

## ارزیابی ژئومکانیکی واحدهای رسوبی سازند آجاجاری در پهنه زاگرس

داریوش طاهری<sup>۱</sup>، عبدالهادی قزوینیان\*<sup>۲</sup>، محمدرضا نیکودل<sup>۳</sup>، ماشاءاله خامه‌چیان<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۸۷/۱۱/۲

دریافت مقاله: ۸۶/۹/۷

### چکیده:

رسوبات جوان سازند آجاجاری در جنوب و جنوب غربی ایران دارای بیرون زدگی‌های گسترده‌ای می‌باشند. به دلیل این گستردگی، ساختگاه تعداد زیادی از پروژه‌های عمرانی در این سازند واقع شده‌اند. بنابراین آشنایی با ویژگی‌های سنگ‌شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی واحدهای مختلف این سازند در پهنه زاگرس می‌تواند جهت تهیه یک بانک اطلاعات ژئوتکنیکی، مفید واقع شود. این بانک اطلاعاتی در مطالعات اولیه بسیاری از پروژه‌های مهندسی و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی مهندسی این پهنه، مورد استفاده خواهد بود. در این بررسی ضمن تفکیک این سازند به سه بخش شمال غربی، مرکزی و جنوب شرقی در پهنه زاگرس، پارامترهای ژئومکانیکی آنها بر اساس داده‌های بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ و همچنین اطلاعات حاصل از پروژه‌های اجرا شده در این پهنه، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. به علاوه ضرایب تبدیل مقاومتی بر اساس نتایج آزمون‌های ساده و ارزان قیمت ارائه شده است. پایداری هر یک از واحدهای سنگی این سازند در برابر فرآیندهای هوازدگی با استفاده از آزمایش دوام‌پذیری نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. در آزمایش‌های سه‌محوری ضمن تعیین سطوح مختلف تنش اصلی در هنگام شکست، پارامترهای  $\sigma_{ci}$ ،  $m_i$ ،  $c$ ،  $\phi$  محاسبه و شرایط انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی اجمالی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که واحدهای سنگی سازند آجاجاری واقع در بخش مرکزی نسبت به دو بخش شمال غربی و جنوب شرقی این پهنه، دارای مقادیر مقاومتی بالاتری هستند. این نتیجه ممکن است به این فرضیه منجر شود که واحدهای این بخش احتمالاً به دلیل قرار گرفتن در محدوده عملکرد گسل‌های امتداد لغز هندیجان و کازرون، فرآیندهای دیاژنتیکی را سریع‌تر طی کرده‌اند.

**کلید واژه‌ها:** سازند آجاجاری، پهنه زاگرس، مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص بارنقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی، امواج الاستیک.

۱- دانشجوی دوره دکتری زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار، گروه مکانیک سنگ دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس ghazviniana@modares.ac.ir

۳- استادیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشکده علوم پایه دانشگاه تربیت مدرس

\*مسئول مکاتبات

**مقدمه**

ویژگی های زمین شناسی مهندسی و ژئومکانیکی مصالح زمین در طراحی و روش اجرای پروژه های عمرانی اهمیت ویژه ای دارند. بنابراین تهیه بانک اطلاعاتی از داده های ژئوتکنیکی سازندهایی که از نقطه نظر مهندسی در یک گستره مهم می باشند، اهمیت زیادی دارد. این سازندها که اصطلاحاً سازندهای ژئوتکنیکی نامیده می شوند و اغلب پروژه های عمرانی بر سطح یا داخل آنها اجرا می گردند، در کشور ما از تعدد و گسترش فراوانی برخوردار هستند. تاکنون فعالیت بسیار اندکی در این باره صورت گرفته و اغلب پراکنده و پروژه ای بوده است. سازند آجاجاری به دلیل احداث پروژه های بزرگ مهندسی در آن، به عنوان یکی از این سازندهای ژئوتکنیکی مسئله دار در پهنه زاگرس قابل معرفی است. از جمله این پروژه ها می توان به سد تنظیمی انحراف آب کرخه و تونل های انحراف آب سد گتوند (در استان خوزستان)، سدهای شمیل و نیان (در استان هرمزگان)، تونل راه اهرم- فراشبند (در مرز استان های فارس و بوشهر) و غیره اشاره نمود. در این بررسی سعی شده با انجام آزمون های آزمایشگاهی بر روی نمونه های جمع آوری شده از برخی رخنمون های سازند آجاجاری در پهنه زاگرس، ویژگی های ژئومکانیکی سنگ بکر واحدهای مختلف این سازند شناسایی و مورد ارزیابی قرار بگیرد. همچنین جهت تکمیل اطلاعات ژئوتکنیکی این سازند، از داده های حاصل از پروژه های مختلف اجرا شده در این پهنه نیز استفاده گردیده است (دوست محمدی، ۱۳۷۸)، (شریفی، ۱۳۸۴)، (شمسی فراد، ۱۳۸۱)، (فتحی برفه، ۱۳۸۳)، (مرادیان، ۱۳۸۴)، و (مهتاب قدس، ۱۳۸۳). این تحقیق هر چند ممکن است از لحاظ گسترش جغرافیایی و یا از جنبه نتایج آزمون های مکانیک سنگ برجا دارای کاستی هایی باشد، ولی دریچه ای را فرا راه پژوهشگران و محققین این رشته قرار می دهد تا با استفاده از اطلاعات موجود، در تهیه و تکمیل این بانک اطلاعاتی تلاش نمایند. تکمیل این بانک با استفاده از داده های ژئوتکنیکی سایر پروژه های در حال اجرا و همچنین پروژه های آتی، می تواند

علاوه بر کمک شایان به تهیه نقشه های دقیق زمین شناسی مهندسی بزرگ مقیاس، در طراحی بهینه و کاهش زمان و هزینه اجرای سایر پروژه های مهندسی نیز تأثیرگذار باشد.

**سازند آجاجاری**

در میدان نفتی آجاجاری مقطع تیپ این سازند شامل ۲۹۶۶ متر رسوبات آواری است. از نظر لیتولوژی واحدهای مختلف آن شامل تناوبی از چرخه های رسوبگذاری بوده که به طرف بالا ریزدانه می شوند. هر چرخه به ضخامت ۱۰ تا ۱۰۰ متر، با لایه های ماسه سنگی آهکی به ضخامت ۲ تا ۵ متر و به رنگ قهوه ای تا خاکستری آغاز و با لایه ضخیمی از مارن سرخ رنگ در تناوب با لایه های نازک ماسه سنگ ریزدانه، لای سنگ، گل سنگ و یا رس سنگ ادامه می یابد. همچنین در برخی نواحی، میان لایه ها و رگه های ژپسی به ضخامت چند میلیمتر تا چند سانتیمتر در بین این واحدهای آواری قابل مشاهده است.

بطور کلی در پهنه زاگرس سازند آجاجاری را می توان با دو رخساره متفاوت مشاهده نمود. رخساره اول بیشتر ماسه سنگی بوده و در محدوده فارس داخلی و بخش هایی از فارس ساحلی، بندرعباس، شمال فروافتادگی دزفول و مرز ایران و عراق رخنمون دارد. رخساره دوم اغلب شامل مارن است که بیشتر در مجاورت فارس ساحلی و قسمت های جنوبی و میانی فروافتادگی دزفول قابل مشاهده است. رسوبگذاری سازند آجاجاری در اواخر دوره میوسن و اوایل پلیوسن در اثر عقب نشینی دریا و تشکیل محیط خلیجی و دریاچه ای انجام پذیرفته است. سازند آجاجاری به صورت تدریجی و هم شیب سازند میشان را پوشانده و خود به طور دگرشیب توسط سازند بختیاری پوشیده شده است (آقنابتی، ۱۳۸۳). (شکل ۱) گسترش سطحی سازند آجاجاری را در پهنه زاگرس نشان می دهد.

**روش تحقیق**

با توجه به ویژگی های چینه شناسی سازند آجاجاری و به منظور سهولت در تهیه بلوک های سنگی جهت مغزه گیری،

گردیده است و (Brown, 1981). آزمون‌ها شامل تعیین خصوصیات فیزیکی (ISRM و ASTM D2216)، شاخص بارنقطه‌ای (ASTM D5731)، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون (D3148 و D2938)، مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی (ISRM)، سرعت امواج صوتی و تعیین ثابت‌های الاستیک دینامیکی سنگ (ASTM D2845)، شاخص دوام‌پذیری (ASTM D4644) و مقاومت فشاری سه محوری (ASTM D2664) هستند. لازم به ذکر است کلیه ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌ها در حالت خشک بدست آمده‌اند. در ذیل به شرح آزمایش‌ها و ارزیابی نتایج بدست آمده پرداخته شده است.

#### ۱- خصوصیات فیزیکی

خصوصیات فیزیکی شامل تعیین دانسیته خشک و اشباع، درصد تخلخل، درصد جذب آب، وزن مخصوص و حدود آتربرگ نمونه‌هایی که در تماس با آب دچار شکستگی می‌شوند، می‌باشد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق این جدول ماسه‌سنگ‌های بخش مرکزی دارای حداکثر دانسیته خشک و حداقل درصد تخلخل هستند. همچنین در بخش شمال غربی واحدهای گل‌سنگ و رس سنگ به ترتیب دارای حداقل دانسیته خشک و حداکثر درصد تخلخل هستند. در بخش جنوب شرقی نیز واحدهای لای سنگ و رس سنگ به ترتیب دارای حداقل دانسیته خشک و حداکثر درصد تخلخل می‌باشند. نتایج آزمایش حدود آتربرگ بیانگر آن است که شاخص خمیری (PI) سنگ‌های گلی (Mud Rocks) در محدوده کمتر از ۱۰ تا بیش از ۲۵ درصد و با مقدار متوسط ۱۲ تا ۱۵ درصد قرار دارد.

#### ۲- ویژگی‌های مقاومتی سنگ بکر

نتایج آزمایش‌های مقاومتی سنگ بکر در جدول ۳ ارائه شده‌اند. این آزمایش‌ها شامل آزمایش شاخص بارنقطه‌ای، مقاومت تراکمی تک‌محوری و مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی می‌باشند.

ابتدا این پهنه به سه بخش شمال غربی (بخش شمالی فروافتادگی دزفول و گسل هندیدجان-بهرگانسر)، مرکزی (بخش جنوبی فروافتادگی دزفول و ناحیه بین گسل‌های هندیدجان-بهرگانسر و قطر-کازرون) و جنوب شرقی (بین گسل‌های میناب و قطر-کازرون) تقسیم گردید. سپس نمونه‌برداری از رخنمون‌های این سازند که در بخش‌های شمال غربی و جنوب شرقی شامل ماسه‌سنگ، لای سنگ، گل‌سنگ، رس سنگ و مارن و در بخش میانی شامل ماسه‌سنگ و مارن بودند، صورت گرفت. پس از حمل بلوک‌ها به آزمایشگاه، از آنها مغزه‌گیری شده و نمونه‌های مناسب جهت انجام آزمایش‌های ژئومکانیکی تهیه گردید. همچنین به منظور تکمیل بانک اطلاعاتی، از نتایج آزمون‌های ژئومکانیکی حاصل از پروژه‌های مختلف احداث شده در این سازند، نظیر سدها و تونل‌های انحراف آب کرخه و گتوند و دکل مخبراتی اهواز تپه (در بخش شمال غربی)، سدهای شمیل و نیان (در بخش جنوب شرقی)، و همچنین تونل راه اهرم-فراشبند (در بخش مرکزی)، استفاده گردید. در جدول ۱ موقعیت نسبی، جنس سنگ، محل نمونه‌برداری‌ها و تعداد نمونه‌های مورد ارزیابی در پهنه زاگرس مشخص شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود از تعداد ۹ محل نمونه‌برداری، بیش از ۱۱۰ نمونه انتخاب شده‌اند. در این بررسی با استفاده از روش‌های آماری توصیفی و رگرسیون خطی و غیرخطی، نتایج بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی برای واحدهای مختلف سازند آغاچاری مورد مقایسه قرار گرفته و ضمن ارزیابی این داده‌ها، ضرایب تبدیل مقاومتی برای این واحدها نیز ارائه شده است.

#### آزمایش‌های ژئومکانیکی

جهت تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر، آزمایش‌های متداول مکانیک سنگ مطابق استانداردهای لازم بر روی نمونه‌های بدست آمده (فهیمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰) از بخش‌های مختلف سازند آغاچاری در پهنه زاگرس انجام

جدول ۱- موقعیت نسبی در پهنه زاگرس، جنس سنگ، محل و تعداد نمونه برداری در سازند آغاچاری (پهنه زاگرس)

ردیف	موقعیت نسبی در پهنه زاگرس	جنس سنگ	محل نمونه برداری*	تعداد نمونه
۱	شمال غربی	ماسه سنگ	جاده اندیمشک - خرم آباد (۱)	۲
۲		ماسه سنگ	تپه مخابراتی اهواز (۴)	۶
۳		ماسه سنگ	شمال شوشتر، ساختگاه سد گتوند (۳)	۸
۴		ماسه سنگ	شمال غرب اندیمشک، ساختگاه سد کرخه (۲)	۹
۵		لای سنگ	شمال شوشتر، ساختگاه سد گتوند (۳)	۴
۶		لای سنگ	شمال غرب اندیمشک، ساختگاه سد کرخه (۲)	۶
۷		لای سنگ	تپه مخابراتی اهواز (۴)	۴
۸		گل سنگ	شمال شوشتر، ساختگاه سد گتوند (۳)	۳
۹		گل سنگ	شمال غرب اندیمشک، ساختگاه سد کرخه (۲)	۴
۱۰		رس سنگ	شمال شوشتر، ساختگاه سد گتوند (۳)	۴
۱۱		رس سنگ	جاده اندیمشک - خرم آباد (۱)	۳
۱۲		مارن	تپه مخابراتی اهواز (۴)	۴
۱۳		مارن	جاده اندیمشک - خرم آباد (۱)	۵
۱۴	مرکزی	ماسه سنگ	شرق بوشهر، ساختگاه تونل اهرم-فراشبند (۶)	۸
۱۵		ماسه سنگ	شرق بندر دیلم، منطقه نفتی بی بی حکیمه (۵)	۴
۱۶		مارن	شرق بوشهر، ساختگاه تونل اهرم-فراشبند (۶)	۷
۱۷	جنوب شرقی	ماسه سنگ	شمال بندرعباس، ساختگاه سد شمیل و نیان (۹)	۳
۱۸		ماسه سنگ	جاده بندرعباس-سیرجان (۸)	۳
۱۹		ماسه سنگ	جاده بندرعباس-بندر شهید رجایی (۷)	۴
۲۰		لای سنگ	جاده بندرعباس-سیرجان (۸)	۲
۲۱		لای سنگ	جاده بندرعباس- بندر شهید رجایی (۷)	۲
۲۲		گل سنگ	شمال بندرعباس، ساختگاه سد شمیل و نیان (۹)	۸
۲۳		رس سنگ	جاده بندرعباس-بندر شهید رجایی (۷)	۳
۲۴		مارن	جاده بندرعباس-بندر شهید رجایی (۷)	۵

\* اعداد داخل پرانتز، شماره محل نمونه برداری ها را بر روی نقشه شکل ۱- نشان می دهند

#### ۱-۲- شاخص بارنقطه ای

مقدار متوسط شاخص بارنقطه ای برای واحد گل سنگی در بخش جنوب شرقی معادل  $0.61 \text{ MPa}$  و بیشترین مقدار متوسط آن برای ماسه سنگ های بخش مرکزی برابر  $\text{MPa}$   $3/11$  بدست آمده است.

آزمایش شاخص بارنقطه ای یکی از روش های سریع و ارزان قیمت برای تعیین مقاومت سنگ ها می باشد ( Bieniawski, 1975<sup>(2)</sup>، (Broch & Franklin, 1972) و (Read, Thornton) (1980 & Regan) است. بر اساس نتایج بدست آمده، کمترین

جدول ۲) خصوصیات فیزیکی و حدود آتزیترگ واحدهای رسوبی سازند آغاچاری در پهنه زاگرس

ردیف	موقعیت	جنس سنگ	دانشیه خشک (g/cm <sup>3</sup> )	دانشیه اشباع (g/cm <sup>3</sup> )	تخلخل (%)	جذب آب (%)	وزن مخصوص	L.L (%)	P.L (%)	P.I (%)
۱	سلسله جبال زاگرس	ماسه‌سنگ	۲/۴۹ (۲/۰۱-۲/۳۷)	۲/۳۳ (۲/۱۵-۲/۵۱)	۱۴/۳۷ (۱/۷۰-۲۱/۳۱)	۵/۳۳ (۰/۲۰-۱۱/۳۹)	۲/۳۱ (۲/۴۸-۲/۷۷)	-----	-----	-----
۲		لاسیسنگ	۲/۳۵ (۱/۳۹-۲/۸۱)	۲/۴۷ (۱/۴۴-۲/۵۹)	۱۳/۴۰ (۱/۳۷-۲۴/۳۳)	۳/۷۸ (۰/۹۰-۱۷/۱۵)	۲/۳۸ (۲/۵۳-۲/۷۴)	۲۱/۵ (۹/۸-۲۸/۵)	۱۱/۳ (۵/۱۵-۱۵/۳۵)	۱۱/۳ (۹/۱۵-۱۵/۳۵)
۳		کلسنگ	۲/۳۳ (۱/۹۳-۲/۵۵)	۲/۴۵ (۲/۱۷-۲/۷۵)	۱۵/۳۶ (۷/۱۴-۲۵/۵۸)	۷/۴۴ (۱/۷۵-۱۸/۲۲)	۲/۳۵ (۲/۵۲-۲/۷۵)	۲۸/۷ (۱۳/۲-۳۱/۵)	۱۱/۳۵ (۹/۷-۱۹/۲)	۱۱/۳۵ (۹/۷-۱۹/۲)
۴		رس‌سنگ	۲/۳۷ (۲/۱۲-۲/۷۷)	۲/۵۴ (۲/۳۳-۲/۷۴)	۱۹/۴۵ (۱/۳۳-۲/۱۷)	۴/۹۰ (۱/۲۰-۱۲/۳۲)	۲/۳۳ (۲/۷۴-۲/۷۹)	۴۰ (۳۳/۵-۴۴)	۲۵ (۱۶-۳۰)	۲۵ (۱۶-۳۰)
۵	کوه زاگرس	مارن	۲/۳۵ (۱/۹۰-۲/۵۶)	۲/۵۱ (۲/۱۲-۲/۹۰)	۱۵/۴۵ (۳/۳۱-۲۸/۳۶)	۱۲/۲۹ (۳/۴۸-۲۱/۵۴)	۲/۳۴ (۲/۵۳-۲/۸۸)	۳۳/۴۵ (۲۹/۳-۴۱)	۲۲/۰ (۱۵/۳۵-۲۷/۳۷)	۲۲/۰ (۱۵/۳۵-۲۷/۳۷)
۶		ماسه‌سنگ	۲/۵۱ (۲/۱۲-۲/۷۴)	۲/۶۶ (۲/۱۸-۲/۸۵)	۱۷/۵۶ (۱/۵۴-۲۰/۸۶)	۳/۱۶ (۰/۵۷-۱۰/۴۹)	۲/۳۳ (۲/۳۷-۲/۷۹)	-----	-----	-----
۷		مارن	۲/۳۸ (۲/۰۸-۲/۵۶)	۲/۵۴ (۲/۳۳-۲/۷۴)	۱۴/۵۸ (۲/۷۷-۲۴/۱۴)	۱۱/۳۳ (۳/۷۱-۱۲/۳۶)	۲/۳۵ (۲/۵۵-۲/۷۰)	۲/۳۵ (۲/۱۲-۲/۷۹)	۲/۳۵ (۲/۱۲-۲/۷۹)	۲/۳۵ (۲/۱۲-۲/۷۹)
۸	کوه زاگرس	ماسه‌سنگ	۲/۱۶ (۱/۷-۲/۳۵)	۲/۳۳ (۱/۸۷-۲/۵۲)	۱۹/۴۶ (۱۴/۳۳-۳۱/۳۱)	۱۴/۳۸ (۳/۳۰-۱۸/۷۵)	۲/۵۴ (۲/۳۳-۲/۷۴)	-----	-----	-----
۹		لاسیسنگ	۲/۱۳ (۱/۳۹-۲/۲۱)	۲/۳۰ (۱/۸۴-۲/۳۸)	۱۷/۴۲ (۱/۳۷-۲/۵۶)	۱۰/۸۸ (۰/۶۰-۱۲/۳۳)	۲/۳۰ (۲/۳۳-۲/۷۱)	۲/۳۰ (۱/۸۵-۳/۱)	۲/۳۰ (۱/۸۵-۳/۱)	۲/۳۰ (۱/۸۵-۳/۱)
۱۰	پهنه زاگرس	کلسنگ	۲/۱۷ (۲/۰۳-۲/۴۸)	۲/۲۹ (۲/۱۷-۲/۵۲)	۱۸/۳۹ (۲/۳۴-۲۴/۳۷)	۱۳/۳۶ (۳/۴۷-۱۹/۰۱)	۲/۳۱ (۲/۴۰-۲/۷۵)	۲/۳۱ (۲/۴۰-۲/۷۵)	۲/۳۱ (۲/۴۰-۲/۷۵)	۲/۳۱ (۲/۴۰-۲/۷۵)
۱۱		رس‌سنگ	۲/۱۷ (۲/۱۲-۲/۵۳)	۲/۴۰ (۲/۱۸-۲/۷۳)	۲۲/۲۲ (۸/۵۶-۳۴/۱۸)	۱۳/۵۸ (۴/۱۵-۱۵/۲۰)	۲/۳۲ (۲/۵۴-۲/۷۷)	۴۲/۵ (۳۰/۷-۵۴/۵)	۱۹/۵۵ (۱۵/۵-۲۴/۴)	۱۹/۵۵ (۱۵/۵-۲۴/۴)
۱۲	پهنه زاگرس	مارن	۲/۳۳ (۱/۸۷-۲/۴۴)	۲/۴۶ (۲/۰۷-۲/۷۳)	۱۶/۳۴ (۴/۱۸-۲۷/۰۶)	۱۲/۷۶ (۳/۴۴-۲۲/۱۹)	۲/۳۱ (۲/۴۸-۲/۷۹)	۳۳/۵ (۳۳/۱-۴۱/۸)	۲۳/۷۵ (۱۵/۸-۲۸/۶)	۲۳/۷۵ (۱۵/۸-۲۸/۶)

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مقاومتی واحدهای سنگی سازند آغاچاری در پهنه زاگرس

ردیف	موقعیت	جنس سنگ	$\sigma_c$ (MPa)	$\nu$	$E$ (GPa)	$IS_{(50)}$	$\sigma_t$ (MPa)
۱	شمال غربی	ماسه سنگ	۲۱/۶۴ (۷/۰-۵۴/۱۵)	۰/۲۷ (۰/۲۵-۰/۳۳)	۲/۸۵ (۰/۷۴-۶/۶۷)	۱/۶۲ (۰/۵۴-۳/۱۷)	۲/۱۸ (۰/۸۵-۴/۲۹)
۲		لای سنگ	۱۹/۷۳ (۱/۸۵-۳۸/۸۵)	۰/۲۸ (۰/۲۵-۰/۳۶)	۲/۰۷ (۰/۱۰-۴/۰)	۱/۲۳ (۰/۱۴-۲/۱۶)	۱/۹۵ (۰/۲۱-۳/۴۵)
۳		گل سنگ	۱۴/۱۷ (۲/۷۹-۳۷/۲۹)	۰/۳۲ (۰/۲۹-۰/۴۰)	۱/۷۴ (۰/۳۴-۵/۵۵)	۱/۱۲ (۰/۲۳-۱/۵۲)	۱/۶۹ (۰/۳۱-۳/۴۶)
۴		رس سنگ	۱۷/۴۴ (۱/۱۴-۴۰/۷۵)	۰/۳۴ (۰/۳۰-۰/۴۲)	۱/۹۰ (۰/۲۳-۳/۸۰)	۱/۲۲ (۰/۱۰-۲/۵۴)	۱/۸۰ (۰/۱۱-۳/۷۹)
۵		مارن	۲۵/۳۶ (۱۰/۷-۳۱/۴۹)	۰/۳۰ (۰/۲۶-۰/۳۶)	۲/۱۷ (۰/۸۹-۳/۳۰)	۱/۵۴ (۰/۶۷-۱/۸۸)	۱/۹۲ (۰/۷۶-۲/۴۵)
۶	مرکزی	ماسه سنگ	۴۶/۸۴ (۳۰/۶۷-۸۶/۱۵)	۰/۲۴ (۰/۱۹-۰/۲۸)	۵/۴۵ (۱/۱۶-۱۱/۶۴)	۳/۱۱ (۱/۹۴-۵/۲۵)	۴/۹۵ (۲/۶۷-۷/۸۷)
۷		مارن	۲۶/۷۴ (۱۲/۱۸-۴۱/۵۶)	۰/۲۹ (۰/۲۵-۰/۳۷)	۱/۷۰ (۰/۷۵-۳/۶۲)	۱/۳۸ (۰/۸۵-۲/۵۴)	۲/۲۲ (۰/۸۷-۳/۷۸)
۸	جنوب شرقی	ماسه سنگ	۱۴/۲۱ (۵/۳۳-۱۷/۴۱)	۰/۲۹ (۰/۲۷-۰/۳۵)	۱/۱۶ (۰/۵۷-۳/۱۴)	۰/۹۴ (۰/۳۶-۱/۸۶)	۱/۳۰ (۰/۴۷-۱/۵۴)
۹		لای سنگ	۱۲/۵۴ (۴/۸۶-۲۳/۰)	۰/۳۰ (۰/۲۶-۰/۳۶)	۱/۲۱ (۰/۵۱-۱/۷۶)	۰/۷۵ (۰/۴-۱/۲۴)	۱/۲۴ (۰/۴۲-۱/۵۴)
۱۰		گل سنگ	۱۰/۲۷ (۵/۵۰-۲۲/۳۰)	۰/۳۳ (۰/۲۹-۰/۴۰)	۱/۰۷ (۰/۵۴-۲/۰۵)	۰/۶۱ (۰/۵۹-۱/۲۳)	۱/۰۳ (۰/۶۵-۱/۶۰)
۱۱		رس سنگ	۹/۱۵ (۸/۸۵-۱۵/۲۰)	۰/۳۵ (۰/۳۲-۰/۴۱)	۱/۱۵ (۰/۴۸-۲/۲۱)	۰/۷۱ (۰/۶۸-۰/۷۳)	۰/۹۶ (۰/۷۸-۱/۰۷)
۱۲		مارن	۱۸/۲۱ (۹/۷۵-۲۸/۶۴)	۰/۳۰ (۰/۲۶-۰/۳۷)	۱/۸۶ (۰/۸۸-۳/۱۷)	۱/۴۴ (۰/۶۸-۱/۷۶)	۱/۳۱ (۰/۸۱-۲/۳۰)

## ۲-۲- مقاومت فشاری تک محوری

در مهندسی سنگ به میزان وسیعی از مقاومت فشاری تک محوری و ضرائب الاستیسیته سنگ ها جهت طبقه بندی آنها و طراحی سازه های سطحی و زیر سطحی استفاده می شود (Gunsallus & Kulhawy, 1986). بر اساس داده های (جدول ۳)، کمترین مقدار متوسط مقاومت فشاری تک محوری مربوط به واحد رس سنگی بخش جنوب شرقی (۹/۷۵ MPa) و بالاترین مقدار متوسط آن مربوط به واحد ماسه سنگ بخش مرکزی (۴۶/۸۴ MPa) بدست آمده است. بررسی مقادیر متوسط مدول الاستیسیته و ضریب پواسون نمونه ها نشان می دهد که پائین ترین مقادیر متوسط آنها به ترتیب مربوط به واحدهای گل سنگی بخش جنوب شرقی ( $E=1/07$  GPa) و ماسه سنگی بخش مرکزی ( $\nu=0/24$ ) و بالاترین مقادیر متوسط به ترتیب مربوط به واحدهای ماسه سنگی بخش مرکزی ( $E=5/45$  GPa) و رس سنگ های بخش جنوب شرقی ( $\nu=0/35$ ) است.

## ۲-۳- تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم

آزمایش غیر مستقیم برزلی ساده ترین و سریع ترین روش برای تعیین مقاومت کششی سنگ ها تشخیص داده شده است

(Lavrov & Vervoort, 2002). نتایج نشان می دهند کمترین مقدار متوسط مقاومت کششی به واحد رس سنگی در جنوب شرق (۰/۹۶ MPa) و بیشترین مقدار متوسط آن به واحد ماسه سنگی بخش مرکزی (۴/۹۵ MPa) تعلق دارد.

## ۳- سرعت صوت و ثابت های الاستیک دینامیکی

آزمایش تعیین سرعت امواج صوتی از جمله آزمایش های دینامیکی و غیر مخرب است که به وسیله آن می توان ثابت های الاستیک دینامیکی سنگ نظیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون را تعیین نمود (Abdullah & Dhawan, 2002). در جدول ۴ مقادیر حاصل از این آزمایش ارائه شده است. کمترین سرعت متوسط موج تراکمی الاستیک ( $V_p$ )، مربوط به واحد لای سنگ بخش جنوب شرقی (۱۵۶۱ m/s) و بالاترین مقدار متوسط آن مربوط به واحد ماسه سنگ بخش مرکزی (۳۵۶۲ m/s) می باشد.

## ۴- شاخص دوام وارفتگی

آزمایش شاخص دوام وارفتگی (Durability) جهت ارزیابی پایداری سنگ ها در برابر فرآیندهای هواز دگی مورد استفاده

بخش‌های شمال‌غربی و جنوب‌شرقی ناپایدارترین و ماسه‌سنگ‌های بخش مرکزی مقاوم‌ترین واحدها در برابر فرآیندهای هوازدگی هستند.

#### ۵- مقاومت فشاری سه‌محوری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری جهت محاسبه ظرفیت باربری پی‌های سنگی، طراحی سدها و حفاریات زیرزمینی از اهمیت بسیاری برخوردار است (Aversa & Evangelista, 1993) و (Ramamurthy, 2001). آزمایش‌های مقاومت فشاری سه‌محوری در نرخ بارگذاری حدود ۰/۵ مگاپاسکال در ثانیه و سطوح تنش محصورکننده  $(\sigma_3)$  ۲، ۶، ۱۰ و ۱۴ مگاپاسکال انجام گردیده است. با توجه به نتایج حاصل از این آزمایش‌ها که در جدول ۷ ارائه گردیده، زاویه اصطکاک داخلی متوسط نمونه‌ها بین ۲۴/۵ (رس سنگ جنوب‌شرقی) تا ۵۳/۲ درجه (ماسه‌سنگ مرکزی) و چسبندگی متوسط بین ۳/۶۵ MPa (رس سنگ جنوب‌شرقی) تا ۷/۸۵ MPa (ماسه‌سنگ مرکزی) قرار دارد.

قرار می‌گیرد. هر چه این شاخص (Id) بیشتر باشد، میزان فرسایش، انحلال و خرد شدن سنگ‌ها در برابر هوازدگی کمتر است (Ulusay & Sonmez, 2000). فرانکلین (Franklin & Chandra, 1972)، گامبل (Gamble, 1971) و آمفوت (Aufmuth, 1970) از جمله افرادی هستند که سنگ‌ها را بر اساس شاخص دوام‌پذیری و یا درصد افت وزنی رده‌بندی کرده‌اند. نتایج این آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق نتایج بدست آمده واحد رس سنگی در بخش جنوب‌شرقی دارای حداقل مقدار متوسط شاخص دوام در سیکل‌های اول و دوم به ترتیب برابر ۵۶/۲۸ و ۴۳/۶۵ درصد است. که در سیکل دوم ۱۰۰ درصد افت وزنی داشته است. همچنین ماسه‌سنگ‌های بخش مرکزی در هر دو سیکل آزمایش دارای بالاترین شاخص دوام‌وارفتگی (Id=۹۹/۳۷٪) و Id=۹۸/۲۳٪ و Id=۲=۹۸/۲۳٪ بوده‌اند. در جدول ۶ واحدهای سنگی سازند آغاچاری در سیستم‌های طبقه‌بندی فرانکلین (شاخص دوام در سیکل اول)، گامبل (شاخص دوام در سیکل دوم) و آمفورت (درصد افت وزنی در سیکل اول) مورد رده‌بندی قرار گرفته‌اند. این ارزیابی نشان می‌دهد رس سنگ‌های

جدول ۴- نتایج آزمایش تعیین سرعت امواج صوتی و ثابت‌های الاستیک دینامیکی سنگ

$E_d$ (GPa)			$\nu_d$			$V_s$ (m/s)			$V_p$ (m/s)			جنس سنگ	موقعیت
(Ave)	(Max)	(Min)	(Ave)	(Max)	(Min)	(Ave)	(Max)	(Min)	(Ave)	(Max)	(Min)		
۱۱/۲۷	۱۶/۸۵	۴/۳۹	۰/۲۳	۰/۲۷	۰/۱۹	۱۵۹۴	۳۲۵۱	۷۶۸	۲۳۲۶	۴۸۷۸	۱۱۲۹	ماسه‌سنگ	شمال‌غربی
۶/۸۴	۱۰/۵۲	۱/۷۳	۰/۲۲	۰/۲۹	۰/۱۷	۱۵۲۴	۲۱۳۶	۵۲۷	۲۳۳۷	۳۱۲۴	۷۲۹	لای سنگ	
۵/۲۷	۱۴/۹۵	۱/۲۹	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۲۱	۱۴۲۷	۱۸۲۵	۵۶۶	۲۱۰۸	۲۷۱۵	۷۵۲	گل‌سنگ	
۳/۸۴	۷/۴۰	۱/۶۷	۰/۲۹	۰/۳۶	۰/۲۳	۱۲۹۰	۱۷۵۵	۵۷۴	۲۳۱۷	۲۸۷۰	۸۴۷	رس سنگ	
۷/۲۷	۱۲/۴۸	۲/۲۶	۰/۲۴	۰/۳۱	۰/۲۲	۱۳۳۵	۲۱۲۴	۶۸۹	۲۰۵۸	۳۱۴۰	۱۱۲۹	مارن	
۱۶/۵۶	۳۲/۰۷	۱۲/۹۵	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۱۷	۲۴۱۹	۳۱۴۲	۱۸۶۷	۳۵۶۲	۴۳۸۷	۲۷۵۰	ماسه‌سنگ	مرکزی
۸/۷۹	۱۵/۴۶	۲/۹۰	۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۲۱	۱۴۱۷	۲۱۲۴	۷۵۰	۲۱۱۷	۳۱۴۰	۱۲۳۶	مارن	
۱۰/۱۷	۱۶/۱۹	۲/۹۶	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۲۳	۱۱۳۹	۱۳۱۶	۷۱۵	۱۶۷۲	۱۸۱۵	۱۰۵۰	ماسه‌سنگ	جنوب‌شرقی
۵/۶۲	۸/۷۷	۱/۲۴	۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۲۲	۱۰۴۸	۱۵۵۸	۴۶۳	۱۵۶۱	۲۱۷۵	۶۷۴	لای سنگ	
۸/۳۴	۱۱/۹۳	۲/۹۷	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۲۴	۱۳۵۲	۱۶۴۲	۷۸۹	۲۱۶۲	۲۴۵۰	۱۲۱۲	گل‌سنگ	
۷/۸۴	۱۲/۴۵	۳/۱۶	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۳۲	۱۴۷۸	۱۶۸۵	۸۵۳	۲۲۰۵	۲۵۱۵	۱۲۶۴	رس سنگ	
۵/۴۹	۱۰/۹۳	۱/۷۹	۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۲۲	۱۳۱۲	۱۹۶۳	۶۲۸	۱۸۹۴	۲۳۴۵	۱۰۷۵	مارن	

جدول ۵- نتایج آزمایش دوام پذیری سنگ

D2	D1	Id-2 (%)			Id-1 (%)			جنس سنگ	موقعیت
		(Ave)	(Max)	(Min)	(Ave)	(Max)	(Min)		
۱۹/۶۱	۱۰/۸۳	۸۰/۳۹	۹۶/۸۷	۶۱	۸۹/۱۷	۹۷/۲۴	۷۸/۴۰	ماسه سنگ	شمال غربی
۲۵/۶۳	۱۶/۶۸	۷۴/۳۷	۸۴/۳۰	۵۳/۵۵	۸۳/۳۲	۹۱/۵۰	۶۴/۷۹	لای سنگ	
۳۶/۰۴	۲۳/۷۱	۶۳/۹۶	۷۶/۳۵	۳۴/۲۹	۷۶/۲۹	۸۴/۲۵	۴۷/۲۶	گل سنگ	
۴۸/۲۴	۳۵/۴۶	۵۱/۷۶	۷۱/۲۶	-----	۶۴/۵۴	۸۵/۴۷	۷/۱۵	رس سنگ	
۲۸/۵۵	۲۰/۳۷	۷۱/۴۵	۷۸/۲۴	۵۹/۳۱	۷۹/۶۳	۸۴/۲۵	۷۲/۴۷	مارن	
۱/۷۷	۰/۶۳	۹۸/۲۳	۹۹/۰۴	۹۷/۲۸	۹۹/۳۷	۹۹/۶۸	۹۸/۹۱	ماسه سنگ	مرکزی
۲۵/۶۳	۱۴/۵۹	۷۴/۳۷	۸۳/۶۶	۶۶/۴۵	۸۵/۴۱	۹۲/۱۷	۷۹/۵۰	مارن	
۳۹/۷۴	۲۳/۳۶	۶۰/۲۶	۷۸/۲۰	۵۳/۸۲	۷۶/۶۴	۸۴/۷۰	۶۲/۷۱	ماسه سنگ	جنوب شرقی
۴۹/۳۹	۳۲/۶۱	۵۰/۶۱	۶۳/۴۵	۳۶/۵۸	۶۷/۳۹	۸۲/۳۰	۵۲/۸۶	لای سنگ	
۵۴/۶۱	۳۹/۶۷	۴۵/۳۹	۶۸/۲۴	۱۴/۹۶	۶۰/۳۳	۷۴/۲۵	۲۷/۳۵	گل سنگ	
۵۶/۳۵	۴۳/۷۲	۴۳/۶۵	۶۴/۵۰	-----	۵۶/۲۸	۷۶/۸۴	۸/۵۵	رس سنگ	
۳۰/۶۲	۲۸/۷۴	۶۹/۳۸	۷۴/۶۴	۵۴/۲۳	۷۱/۲۶	۷۸/۳۸	۶۷/۴۱	مارن	

جدول ۶- توصیف دوام پذیری واحدهای سنگی آغاچاری بر اساس رده بندی های مختلف

محدوده	جنس سنگ	رده بندی فرانکلین	رده بندی گامبل	رده بندی آمفوت
شمال غربی	ماسه سنگ	مقاوم تا خیلی مقاوم	متوسط تا مقاوم	B - C
	لای سنگ	متوسط تا مقاوم	ضعیف تا متوسط	C
	گل سنگ	ضعیف تا مقاوم	ضعیف تا متوسط	C
	رس سنگ	خیلی ضعیف تا مقاوم	ضعیف تا متوسط	C
	مارن	متوسط تا مقاوم	متوسط	C
مرکزی	ماسه سنگ	شدیداً مقاوم	مقاوم تا بسیار مقاوم	A - B
	مارن	مقاوم تا خیلی مقاوم	متوسط	C
جنوب شرقی	ماسه سنگ	متوسط تا مقاوم	ضعیف تا متوسط	C
	لای سنگ	متوسط تا مقاوم	ضعیف تا متوسط	C
	گل سنگ	ضعیف تا متوسط	بسیار ضعیف تا متوسط	C
	رس سنگ	خیلی ضعیف تا مقاوم	بسیار ضعیف تا متوسط	C
	مارن	متوسط تا مقاوم	ضعیف تا متوسط	C

## بحث

و دانسیته بالاتر و درصد تخلخل و جذب آب کمتری هستند. مقایسه مقادیر میانگین شاخص خمیری نمونه های گلی نشان می دهد که با کاهش اندازه ذرات در سنگ، مقدار این شاخص افزایش یافته است.

بر اساس طبقه بندی های دیر (۱۹۶۸) و بنیواسکی (۱۹۷۳) و نتایج آزمایش های باز نقطه ای، واحدهای مختلف سازند آغاچاری در رده های سنگ های ضعیف تا مقاوم و مطابق طبقه بندی براس و فرانکلین (۱۹۷۲) در رده های با

ارزیابی اولیه مقادیر خصوصیات فیزیکی میانگین واحدهای سنگی سازند آغاچاری مشخص می سازد که واحد ماسه سنگی بخش مرکزی نسبت به واحدهای مشابه در دو بخش شمال غربی و جنوب شرقی پهنه زاگرس، دارای وزن مخصوص و دانسیته بالاتر و درصد تخلخل و جذب آب کمتری است. همچنین واحدهای سنگی واقع در بخش شمال غربی در مقایسه با واحدهای بخش جنوب شرقی، دارای وزن مخصوص



(Soft Rocks) با مقاومت کمتر از ۲۵ MPa، قرار می‌گیرند.

تنها واحد ماسه‌سنگی بخش مرکزی در گروه سنگ‌های با مقاومت متوسط تا بالا قرار دارد.

مقاومت پایین تا خیلی بالا قرار می‌گیرند ( Bieniawski, 1974).

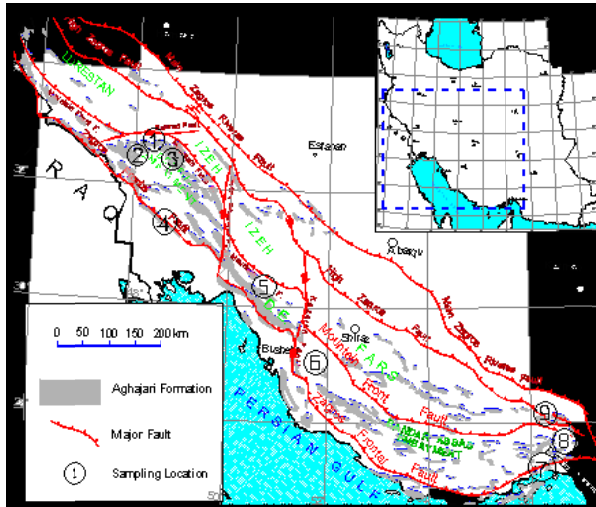
مطابق نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوری، اغلب واحدهای سنگی مورد مطالعه در طبقه‌بندی‌های ISRM و انجمن بین‌المللی مکانیک خاک و مهندسی پی، جزو سنگ‌های نرم

جدول ۷- نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری

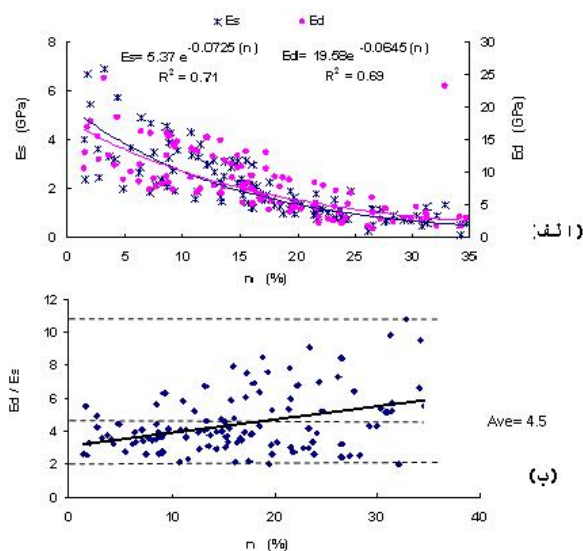
C (MPa) Ave. (Min-Max)	$\phi$ (Degree) Ave. (Min-Max)	میانگین سطوح تنش اصلی (MPa)					جنس	موقعیت
		۱۴	۱۰	۶	۲	$\sigma_3$		
۵/۶۴ (۲/۴۵-۷/۷۸)	۳۸/۲ (۳۱/۵-۴۶/۰)	۸۷/۷۴ (۶/۲)	۷۶/۱ (۷/۶)	۶۳/۶۸ (۱۰/۶)	۳۸/۹۳ (۱۹/۵)	$\sigma_1$ (MC)*	ماسه‌سنگ	شمال غربی
۴/۸ (۱/۵۰-۶/۸۴)	۳۱/۸ (۲۸/۷-۳۸/۹)	۶۳/۴۸ (۴/۵)	۵۴/۱۴ (۵/۴)	۴۶/۱ (۷/۶)	۳۴/۰ (۱۷/۰)		لای سنگ	
۶/۱۸ (۳/۱۷-۷/۴۶)	۳۱/۰ (۲۶/۵-۳۶/۵)	۵۵/۶۳ (۳/۹)	۵۰/۴۷ (۵/۰)	۴۱/۷۴ (۶/۹)	۳۰/۲۴ (۱۵/۱)		گل‌سنگ	
۵/۱۵ (۰/۴۵-۹/۷۵)	۲۸/۸ (۲۴/۷-۳۵)	۵۸/۱ (۴/۱)	۵۲/۱ (۵/۲)	۴۸/۷۴ (۸/۱)	۳۴/۳ (۱۷/۱)		رس سنگ	
۴/۶۱ (۲/۶۲-۶/۸۵)	۳۲/۴ (۲۵/۰-۴۲/۷)	۵۴/۱۲ (۳/۸)	۴۶/۷۴ (۴/۶)	۳۷/۲ (۶/۲)	۲۶/۱۵ (۱۳/۱)		مارن	
۷/۸۵ (۴/۹۵-۹/۳۶)	۵۳/۲ (۴۱-۵۸/۵)	۱۱۹/۷۶ (۸/۵)	۹۸/۵۱ (۹/۸)	۸۲/۸۲ (۱۳/۸)	۶۴/۰ (۳۲/۰)	$\sigma_1$ (MC)	ماسه‌سنگ	مرکزی
۵/۳ (۳/۷۸-۷/۷۵)	۳۴/۵ (۲۷/۵-۴۶/۸)	۷۴/۳۸ (۵/۳)	۶۵/۵۷ (۶/۵)	۵۴/۲۳ (۹/۰)	۴۱/۰۲ (۲۰/۵)		مارن	
۴/۷۴ (۱/۵۷-۶/۲۷)	۳۱/۸۵ (۲۷-۳۶)	۷۴/۰ (۵/۳)	۵۸/۷۱ (۵/۸)	۴۱/۱۷ (۶/۸)	۲۶/۱۹ (۱۳/۱)	$\sigma_1$ (MC)	ماسه‌سنگ	جنوب شرقی
۳/۵۰ (۱/۳۰-۴/۷۶)	۲۸/۱۵ (۲۴/۸-۳۴/۵)	۴۷/۶۶ (۳/۴)	۳۶/۲۲ (۳/۶)	۲۹/۵۳ (۴/۹)	۱۸/۲۸ (۹/۱)		لای سنگ	
۴/۴۴ (۲/۸۲-۶/۲۵)	۲۸ (۲۴-۳۱/۵)	۴۰/۶۸ (۲/۹)	۳۳/۷۴ (۳/۴)	۲۵/۳۵ (۴/۲)	۱۶/۰۸ (۸/۰)		گل‌سنگ	
۳/۶۵ (۲/۲۷-۴/۹۵)	۲۴/۵ (۲۱/۵-۳۰)	۴۵/۷۵ (۳/۲)	۳۸/۱۲ (۳/۸)	۲۸/۱۱ (۴/۷)	۱۹/۱۸ (۹/۶)		رس سنگ	
۴/۲۵ (۱/۵۷-۵/۹۵)	۳۰/۲ (۲۳/۵-۴۰/۸)	۴۸/۱۶ (۳/۴)	۴۰/۷۴ (۴/۱)	۳۲/۱۸ (۵/۳)	۲۱/۱ (۱۰/۵)		مارن	

• ضریب موگی (Mogi Coefficient) بدست آمده برای هریک از نمونه‌ها در آزمایش سه‌محوری

نشان می‌دهد مقاومت فشاری با درصد تخلخل ( $R^2=0.75$ ) و سرعت موج با دانسیته خشک ( $R^2=0.70$ ) رابطه مناسب‌تری را بدست می‌دهند.



شکل ۱- گسترش سطحی سازند آغاچاری در پهنه زاگرس به همراه نقاط نمونه‌برداری



شکل ۲- ارتباط بین درصد تخلخل با (الف) مدول‌های الاستیک استاتیکی و دینامیکی (ب) نسبت آنها

از آنجائیکه تعیین شاخص‌های مقاومتی سنگ نظیر شاخص بارنقطة‌ای، کشش غیرمستقیم برزیلی و سرعت موج نسبت به آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری ساده و ارزان‌تر می‌باشد، در شکل‌های ۴ تا ۶ (الف) سعی شده تا رابطه بین این شاخص‌ها با مقاومت فشاری تک‌محوری واحدهای سنگی

همچنین نسبت مدولی برای کلیه نمونه‌های سازند آغاچاری، کمتر از ۲۰۰ (متوسط ۱۰۳/۵) بدست آمده که بر اساس طبقه‌بندی دیر و میلر در گروه سنگ‌های CL تا EL، به مفهوم سنگ‌های با مقاومت بسیار کم تا متوسط و نسبت مدولی پایین قرار می‌گیرند.

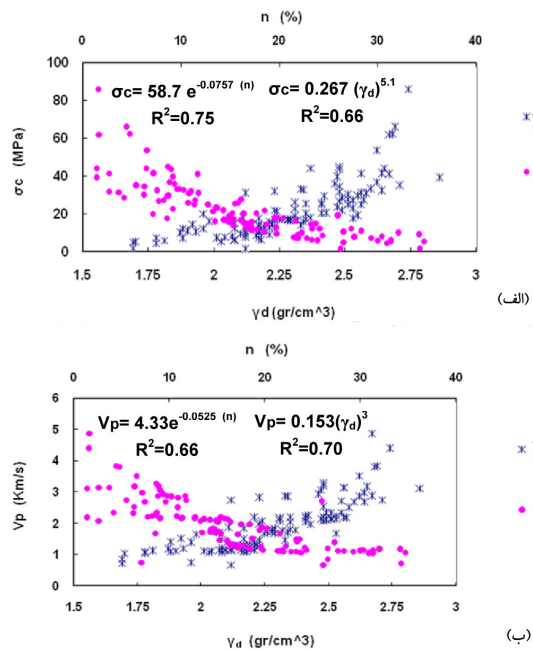
نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم برزیلی نشان می‌دهد که مقاومت کششی سنگ با ریزتر شدن اندازه ذرات، به علت افزایش چسبندگی، بیشتر شده است.

آزمایش تعیین سرعت امواج الاستیک در سنگ نشان می‌دهد که این پارامتر با دانسیته خشک و مقاومت‌های فشاری و کششی سنگ‌ها نسبت مستقیم و با درصد تخلخل آنها نسبت عکس دارد. همانگونه که انتظار می‌رود با ریزتر شدن اندازه ذرات در سنگ، سرعت امواج الاستیک افزایش داشته است. بطورکلی محاسبه مقادیر ثابت‌های الاستیک نشان می‌دهد که در حالت دینامیکی نسبت به استاتیکی، مقادیر بالاتری (۲ تا بیش از ۱۰ برابر و متوسط ۴/۵) برای آنها حاصل شده است. تحلیل‌های آماری به روش رگرسیون خطی و غیرخطی برای مقادیر مدول الاستیک در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی نشان می‌دهند که از بین خصوصیات فیزیکی، درصد تخلخل پارامتر مناسب‌تری جهت ارزیابی این ثابت ژئومکانیکی است.

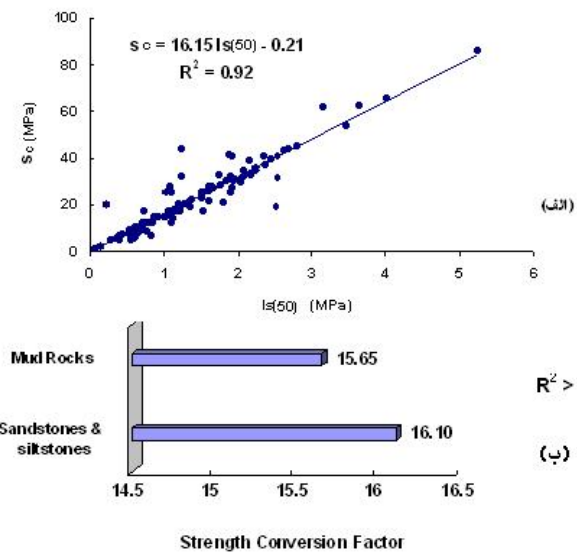
شکل ۲- الف نشان می‌دهد که درصد تخلخل با مدول الاستیک استاتیکی ارتباط بیشتری ( $R^2=0.71$ ) نسبت به حالت دینامیکی ( $R^2=0.69$ ) دارد. این رابطه برای هر دو حالت بصورت نمایی منفی بدست آمده است. همچنین این ارزیابی نشان می‌دهد که با کاهش درصد تخلخل نمونه‌ها (یا افزایش دانسیته)، اختلاف مقادیر ثابت‌های الاستیک استاتیکی و دینامیکی کمتر شده و به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند (شکل ۲-ب).

همچنین روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج P با درصد تخلخل و دانسیته خشک در شکل ۳ الف و ب ارائه شده است. این شکل‌ها نشان می‌دهد که هر دو پارامتر با درصد تخلخل بصورت نمایی نسبت عکس و با دانسیته خشک بصورت توانی نسبت مستقیم دارند. این شکل

نشان داده شده است. همچنین محدوده ضریب تعیین ( $R^2$ ) آنها نیز ارائه گردیده است. در شکل ۷ الف و ب رابطه بین شاخص بارنقطه‌ای با مقاومت کششی برزیلی و ضرایب تبدیل برای این واحدهای سنگی، ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، ضریب تبدیل شاخص بارنقطه‌ای برای واحدهای ماسه‌سنگ و لای‌سنگ آغاچاری برابر ۱۶/۱ و برای سنگ‌های گلی آن برابر ۱۵/۶۵ بدست آمده است. این مقادیر با نتایج سایر محققین بخصوص (Read et al.) یعنی  $\sigma_c = 16 I_s(50)$  ارائه شده برای سنگ‌های رسوبی، تطابق بسیار خوبی دارد (Norbury, 1986). همچنین ضرایب تبدیل مقاومت کششی برزیلی ( $\sigma_t$ ) و سرعت موج الاستیک ( $V_p$ ) به مقاومت فشاری تک‌محوری برای واحدهای ماسه‌سنگ و لای‌سنگ به ترتیب برابر ۱۱/۲۴ و ۱۱/۵۱ و برای واحدهای گلی به ترتیب برابر ۱۰/۶۳ و ۱۰/۴۷ حاصل شده است (شکل‌های ۵ و ۶). با توجه به محدوده  $(0.97 < R^2 < 0.65)$  بدست آمده برای سرعت امواج الاستیک، مشخص می‌شود ارتباط این شاخص با مقاومت فشاری تک‌محوری به نسبت سایر شاخص‌ها کمتر است. ضرایب تبدیل شاخص بارنقطه‌ای به مقاومت کششی برزیلی نیز برای واحدهای ماسه‌سنگ و لای‌سنگ برابر ۱/۴۲ و برای سنگ‌های گلی برابر ۱/۴۶ بدست آمده است.

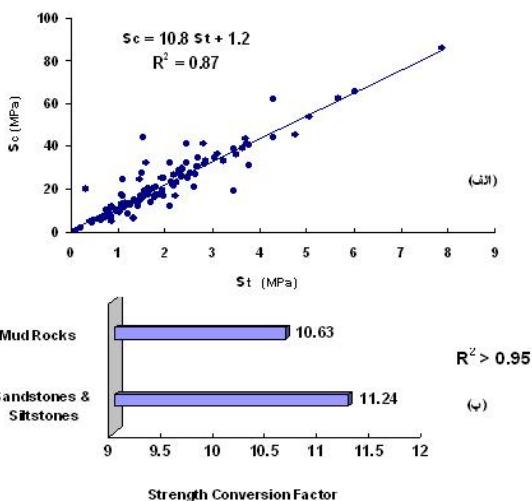


شکل ۳- ارتباط بین درصد تخلخل و دانسیته خشک با مقاومت تک‌محوری (الف) و سرعت موج (ب)



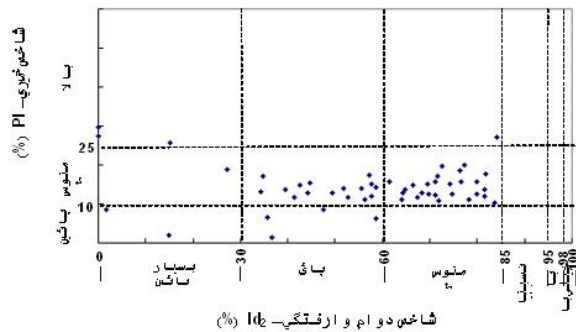
شکل ۴- (الف) رابطه شاخص بارنقطه‌ای با مقاومت فشاری تک‌محوری (ب) ضرایب تبدیل واحدهای سنگی

سازند آغاچاری نشان داده شود. در قسمت‌های (ب) نیز ضرایب تبدیل مقاومتی که از روش رگرسیون خطی گذر کرده از مبداء مختصات بدست آمده، برای واحدهای ماسه‌سنگی و لای‌سنگی پایدار در برابر هوازدگی و همچنین سنگ‌های گلی (لای‌سنگ‌های سست، گل‌سنگ‌ها، رس‌سنگ‌ها و مارن‌ها)



شکل ۵- (الف) رابطه مقاومت کشش برزیلی با مقاومت فشار تک‌محوری (ب) ضرایب تبدیل واحدهای سنگی

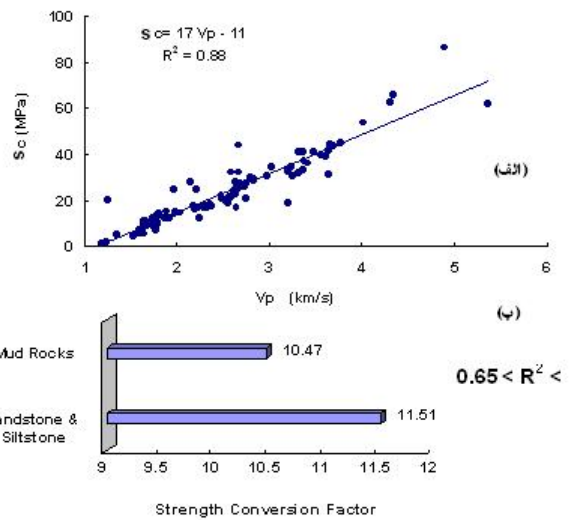
سازند تنها در گروه C قرار می‌گیرند. به علاوه در مورد سنگ‌های گلی، گامبل (۱۹۷۱) نمودار ارائه شده در شکل ۸ را پیشنهاد نموده است. این نمودار ترکیبی از شاخص دوام و ارتفتگی در سیکل دوم ( $Id_2$ ) و شاخص خمیری (PI) است. بر اساس این نمودار، بیش از ۷۵ درصد سنگ‌های گلی سازند آجاجاری دارای شاخص خمیری متوسط و شاخص دوام و ارتفتگی پایین تا متوسط هستند.



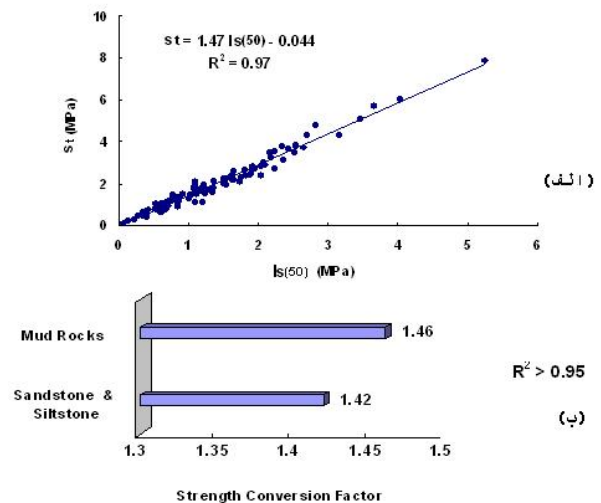
شکل ۸- طبقه‌بندی سنگ‌های گلی سازند آجاجاری بر اساس روش گامبل (۱۹۷۲)

با مقایسه مقادیر تنش‌های اصلی حداکثر بدست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری، مشخص می‌شود که با افزایش تنش محصورکننده، در کلیه نمونه‌ها مقاومت نهایی افزایش یافته است. این رفتار می‌تواند بیانگر این نکته باشد که بلوک‌های انتخاب شده دارای حداقل میزان هوازدگی بوده و در ضمن از لحاظ ماهیت سنگ بکر، هر یک از واحدهای سنگی آجاجاری تقریباً همگن بوده و دارای حداقل سطوح ضعف می‌باشند.

با استفاده از مقادیر تنش‌های اصلی بدست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری و برنامه Rocdata، پوش گسیختگی کلیه واحدهای سنگی سازند آجاجاری برازش شده و مقادیر  $m_i$  و  $\sigma_{ci}$  آنها محاسبه گردیده است. نتیجه این ارزیابی در شکل ۹ و جدول ۸ نشان داده شده است. در شکل ۹- الف علاوه بر پوش گسیختگی، خط موگی (Mogi Line)، که بیانگر انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر است نیز بر روی کلیه نمودارها رسم گردیده تا بتوان به کمک آن سطوح تنش همه‌جانبه‌ای که هر یک از واحدهای سنگی در آن سطح تنش، رفتار شکل‌پذیر از خود نشان می‌دهند را شناسایی نمود. در صورتیکه پوش



شکل ۶- (الف) رابطه سرعت موج تراکمی با مقاومت فشاری تک‌محوری (ب) ضرایب تبدیل واحدهای سنگی



شکل ۷- (الف) رابطه شاخص بارنقطه‌ای با مقاومت کششی برزیلی (ب) ضرایب تبدیل واحدهای سنگی

بر اساس نتایج آزمایش‌های دوام‌پذیری و رده‌بندی فرانکلین، واحدهای سنگی سازند آجاجاری در گروه سنگ‌های خیلی ضعیف تا شدیداً مقاوم قرار می‌گیرند. رده‌بندی گامبل نشان می‌دهد واحدهای سنگی بخش جنوب‌شرقی در محدوده بسیار ضعیف تا متوسط، بخش شمال‌غربی در محدوده بسیار ضعیف تا مقاوم و بخش مرکزی در محدوده متوسط تا بسیار مقاوم قرار دارند. همچنین در رده‌بندی آسفوت واحد ماسه‌سنگی بخش مرکزی در گروه A تا B، ماسه‌سنگ شمال‌غربی در گروه B تا C و سایر واحدهای سنگی این

به این ترتیب با توجه به پوش‌های گسیختگی و خطوط موگی ترسیم شده بر روی نمودارها، می‌توان سطوح تنش همه‌جانبه‌ای را که در هر یک از واحدهای سنگی مورد بررسی در آنها انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر را از خود نشان می‌دهند، مطابق جدول ۸ پیشنهاد نمود.

شکل ۹- ب نشان می‌دهد مقادیر محاسبه شده  $m_i$  با مقادیر پیشنهاد شده توسط هوک و براون برای این پارامتر، انطباق بسیار نزدیکی دارند ( $R^2=0/97$ ). به نحویکه تنها در مورد ماسه‌سنگ‌ها کمی پایین‌تر از مقدار توصیه شده ( $m_i=12/42$ ) بدست آمده و برای سایر واحدهای سنگی در محدوده پیشنهادی قرار دارد.

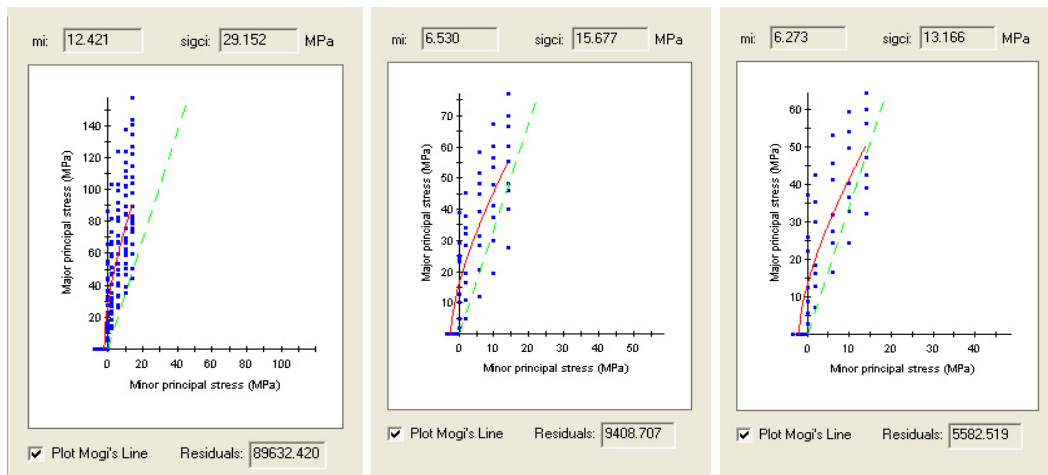
جدول ۸- مقادیر  $m_i$  و  $\sigma_{ci}$  بدست آمده از آزمایش‌های سه‌محوری به همراه مقادیر  $m_i$  توصیه شده توسط هوک- براون و سطوح  $\sigma_3$  پیشنهاد شده در این مقاله برای شرط انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر

واحد سنگی	$m_i$ (Calculated)	$m_i$ (Suggested)	$\sigma_{ci}$ (MPa) (Calculated)	$\sigma_3$ (MPa) (Suggested)
ماسه‌سنگ	۱۲/۴۲	$17 \pm (4)$	۲۹/۱۵	۳۵ - ۵۵
لای سنگ	۶/۵۳	$7 \pm (2)$	۱۵/۶۸	۱۵ - ۲۰
گل‌سنگ	۶/۲۷	$7 \pm (4)$	۱۳/۱۷	۱۰ - ۱۵
رس‌سنگ	۶/۷۶	$4 \pm (2)$	۱۶/۰۷	۱۰ - ۱۵
مارن	۷/۱۴	$7 \pm (2)$	۱۷/۷۴	۱۵ - ۲۰

#### نتیجه‌گیری

• سازند آجاجاری با دو رخساره متفاوت در پهنه زاگرس مشخص می‌شود. رخساره اول اغلب شامل ماسه‌سنگ، لای سنگ، گل‌سنگ، رس‌سنگ و گاه مارن است که بیشتر در محدوده شمال غربی و جنوب شرقی این پهنه (قسمت‌های شمالی فروفاتدگی دزفول و ناحیه بندرعباس) گسترش دارد. رخساره دوم اغلب شامل ماسه‌سنگ و مارن است که بیشتر در ناحیه مرکزی (فارس ساحلی و قسمت‌های جنوبی و میانی فروفاتدگی دزفول) قابل مشاهده است. از لحاظ زمین‌ساختی نیز می‌توان چنین فرض نمود که دو گسل امتدادلغز قطر-کازرون و هندیجان-بهرگانسر بخش مرکزی را از دو بخش دیگر جدا نموده است.

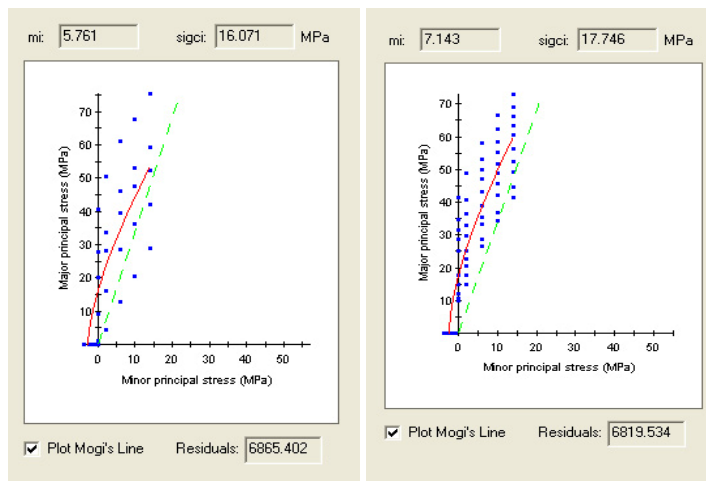
گسیختگی بالاتر از خط موگی ( $\sigma_1 > 3/4\sigma_3$ ) واقع شود، بیانگر رفتار شکننده نمونه‌ها در هنگام شکست است. ولی در حالتی که خط موگی بالاتر از پوش گسیختگی قرار بگیرد، دلالت بر رفتار شکل‌پذیر نمونه‌ها در هنگام گسیختگی خواهد داشت. حال با توجه به نمودارهای تنش‌های اصلی، می‌توان چنین قضاوت نمود که در بیش از ۹۰ درصد واحدهای ماسه‌سنگی در لحظه شکست، رفتار الاستیک حاکم بوده است. تنها دو نمونه در سطوح تنش همه‌جانبه سوم و چهارم انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر را نشان می‌دهند. در مورد لای سنگ‌ها، در بیش از ۷۵ درصد آنها در کلیه سطوح تنش همه‌جانبه، رفتار شکننده حاکم بوده است. یک نمونه لای سنگی در سطح تنش همه‌جانبه اول رفتار شکننده و در سطوح دوم و سوم انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر و در سطح چهارم رفتار شکل‌پذیر را نشان می‌دهد. تنها در یک نمونه لای سنگی رفتار کاملاً شکل‌پذیر در کلیه سطوح تنش همه‌جانبه مشاهده می‌شود. رفتار کاملاً شکننده در کلیه سطوح همه‌جانبه، در حدود ۴۰ درصد گل‌سنگ‌ها روی داده است. در ۴۵ درصد آنها در دو سطح تنش همه‌جانبه اول و دوم، رفتار شکننده و در بقیه سطوح رفتارهای شکل‌پذیر یا انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر قابل مشاهده است. در ۱۵ درصد باقیمانده گل‌سنگ‌ها، تنها در سطح تنش همه‌جانبه اولیه رفتار شکننده دیده می‌شود و در سه سطح انتهایی رفتار شکل‌پذیر مشخص است. در مورد رس‌سنگ‌ها، ۶۰ درصد رفتار شکننده در کلیه سطوح تنش همه‌جانبه مشاهده می‌شود. در حدود ۲۰ درصد رفتار کاملاً شکل‌پذیر و در ۲۰ درصد بقیه در دو سطح همه‌جانبه اولیه رفتار شکننده، در سطح سوم انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر و در سطح چهارم رفتار شکل‌پذیر صورت گرفته است. واحدهای مارنی نیز در ۸۰ درصد موارد رفتار کاملاً شکننده را در کلیه سطوح تنش همه‌جانبه از خود نشان داده‌اند. در بقیه موارد در دو سطح تنش همه‌جانبه اولیه، رفتار شکننده، در سطح سوم، انتقال از رفتار شکننده به شکل‌پذیر و در سطح چهارم رفتار شکل‌پذیر حاکم بوده است.



(ماسه سنگ)

(لای سنگ)

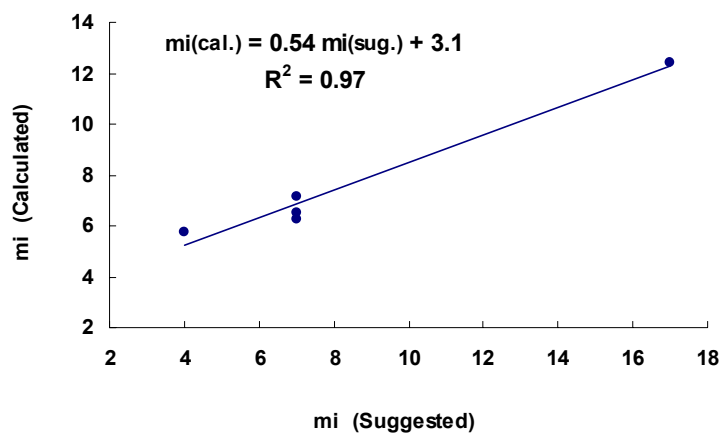
(گل سنگ)



(رس سنگ)

(الف)

(مارن)



(ب)

شکل ۹- مقادیر  $m_i$  و  $\sigma_{ci}$  بدست آمده از برنامه Rocdata برای (الف) واحدهای مختلف سازند آغاچاری (ب) رابطه بین مقادیر محاسبه شده و پیش بینی شده برای  $m_i$

• مقادیر ثابت‌های الاستیک دینامیکی بالاتر از مقادیر استاتیکی آنها بدست آمده‌اند. با کاهش درصد تخلخل (یا افزایش دانسیته) این اختلاف کاهش یافته و مقادیر ثابت‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند.

• بر اساس رده‌بندی گامبل، دوام‌پذیری ماسه‌سنگ‌های بخش شمال‌غربی در رده متوسط تا مقاوم، بخش مرکزی در رده مقاوم تا بسیار مقاوم و بخش جنوب‌شرقی ضعیف تا متوسط قرار می‌گیرند. همچنین بیش از ۷۰ درصد سنگ‌های گلی سازند آجاجاری دارای شاخص خمیری متوسط و شاخص دوام‌وارفتگی پایین تا متوسط می‌باشند.

• در کلیه آزمایش‌های سه‌محوری با افزایش سطوح تنش محصورکننده، مقاومت نهایی کلیه نمونه‌ها افزایش یافته که می‌تواند بیانگر همگن بودن و حداقل سطوح ضعف در سنگ بکر این واحدها باشد. همچنین مقادیر محاسبه شده  $\sigma_{ci}$  و  $m_i$  برای هر یک از واحدهای سنگی سازند آجاجاری با مقادیر پیشنهاد شده توسط هوک و براون انطباق بسیار مناسبی دارند.

• به دلیل حضور میان‌لایه‌ها و رگه‌های رسوبات تبخیری نظیر ژپس و انیدریت در برخی نواحی در بین واحدهای رسوبی آواری سازند آجاجاری و از آنجا که ضخامت کم این رسوبات اجازه اخذ نمونه‌های مناسب آزمایشگاهی را برای انجام آزمون‌های ژئومکانیکی نمی‌دهند، لذا به منظور طبقه‌بندی توده‌سنگ واحدهای مختلف این سازند، لازم است تا با توجه به شرایط برجوا و رفتار پلاستیسیته و وابسته به زمان رسوبات تبخیری، امتیاز بدست آمده برای این واحدهای سنگی اصلاح گردد.

مطابق ارزیابی ژئومکانیکی به عمل آمده ماسه‌سنگ‌های بخش مرکزی نسبت به دو بخش دیگر از مقادیر مقاومتی بالاتری برخوردار هستند. همچنین واحدهای سنگی در بخش شمال‌غربی از واحدهای مشابه خود در بخش جنوب‌شرقی نسبتاً مقاوم‌تر می‌باشند. این روند مقاومتی می‌تواند به این فرضیه منجر شود که واحدهای بخش مرکزی احتمالاً به دلیل قرار گرفتن در محدوده عملکرد گسل‌های امتدادلغز هندیدجان و کازرون فرآیندهای دیاژنتیکی را نسبت به دو بخش دیگر سریع‌تر طی کرده‌اند.

• بر اساس نتایج آزمایش‌های شاخص بارنقطه‌ای، واحدهای سنگی سازند آجاجاری در رده سنگ‌های ضعیف تا متوسط (و گاه بالا) قرار می‌گیرند.

• آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری نشان می‌دهند اغلب واحدهای سنگی آجاجاری در پهنه مورد مطالعه جزو سنگ‌های سست (کمتر از ۲۵ MPa) قرار می‌گیرند. اما ماسه‌سنگ‌های بخش مرکزی به گروه سنگ‌های با مقاومت متوسط تا بالا تعلق دارند. بر اساس طبقه‌بندی دیر و میلر، واحدهای سنگی آجاجاری در گروه سنگ‌های با مقاومت بسیار کم تا متوسط و نسبت مدولی پایین قرار می‌گیرند.

• سرعت امواج الاستیک و مقاومت فشاری تک‌محوری با دانسیته خشک و درصد تخلخل به ترتیب دارای نسبت مستقیم (بصورت توانی) و عکس (بصورت نمایی) می‌باشند.

## منابع:

- آقائاتی س.ع.، (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور.
- خامه‌چیان م.، (۱۳۶۹) بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگهای مارنی-رسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- دوست‌محمدی ر.، (۱۳۷۸) تحلیل پایداری و طراحی پوشش بتونی تونلهای انحراف آب سدگتوند علیا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

- شریفی ا.، (۱۳۸۴) بررسی ویژگی های زمین شناسی مهندسی ساختگاه سدهای شمیل و نیان (استان هرمزگان) به منظور طراحی پرده آب بند، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- شمسی فراشاه ح.، (۱۳۸۱) بررسی رفتار توده های سنگی اطراف تونل اهرم- فراشند و تحلیل پایداری تونل، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیرکبیر.
- فاروق حسینی م.، (۱۳۷۶) درآمدی بر مکانیک سنگ، انتشارات سالکان.
- فتحی برفه ع.، (۱۳۸۳) تعیین خصوصیات مکانیکی مارن های سازندهای دوران سوم زاگرس و ارائه معیار شکست، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- فهمی فر ا.، سروش ح.، (۱۳۸۰) آزمایشهای مکانیک سنگ: مبانی نظری و استانداردها، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، جلد اول.
- مرادیان ذ.، (۱۳۸۴) تعیین خصوصیات مکانیکی و ارزیابی کارایی معیارهای شکست در پیش بینی رفتار ماسه سنگ نرم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- مهندسین مشاور مهتاب قدس، (۱۳۸۳) گزارش ژئوتکنیک طرح کنترل پایداری و علاج بخشی سد تنظیمی انحرافی کرخه.
- Abdullah H., Dhawan A.K. (2002) Some Implications of Empiricism and Assumptions in Laboratory Testing, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 41, 374-380.
- Aversa S., Evangelista A. (1993) Some Aspects of the Mechanical Behavior of Structured Soils and Soft Rocks, *Geotechnical Engineering*, Vol. 1, 268-275.
- Bell F.G. (2000) *Engineering Properties of Soils and Rocks*, University of Natal, Durban, South Africa, Fourth Edition.
- Bieniawski Z.T. (1974) Stimating the Strength of Rock Materials, *J.S. African Insitute of Mining & Metallurgy*, Vol. 74, 312-320.
- Bieniawski Z.T. (1975) Point Load Test in Geotechnical Practice, *Engineering Geology*, Vol. 9, 1-11.
- Broch E., Franklin J.A. (1972) The Point Load Strength Test, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Geomech. Abstr.*, Vol. 22, No. 2, 61-70.
- Brown E.T. (1981) *Rock Characterization Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods*, Pergamon Press, Oxford, UK, pp 211.
- Franklin J.A., Chandra R. (1972) The Slake Durability Index, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, Vol. 9, 325-342.
- Gamble J.C. (1971) *Durability Plastisity Classification of Shales and Other Argillaceous Rock*, ph.D. Thesis, University of Illinots.
- Gunsallus K.L., Kulhawy F.H. (1986) A ComParative Evaluation of Rock Strength Measures, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Geomech. Abstr.*, Vol. 21, 231-248.
- Kahraman S. (2001) Evaluation of Simple Methods for Assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 38, 981-994.
- Lavrov A., Vervoort A. (2002) Theoretical Treatment of Tangential Loading Effects on the Brazilian Test Stress Distribution, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 39, 275-283.
- Norbury D.R. (1986) The Point Load Test in Site Investigation Practice. In: Hawkins AB, Editor, *Geol. Soc. Eng. Geol. Spec. Publ.*, No. 2, 325-329.
- Ramamurthy T. (2001) Shear Strength Response of Some Geological Materials in Triaxial Compression, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, Vol. 38, 683-697.
- Read J.R.L., Thornton P.N., Regan W.M. (1980) A Rational Approach to the Poin Load Test, In: *Proceedings of the Australian-New Zealand Geomech Conference*, Vol. 1, Wellington, New Zealand, 35-39.
- Report of ISSMFE Technical Committee on Soft Rocks and Indurated Soils and Proceedings of Discussion Session (1989) *Recent Advances in Soft Rock Research*, No.5, XII, ICSMFE, Rio De Janiro.
- Ulusay R., Sonmez H. (2000) Factors Affecting the Durability of Selected Weak and Claybearing Rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles, *Engineering Geology*, Vol. 57, 215-237