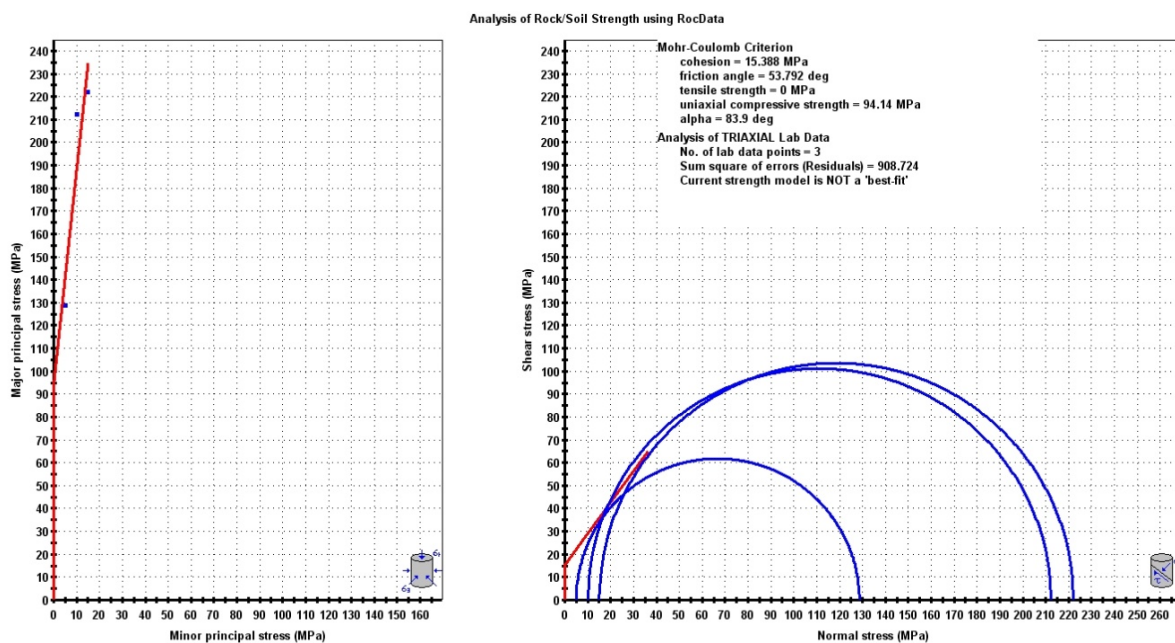
تصویر ۵- نمودار $\sigma_1 - \sigma_3$

جدول ۱- مشخصات نمونه های ماسه سنگی سازند شوربجه در آزمایش سه محوری

نمونه	قطر نمونه (mm)	طول نمونه (mm)	σ_3 فشار جانبی (Mpa)	σ_1 فشار عمودی (Mpa)
A	۶۶/۴۸	۱۶۶/۸۲	۵	۱۲۸/۶۱
B	۶۶/۳۸	۱۶۹/۹۶	۱۰	۲۱۲/۳۱
C	۶۶/۳۸	۱۶۷/۱۸	۱۵	۲۲۲/۱۷

می‌دهد که تنش اعمال شده از مجموع مقاومت‌های چسبندگی مواد (C)، و مقاومت اصطکاکی صفحات لغزشی (ϕ) یا صفحه شکست تجاوز کند (Bourgoyne et al. 1986).
به منظور محاسبه پارامترهای مقاومت برشی این نمونه‌ها از معیار شکست موهر- کلمب استفاده گردید.
در تصویر ۷ دایره موهر در سه سطح تنش، توسط نرم‌افزار RocData ترسیم شده است. بر این اساس مقدار چسبندگی این نمونه سنگ ها ۱۵/۳۸ (Mpa) و مقدار اصطکاک داخلی نمونه‌ها نیز معادل ۵۳/۷۹ درجه محاسبه گردیده است.

معیارهای شکست شکل های مختلفی دارند و پارامترهای آنها نسبت به یکدیگر متفاوت می‌باشد (Franklin 1970, Ohnaka 1973, Murrel 1965, Johnston 1985, Bieniawski 1974, Hoek et al. 1992, Hoek & Brown 1980). بسیاری از محققان علم مکانیک سنگ در یک تحقیق برای مرتب ساختن مقاومت اندازه‌گیری شده سنگ در قسمت‌های ساده تراکمی به فرآیند حفاری از چندین معیار شکست استفاده کردند (Maurice 2005, Han et al. 2005, Gerbaud et al. 2006). یکی از معیارهای شکست که غالباً مورد استفاده قرار می‌گیرد، معیار شکست موهر- کلمب می‌باشد. بر طبق معیار شکست موهر- کلمب، نقطه تسلیم یا شکست سنگ زمانی رخ



تصویر ۷- ترسیم دایره موهر در سه سطح تنش مورد آزمایش توسط نرم افزار RocData

σ_c در رابطه (۱) معادل مقاومت تراکمی تک محوری نمونه سنگ می‌باشد. بنابراین، مقاومت فشاری تک محوری نمونه سنگ فوق در شرایط محیط و تحت تنش همه جانبه با توجه به رابطه (۱)، برابر با ۹۴/۰۳۳ (Mpa) محاسبه شد. همچنین پارامترهای مقاومت برشی نمونه سنگ فوق نیز با توجه به نتایج به دست آمده و پوش گسیختگی مماس بر دایره موهر رسم شده در تصویر ۷، در شرح جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- پارامترهای مقاومت برشی سنگ

Φ ($^\circ$) اصطکاک داخلی نمونه C (MPa) چسبندگی نمونه

۱۵/۳۸

۵۳/۷۹

برای پی بردن به مقاومت توده سنگ تحت شرایط مختلف و محیط‌های تنش متفاوت، از معیار شکست موهر- کلمب براساس تنش‌های ($\sigma_1 - \sigma_3$) استفاده شد. با ترسیم منحنی ($\sigma_1 - \sigma_3$) مشاهده می‌گردد که بهترین منحنی برازش شده خطی می‌باشد که محور (σ_1) را در یک فاصله‌ای نسبت به عرض از مبدا این محور قطع می‌کند. معادله این خط به صورت زیر است:

$$y = \tan \psi (\sigma^3) + \bar{\sigma}_c \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$y = 9/356 (\bar{\sigma}^3) + 94/033$$

در این رابطه، ضریب $\tan \psi$ معادل شیب خط بوده و به صورت رابطه ۲ بیان می‌گردد.

$$\text{Tan} \psi = \frac{1 + \text{Sin} \phi}{1 - \text{Sin} \phi} \quad \text{رابطه (۲)}$$

۳-۴ آزمایش تخلخل

این دو آزمایش محاسبه گردید. جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایش تخلخل نمونه به روش اشباع آب را نمایش می‌دهد. میزان تخلخل اندازه گیری شده با این روش ۹/۶۷ درصد محاسبه شد. همچنین نتایج آزمایش تخلخل ۵ نمونه به روش گاز هلیوم نیز در شرح جدول ۴ ارائه شده است. میانگین تخلخل حاصل از اندازه گیری با گاز هلیوم در ۵ نمونه ۹/۲۳ درصد محاسبه شده است. مشاهده می‌شود تخلخل اندازه گیری شده به روش اشباع آب با میانگین تخلخل اندازه گیری شده به روش گاز هلیوم نزدیک بهم می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری تخلخل نمونه بوسیله اشباع آب به این صورت عمل شد که نمونه کاملاً خشک از طریق قرار دادن نمونه در آن به مدت ۲۴ ساعت و نمونه کاملاً اشباع توسط قرار دادن نمونه در آب برای مدت معین (۴۸ ساعت) آماده‌سازی و توسط ترازو، جرم در هر حالت محاسبه گردید.

تخلخل کمیت اساسی مورد نیاز برای محاسبات حجمی مخزن و توصیف فابریک سنگ محسوب می‌شود (Lucia 1999) و یکی از اساسی‌ترین پارامترهای مخزنی است، زیرا بیانگر مقدار ذخیره هیدروکربن در مخزن می‌باشد. این پارامتر علاوه بر اینکه به صورت مستقیم توسط بررسی‌های آزمایشگاهی روی مغزه اندازه‌گیری می‌شود، به صورت غیرمستقیم نیز از طریق آنالیزهای پتروفیزیکی نمودارهای چاه قابل محاسبه است که دارای محدوده‌ای بین ۱ و ۳۵ است (Lucia 1983). در اینجا ابتدا آزمایش تخلخل به روش اشباع آب بر روی یکی از نمونه‌های موجود انجام شد سپس داده‌های حاصل از این آزمایش با نتایج حاصل از آزمایش اندازه‌گیری تخلخل به روش اندازه‌گیری گاز هلیوم که توسط مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت در دسترس قرار گرفته بود مقایسه و میزان خطای نسبی موجود بین نتیجه

جدول ۳- پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده از نمونه تحت آزمایش با اشباع آب

نمونه	طول نمونه (mm)	قطر نمونه (mm)	وزن طبیعی (gr)	وزن اشباع (gr)	وزن خشک (gr)	چگالی طبیعی (gr/cm ³)	چگالی اشباع (gr/cm ³)	جذب آب (%)	تخلخل (%)
D	۱۳۴/۱۴	۶۶/۳۸	۱۳۲۴/۰۵	۱۳۶۷/۰۹	۱۳۲۲/۲۲	۲/۸۵	۲/۹۴	۳/۳۹	۹/۶۷

در دستگاه تحت فشار گاز هلیوم قرار داده می‌شوند. جدول ۴ نتایج حاصل از اندازه‌گیری تخلخل با گاز هلیوم را نمایش می‌دهد.

در روش اندازه‌گیری تخلخل بوسیله فشار گاز هلیوم، ابتدا از نمونه‌ها مغزه‌گیری مجدد انجام می‌شود تا نمونه‌ها یا پلاگ‌هایی با قطر ۱ تا ۱/۵ اینچ (بر حسب اندازه سلول دستگاه) حاصل گردند. سپس این نمونه‌ها

جدول ۴- پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده از نمونه‌های تحت آزمایش تخلخل با گاز (گزارش آزمایشگاهی از مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت

ایران)

شماره نمونه	وزن نمونه (gr)	حجم دانه (cm ³)	چگالی دانه (gr/cm ³)	تخلخل (%)
۱	۱۸۹/۱	۷۰/۹	۲/۶۷	۶/۸۱
۲	۱۸۵/۹	۷۰/۲۷	۲/۶۵	۱۱/۷۸
۳	۱۸۹/۸۸	۷۱/۴	۲/۶۶	۱۰/۹۷
۴	۱۹۱/۱۳	۷۱/۳۸	۲/۶۸	۷/۱۵
۵	۱۸۴/۶۲	۶۹/۱۱	۲/۶۷	۹/۴۶
میانگین	-	-	-	۹/۲۳

تخلخل حاصل از اندازه‌گیری با اشباع آب می‌باشد. در نتیجه میزان خطای نسبی بین این دو آزمایش برابر با ۴/۷۶۷ درصد محاسبه شد.

میزان خطای نسبی بین نتایج بدست آمده از آزمایش تخلخل بوسیله اشباع آب و تخلخل حاصل از اندازه‌گیری به روش گاز هلیوم از رابطه (۳) محاسبه گردید:

۳-۵ آزمایش سایش سرشار (CAI)

ساینده‌گی را معیاری از میزان خوردگی ابزار حفاری توسط سنگ بکر بیان می‌کنند. میزان ساینده‌گی سنگ توسط عوامل محدود و شناخته

$$\text{رابطه (۳)} \quad \frac{\Phi_{\text{he}} - \Phi_{\text{wt}}}{\Phi_{\text{he}}} \times 100 = \text{خطای نسبی}$$

که در آن، Φ_{he} میانگین تخلخل محاسبه شده با گاز هلیوم و Φ_{wt}

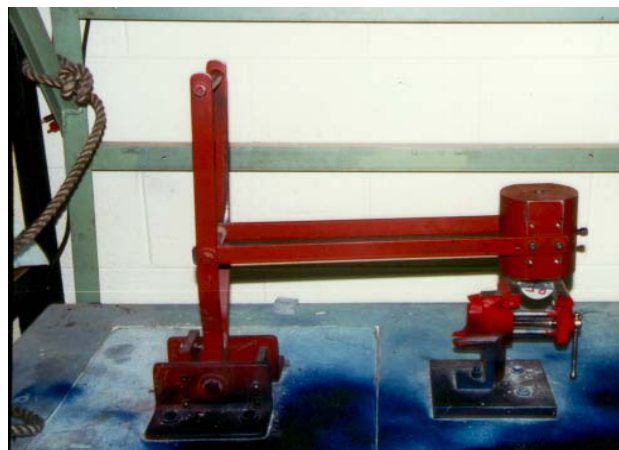
گرفته می‌شود. در ایران، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، میزان کوارتز سنگ را به عنوان معیاری جهت تخمین میزان ساینده‌گی سنگ، در فهرست بهای خدمات ژئوتکنیکی منظور نموده است (علمی اسدزاده و معاریان ۱۳۸۵). آزمایش سایش سرشار دارای این مزیت است که به طور اتوماتیک اثر ترکیبی سختی و تماس کانی‌های ساینده، اندازه و شکل دانه، خصوصیات مواد چسبنده بین کانی‌ها و مقاومت فشاری سنگ را با آنچه که در واقعیت حفاری وجود دارد، اندازه‌گیری می‌نماید. بنابراین، ارتباط آن با دیگر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ مشهود می‌باشد. علاوه بر این، روند این آزمایش با مکانیزم خراشی حفاری دورانی کاملاً همخوانی و مطابقت دارد (معماریان و همکاران ۱۳۸۲). از نظر تعداد آزمایش، ۲-۳ آزمایش برای نمونه‌های سنگ همگن با دانه‌های ریز و ۵ یا بیشتر از ۵ آزمایش برای نمونه‌هایی با اندازه دانه بیشتر از ۱ mm پیشنهاد شده است (Plinninger et al. 2004). در این آزمایش که با دستگاه ساخته شده در دانشکده فنی دانشگاه تهران (تصویر-۸) انجام گرفته است، دو پین با سختی ۴۳ و ۵۵ HRC مورد استفاده قرار گرفت و تعداد آزمایش‌ها نیز بر اساس نوع نمونه‌های در دسترس انتخاب شد. با توجه به نوع نمونه‌های در دسترس که ماسه‌سنگی می‌باشند و دارای دانه‌های بزرگتر از ۱ mm نیز هستند، برای هر پین بر روی هر نمونه ۵ آزمایش انجام شد.

شده‌ای کنترل می‌شود (Thuro & Plinninger 2003, Plinninger et al. 2002, Thuro et al. 2006).

انتخاب یک روش حفاری اقتصادی و تخمین نرخ‌های حفاری و هزینه‌های فرسایش، از مراحل اولیه در پروژه‌های اکتشافی است. در این مرحله از پروژه، اکثر مهندسين ژئوتکنیک و زمین‌شناس با پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی به منظور تخمین نرخ‌های حفاری و فرسوده شدن (زوال) ابزار، مواجه می‌شوند (Plinninger et al. 2004). آزمایش اندیس سایش سرشار اولین بار در اواسط سال ۱۹۸۰ از سوی انستیتوی معدن‌کاری زغال‌سنگ فرانسه معرفی شد (عطایی و حسینی ۱۳۸۸). این آزمایش بر پایه یک سوزن استیل یا پین با کیفیت و شکل هندسی تعریف شده است که بر روی ۱۰ میلی‌متر از یک نمونه سنگ سخت تحت فشار استاتیک ۷۰ نیوتن، خراش می‌اندازد. سپس عدد سرشار، از روی قطر اندازه‌گیری شده از صفحه فرسایش حاصل بر روی سوزن آزمایش با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$\text{CAI} = 10 \times \frac{d}{c} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن، CAI اندیس سایش سرشار (بدون بعد)، d میزان قطر ساییده شده نوک پین (mm) و c فاکتور تصحیح واحد (c=1mm) می‌باشد (Kasling & Thuro 2010). سختی پین‌ها در سراسر جهان به صورت استاندارد بین ۴۳-۶۰ HRC و ۵۶-۵۴ HRC در نظر



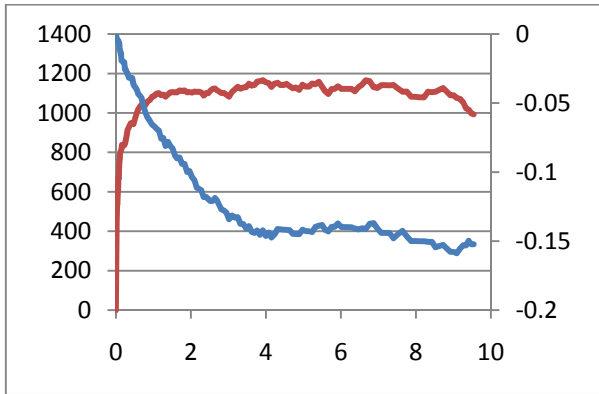
تصویر ۸ - نمایی از دستگاه اندازه‌گیری شاخص سایش سرشار مستقر در دانشکده فنی دانشگاه تهران

$$\text{CAI} = 0.99 \times \text{CAI}_S + 0.48 \quad \text{رابطه (۵)}$$

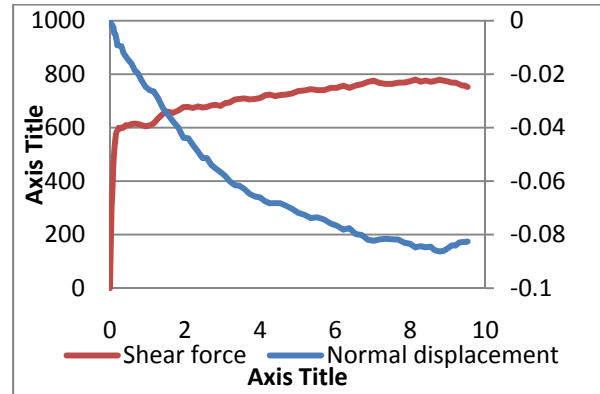
که در رابطه (۲)، CAI شاخص سایش سرشار بر روی سطح ناهموار نمونه و CAI_S شاخص سایش سرشار بر روی سطح صاف و صیقلی نمونه می‌باشد. برای انجام آزمایش سایش سرشار، ابتدا نمونه‌ها بوسیله دستگاه، برش داده شد و سطحی صاف و بدون هوازدگی ایجاد گردید. پس از نصب نمونه در گیره دستگاه، پین مورد نظر به وزنه

آزمایش سرشار (CAI) به سطح نمونه سنگ نیز ارتباط دارد. طبق مطالعات پلیننجر و همکارانش (Plinninger et al. 2003) مقادیر CAI بدست آمده از آزمایشاتی که بر روی سطوح تازه شکسته شده و ناهموار نمونه‌ها انجام گرفت، در حدود ۰/۵ برابر بزرگتر از مقدار CAI نمونه‌هایی بود که سطح آنها صاف و صیقلی شده بود. رابطه اصلاح شده زیر، ضرایب بالایی از همبستگی را نشان می‌دهد.

هفت کیلوگرمی متصل شد و نوک تیز پین بر روی نمونه سنگ قرار داده شد. دسته دستگاه جهت ایجاد خراشی به اندازه یک سانتی‌متر در مدت زمان یک ثانیه کشیده شد. تصویر ۹ مقدار نیروی برشی و جابجایی را برای دو پین مورد نظر نشان می‌دهد. پس از ایجاد خراش، قطر سطح ساییده شده پین در زیر میکروسکوپ قرائت گردید. میکروسکوپ مورد استفاده جهت این قرائت، میکروسکوپ Lietz با



(ب)



(الف)

تصویر ۹- منحنی مقدار نیروی برشی و جابجایی برای پین (الف) HRC ۴۳ و (ب) HRC ۵۵



تصویر ۱۰- نمایی از نمونه‌ها پس از ایجاد خراش در آزمایش سرشار با دو پین مختلف

جدول (۵) میزان قرائت شاخص سایش سرشار را برای آزمایشات انجام شده با دو پین ۴۳ و ۵۵ HRC را نشان می‌دهد. آزمایش انجام شده بر روی سطوح کاملاً صاف و صیقلی نمونه‌ها انجام گرفته است. میانگین مقادیر بدست آمده از آزمایش سایش سرشار با دو پین مختلف حاکی از این مطلب می‌باشد که این نمونه‌ها با توجه به جدول (۶) در محدوده سنگ‌های ساینده تا بسیار ساینده قرار می‌گیرند.

جدول ۵- مقادیر CAIs بدست آمده با پین ۴۳ و ۵۵ HRC

شماره آزمایش	پین با مقاومت (HRC ۴۳)	پین با مقاومت (HRC ۵۵)
۱	۳/۶۸	۳/۳۶
۲	۳/۸۸	۳/۵۶
۳	۳/۵۲	۳/۳۶
۴	۳/۰۶	۳/۲۹
۵	۳/۳۳	۳/۶
میانگین	۳/۵	۳/۴۴

جدول ۶ - طبقه‌بندی سایش سرشار

معماریان و همکاران (۱۳۸۰)	(Cerchar 1986)	(Michalacopoulos et al. 2006)	شاخص سایش سرشار (CAI)
غیر ساینده	نه چندان ساینده	سایش بسیار کم	۰/۳ - ۰/۵
کم ساینده	کمی ساینده	کمی ساینده	۰/۵ - ۱/۰
نیمه ساینده	سایش متوسط تا ساینده	سایش متوسط	۱/۰ - ۲/۰
ساینده	بسیار ساینده	بسیار ساینده	۲/۰ - ۴/۰
خیلی ساینده	فوق العاده ساینده	فوق العاده ساینده	۴/۰ - ۶/۰
بسیار ساینده	کوارتز	-	۶/۰ - ۷/۰

۴- نتیجه گیری

در داده های لرزه‌ای بازتابی، مجموعه مقالات پنجمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تهران.

آدام تی بورگوین، جی. آر.، مارتین، ای. چنورت، کیت کی، میلیم، و یانگ، اف. اس.، ۱۹۸۶، "مهندسی حفاری کاربردی"، ترجمه رزاق فامیان‌س و جودی. ب، ۱۳۹۰، انتشارات سنا، ۸۸۳ ص.

افشار حرب، ع.، ۱۳۷۳، "زمین شناسی کپه داغ. طرح تدوین کتاب زمین شناسی ایران"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۲۷۵ ص.

بهاری، ا.، ۱۳۸۶، "یافتن ضرایب مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ با روش بهینه سازی تراست - رجیون در میدان گازی خانگیران"، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۴۷.

جمالی، ا. م.، صادقی، ع.، و آدابی، م. ح.، ۱۳۹۰، "رخساره ها و محیط های رسوبی سازند شوربجه در برش چینه شناسی حمام قلعه، جنوب کلات نادری"، فصلنامه زمین شناسی ایران، سال پنجم، شماره هفدهم: ۱۰۲-۸۷.

عطایی، م.، و حسینی، س. ه.، ۱۳۸۸، "بررسی تأثیر ساینده‌گی بر قابلیت حفاری سنگ ها"، فصلنامه علوم زمین، سال ۱۹ (۷۴): ۱۴۲-۱۳۷.

علمی اسدزاده، گ.، و معماریان، ح.، ۱۳۸۵، "بررسی ارتباط بین میزان سایش و بافت سنگ در نمونه هایی از سنگهای ساختمانی ایران"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰ (۱): ۹۳-۱۰۳.

فهیمی فر، ا.، و سروش، ح.، ۱۳۸۰، "آزمایشهای مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها"، جلد اول، آزمون‌های آزمایشگاهی، شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، ۷۲۰ ص.

کاوسی، م. ع.، لاسمی، ی.، موسوی حرمی، س. ر.، و شرکتی، ش.، ۱۳۸۸، "محیط‌های رسوبی و چینه‌نگاری سکانشی نهشته‌های ژوراسیک بالایی (سازند مزدوران) در بخش های خاوری و مرکزی حوضه رسوبی کپه داغ شمال خاور ایران"، رساله دکترا، ۱۰۸ ص.

معماریان، ح.، رستمی، ج.، و معماری اترآباد، ح.، ۱۳۸۰، "بررسی سایش سنگ به عنوان مبنایی جهت طبقه بندی سنگ‌های ایران"، پنجمین کنفرانس تونل ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

معماریان، ح.، معماری اترآباد، ح.، و نجفی، ع.، ۱۳۸۲، "انتخاب سرته‌های الماسه مغزه‌گیر برای حفاری‌های ژئوتکنیکی ایران"، ششمین کنفرانس تونل، دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

موسوی حرمی، س. ر.، ۱۳۶۶، "تفسیر محیط رسوبگذاری سازند

(الف) با توجه به مطالعه مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های در دسترس سازند شوربجه، کانی‌های اصلی در این نمونه‌ها کوارتز و فلدسپات می‌باشند و بافت رسوبی این سنگ‌ها طبق طبقه‌بندی فولک، ساب آرکوز معرفی شد.

(ب) تخلخل این نمونه‌ها طبق آزمایشات انجام شده به دو روش اشباع آب و گاز هلیوم در حدود ۱۰ درصد شناخته شده که در محدوده سنگ‌های با تخلخل متوسط قرار می‌گیرند و از آنجایی که این سازند مخزن گازی می‌باشد، این محدوده تخلخل برای این سازند مناسب است.

(پ) طبق آزمایش مقاومت فشاری سه محوری که در سه سطح تنش ۵، ۱۰ و ۱۵ مگاپاسکال انجام شد، پارامترهای مقاومت برشی این نمونه‌ها طبق معیار شکست موهر- کلمب محاسبه گردیده که میزان چسبندگی این نمونه‌ها ۱۵/۳۸ مگا پاسکال و مقدار اصطکاک داخلی این نمونه‌ها ۵۳/۷۹ درجه می‌باشد.

(ت) طبق آزمایش شاخص سرشار، میزان ساینده‌گی این نمونه‌ها در حدود ۳/۵ می‌باشد و طبق طبقه‌بندی‌های معرفی شده، این سنگ‌ها در محدوده سنگ‌های ساینده تا بسیار ساینده قرار می‌گیرند و دلیل اصلی آن، داشتن مقادیر بالای کانی کوارتز در این نمونه‌ها است.

تقدیر و تشکر

از اداره مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران بخاطر در اختیار گذاشتن داده‌ها و نمونه‌های مورد نیاز جهت انجام این پژوهش و آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده فنی دانشگاه تهران و همچنین جناب آقای مهندس فرزاد فضی کارشناس ارشد حفاری اداره مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران کمال تشکر را داریم.

مراجع

اخوان، ح.، رضایی، م.، ر.، اخروی، ر. و موسوی حرمی، س. ر.، ۱۳۸۰، "تعیین لیتولوژی سیالات منفذی سازند شوربجه توسط داده های رقومی (خام و ارزیابی شده) نمودارهای ژئوفیزیکی و کاربرد آن

- 2008, "Development of a new classification system for assessing of Rock mass Drillability index (RDi)", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 45: 1-10.
- Johnston, J., 1985, "Strength of Intact Geomechanical Materials", *Journal of Geotechnical Engineering, Div., ASCE*, Vol. 111: 730-749.
- Kasling, H., & Thuro, K., 2010, "Determining abrasivity of rock and soil in the laboratory", *Francis Group, London*, ISBN 978-0-415-60034-7.
- Lucia, F. J., 1983, "Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks: a field classification of carbonate pore space", *Journal Petrol. Technol March*: 626-637.
- Lucia, F.J., 1999, "Carbonat Reservoir Characterization", *New York, Springer- Verlag*, 226 pp.
- Maurice, B., 2005, "More Rock Mechanics Issues in Drilling", *Argentina SPE 2005 Course on Earth Stresses and Drilling Rock Mechanics*.
- McGregor, K., 1967, "The drilling of rock", *London: C.R. Books Ltd*.
- Michalakopoulos, T., Anagnostou, V., Bassanou, M., & Panagiotou, G., 2006, "The influence of steel styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value", in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 43 (2): 321-327.
- Moussaviharami, S. R., & Brenner, R. L., 1993, "Diagenesis of nonmarine petroleum, reservoir the Neocomian (Lower Cretaceous) Shurijeh Formation, Kopet-Dagh basin, NE Iran", *Journal Of Petroleum Geology*, Vol. 16 (1): 55-72.
- Moussaviharami, S. R., & Brenner, R. L., 1992, "Geohistory analysis and petroleum reservoir characteristics of Lower Cretaceous (Neocomian) sandstone, eastern portion of Kopet-Dagh basin, northeast Iran", *A. A. P. G Bulliten*, Vol. 76: 1200-1208.
- Murrel, S. A. F., 1965, "The Effect of Triaxial Stress Systems on the Strength of Rock at Atmospheric Temperatures", *Geophysics Journal*, Vol. 10: 231-281.
- Ohnaka, M., 1973, "The Quantitative Effect of Hydrostatic Confining Pressure on the Compressive Strength of Crystalline Rocks", *Journal of Physics of the Earth*, Vol. 21: 125-140.
- Ozturk, C.A., Nasuf, E., & Bilgim, N., 2004, "The assessment of rock cutability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient", *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Plinninger, R.J., Käsling, H., Thuro, K., & Spaun, G., 2002, "Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value", *Int. J. RockMech. & Min. Sci.*, Vol. 40: 259-263.
- Plinninger, R. J., Kasling, H., & Thuro, K., 2004, "Wear prediction in Hardrock Excavation using the CERCHAR abrasiveness index (CAI)", *Geomechanics Colloquium Schabert (ed)*, VGA.
- Plinninger, R.J., Kasling, H., Thuro, K. and Spaun, G., 2003, "Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value", *International Journal of Rock Mechanics*
- شوربجه (کرتاسه تحتانی) در شرق حوضه کپه داغ"، مجموعه مقالات پنجمین گردهمایی علوم زمین.
- نجفی، م.، نداف، ر. و موسوی حرمی، س. ر.، ۱۳۸۷، "مطالعه سنگ چینه‌شناسی سازند شوربجه در مقطع رادکان-بارو"، جنوب شرق قوچان و مقایسه آن با مقاطع چشمه گیلاس، دره خور و گردنه مزدوران"، مجموعه مقالات سومین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه شیراز.
- Afsharharb, A., 1979, "The stratigraphy, Tectonics and petroleum Geology of the Kopet-Dagh Region, Northern Iran", *Ph.D. Thesis, Imperial College of Sciences, University of London, United Kingdom*, 316 pp.
- Alavi, M., Vaziri, H., Seyedemami, K., & Lasemi, Y., 1997, "The Triassic and associated rocks of the Aghdarband areas in Central and north eastern Iran as remnants of the southern Turanian active continental margin", *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 109: 1563-1575.
- Berberian, M., & King, G.C.P., 1981, "Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran", *Canadian Journal Earth Sciences*, Vol. 18: 210- 265.
- Beste, U., Jacobson, S., & Hogmark, S., 2007, "Rock penetration into cemented carbide drill buttons during rock drilling", *Wear*, Vol. 264: 1142- 1151.
- Bieniawski, Z. T., 1974, "Estimating the Strength of Rock Materials", *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 74: 312-320.
- Bilim, N., 2011, "Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties", *Scientific Research and Essays Vol. 6 (2): 382-387*.
- Buryakovsky, L. A., Chilinger, G. V., & Aminzadeh, F., 2001, "Petroleum Geology of South Caspian Basin", *Gulf Professional Publishing, USA*, 422 pp.
- CERCHAR-Centre d'Etudes et Recherches de Charbonnages de France, 1986, "The CERCHAR abrasiveness index", *Verneuil (in French)*.
- _ Folk, R.L., 1974, "Petrology of sedimentary Rock", *Hemphill Publishing Co., Austin, Texas*, 182P.
- Franklin, J. A., 1970, "Triaxial Strength of Rock Materials", *Xerox University Microfilms, Ann Arbor, Michigan*, 30 pp.
- Gerbaud, L., Menand, S., & Sellami, H., 2006, "All comes from the cutter rock interaction" *SPE paper N°98988, IADC/SPE Drilling Conference, Miami, Florida*.
- Garzanti, E., & Gaetani, M., 2002, "Unroofing history of Late Paleozoic magmatic arcs within the "Turan Plate" (Turkmenistan)", *Sedimentary Geology*, Vol. 151: 67-87.
- Han, G., Bruno, M., & Lao, K., 2005, "Percussion Drilling in Oil Industry: Review and Rock Failure Modelling", *Terralog Technologies USA, Inc, AADE-05-NTCE-59*.
- Hoek, E. & Brown, E. T., 1980, "Underground Excavations in Rock", *London, Institute of Mining and Metallurgy*, 527 pp.
- Hoek E., Wood, D. & Shah, S., 1992, "A modified Hoek-Brown Failure Criterion for Jointed Rock Masses", *Eurock, London, Thomas Telford: 209-214*.
- Hoseinie, S. H., Aghababaei, H., & Pourrahimian, Y.,

and Mining Sciences, Elsevier, Vol. 40 (2): 259-263,

Rüttner, A. W., 1991, "Geology of the Aghdarband area (Kopet Dagh NE Iran)", *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, Vol. 38: 7-79.*

Spar, J. R., Ledgerwood, L.W., Goodman, H., Graff, R. L., & Moo, T. J., 1995, "Formation Compressive Strength Estimates for Predicting Drillability and PDC Bit Selection", *SPE 29397.*

Tang, C. & Hudson, J., 2010, "book of Rock Failure Mechanisms, Illustrated and Explained", *London, CRC Press, 364 pp.*

Tang, C. & Tang, S., 2011, "Applications of rock failure process analysis (RFPA) method", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 3 (4): 352-372.*

Thuro, K., & Plinninger, R.J., 2003, "Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability", *ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy: 1-7.*

Thuro, K., Singer, J., Käsling, H., & Bauer, M., 2006, "Soil abrasiveness assessment using the LCPC testing device", *Felsbau, Vol. 24: 37-45.*

Vutukuri, V.S. & Katsuyama, K., 1994, "book of Introduction to Rock Mechanics", *industrial publishing & Consulting, Inc, Tokyo, 275 pp.*