

## ارزیابی ویژگی‌های سنگ‌شناسی و مکانیکی سازند ایلام

محمدرسول ستایشی‌راد<sup>۱</sup>، علی ارومیه‌ای<sup>\*۱</sup>، محمدرضا نیکودل<sup>۱</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۹

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳

### چکیده

سازند ایلام، هم در صنعت نفت به عنوان یکی از مهم‌ترین سنگ مخازن نفت و هم به عنوان ساختگاه در پروژه‌های عمرانی جایگاه ویژه‌ای داشته و لذا شناخت خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به منظور بررسی جامع سازند ایلام، مقطع تیپ سازند در استان ایلام و استان‌های لرستان و کرمانشاه مورد بازدید قرار گرفت. بر اساس مطالعات ۱۱۰ نمونه سازند ایلام، تعداد ۷ تیپ ریزرخساره شناسایی و نمونه‌ها به روش دانه‌ها در ۴ گروه مادستون، وکستون، وکستون-پکستون و پکستون نامگذاری شده‌اند. ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها شامل دانسیته، تخلخل، درصد وزنی جذب آب و سرعت موج طولی و ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوره و شاخص بار نقطه‌ای اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد میانگین تخلخل و درصد وزنی جذب آب نمونه‌های مادستون نسبت به دیگر انواع سنگ‌های مورد آزمایش بالاتر می‌باشد که به دلیل وجود درصد بیشتر گل کربناته و ریزدانه‌تر بودن بافت سنگ می‌باشد. سرعت موج طولی، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوره در نمونه‌های پکستون بیشتر از انواع دیگر سنگ‌ها است که به دلیل وجود دانه‌های بیشتر در بافت سنگ و در نتیجه استحکام بالاتر آن می‌باشد. نتایج آزمون‌های آماری نشان می‌دهد که بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته از نظر آماری رابطه معناداری وجود دارد. علاوه بر این، رابطه بین شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوره نیز خطی بود. ضریب همبستگی مقاومت فشاری تک‌محوره با تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای بیشتر از دیگر پارامترها بوده و در نتیجه امکان تخمین مناسبی از استحکام سنگ‌های آهکی ایلام را فراهم می‌کنند.

**کلید واژه‌ها:** سازند ایلام، ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، آنالیز آماری

۱. گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

مکانیکی سنگ‌های مختلف را توسعه دهند. در بسیاری از این پژوهش‌ها، از طریق روش‌های آماری مانند تحلیل رگرسیونی، روابط تجربی پارامترهای مختلف را ارائه کرده‌اند (Cargill and Shakoor, 1990; Ghosh and Srivastava, 1991; Singh and Singh, 1993; Ulusay et al, 1994; Bell and Lindsay, 1999; Tuğrul and Zarif, 1999; Katz et al, 2000; Kahraman, 2001; Yılmaz and Sendir, 2002; Quane and Russell, 2003; Tsiambaos and Sabatakakis, 2004; Kahraman et al, 2005; Basu and Aydin, 2006; Prikryl, 2006; Agustawijaya, 2007; Sharma and Singh, 2007; Sabatakakis et al, 2008; Zorlu et al, 2008; Gupta, 2009; Altindag and Guney, 2010; Tahir et al, 2011; Khandelwal, 2012; Gupta and Sharma, 2012; Sharma and Gupta, 2013; Nazir et al, 2013; Kahraman, 2014; Madhubabu et al, 2016; Jahed Armaghani et al, 2017; Wang et al, 2017; Kong and Shang, 2018).

در این مطالعه به بررسی خواص سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی سازند ایلام پرداخته شده است. این سازند، یکی از مهم‌ترین سازندهای آهکی ایران است. گسترش بسیار زیاد این سازند در پهنه ساختاری زاگرس (شکل ۱)، باعث شده که بسیاری از طرح‌های سدسازی و حفاری تونل در مناطق کوهستانی زاگرس بر روی این ساختگاه انجام گیرد. از طرفی این سازند به همراه سازند سروک و واحدهای معادل آن در دیگر کشورها (مانند سازند مشریف عراق)، یکی از مهم‌ترین سنگ‌های مخزنی در بین میدین نفتی ایران و خاورمیانه به شمار می‌رود (Motiei, 1993; Aqrabi et al, 1998; Adabi and Asadi-Mehmandosti, 2008).

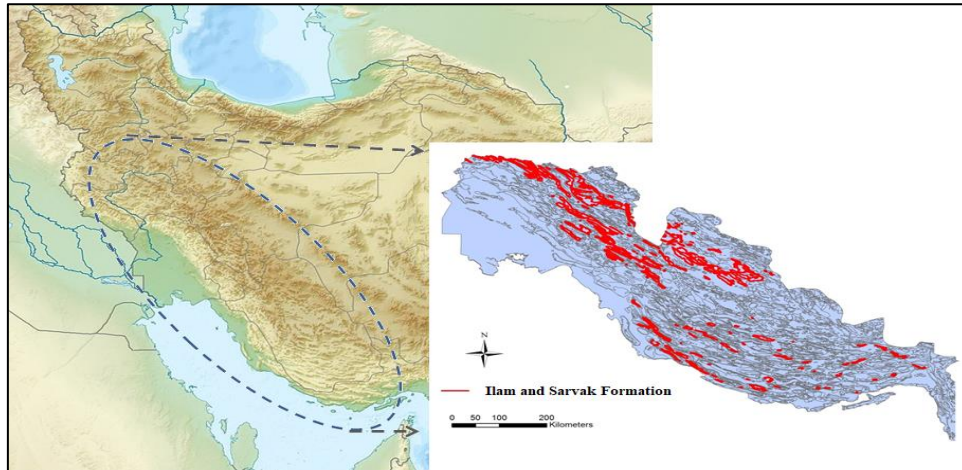
خواص فیزیکی و مکانیکی سازند ایلام و همچنین خصوصیات سنگ‌شناسی آن‌ها به صورت مجزا با روش‌های مختلف مطالعه شده است. در پروژه‌های اکتشاف نفت، ویژگی‌های سنگ‌شناسی و رخساره‌ای و در پروژه‌های عمرانی، ویژگی‌های مهندسی این سازند بررسی شده است و تاکنون مطالعات جامعی شامل سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی آن‌ها انجام نشده است. بنابراین چنین مطالعاتی برای سازندهای مهم و با گسترش زیاد ضروری است. نتایج به-دست آمده نشان می‌دهد خواص مکانیکی سازند ایلام به طور قابل توجهی با خواص فیزیکی و سنگ‌شناسی آن‌ها ارتباط

سازندها و سنگ‌های آهکی، محل احداث طرح‌های زیربنایی و سازه‌هایی چون سدها، تونل‌ها، نیروگاه‌ها و جایگاه تمرکز ذخایر معدنی و همچنین مخزن و محل تجمع منابع نفت و گاز و سفره‌های آب زیرزمینی هستند. لذا شناخت خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی آن‌ها بسیار مهم است. در واقع عدم شناخت خصوصیات مکانیکی سازندها قبل از اجرای پروژه‌های مهندسی، مشکلات زیادی را به هنگام ساخت یا پس از احداث اینگونه سازه‌ها به همراه خواهد داشت (Wanniarachchi et al, 2017; Sun et al, 2017; Sari, 2018).

خواص مکانیکی سنگ‌ها عمدتاً متأثر از خواص فیزیکی آن‌ها مانند دانسیته، تخلخل، جذب آب هستند (Chang et al, 2006; Prikryl, 2006; Goldsmith et al, 1976; Diamantis et al, 2009). بنابراین، تعیین ارتباط بین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها برای درک خصوصیات مکانیکی سنگ مهم است. همچنین این خصوصیات به ویژگی‌های سنگ‌شناسی مانند ترکیب و بافت سنگ‌ها بستگی دارند، زیرا این ویژگی‌ها محیط سنگ‌ها را در طول رسوبگذاری، دیاژنز و هوازگی منعکس می‌کنند.

محققین مختلف ارتباط بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بررسی کرده‌اند. این مطالعات عمدتاً منجر به ارائه و توسعه رابطه‌های گوناگون بین پارامترهای مختلف سنگ گردیده است. به عنوان مثال اولین تحقیقات منتشر شده درخصوص رابطه مقاومت فشاری تک‌محوره و شاخص بار نقطه‌ای توسط بروخ و فرانکلین (Broch and Franklin, 1972) ارائه گردید و سپس توسط بِنیاوسکی (Bieniawski, 1974) نیز تایید گردید. اما مطالعات بعدی نشان داد که استفاده بی قید و شرط از این روابط برای دیگر انواع سنگ‌ها و مناطق دیگر صحیح نمی‌باشد (Forster, 1983; Chau and Wong, 1996). براین اساس محققین مختلف سعی کردند ضمن بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌ها، با استفاده از روش‌های مختلف روابط بین پارامترهای بافتی، فیزیکی و

دارد و معادلات به دست آمده از این اندازه گیری ها می تواند برای پیش بینی چگونگی تغییرات این خصوصیات مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱. گسترش سازندهای ایلام و سروک-ایلام در زاگرس

## ۲. مواد و روش

### ۱-۲. محدوده مورد مطالعه

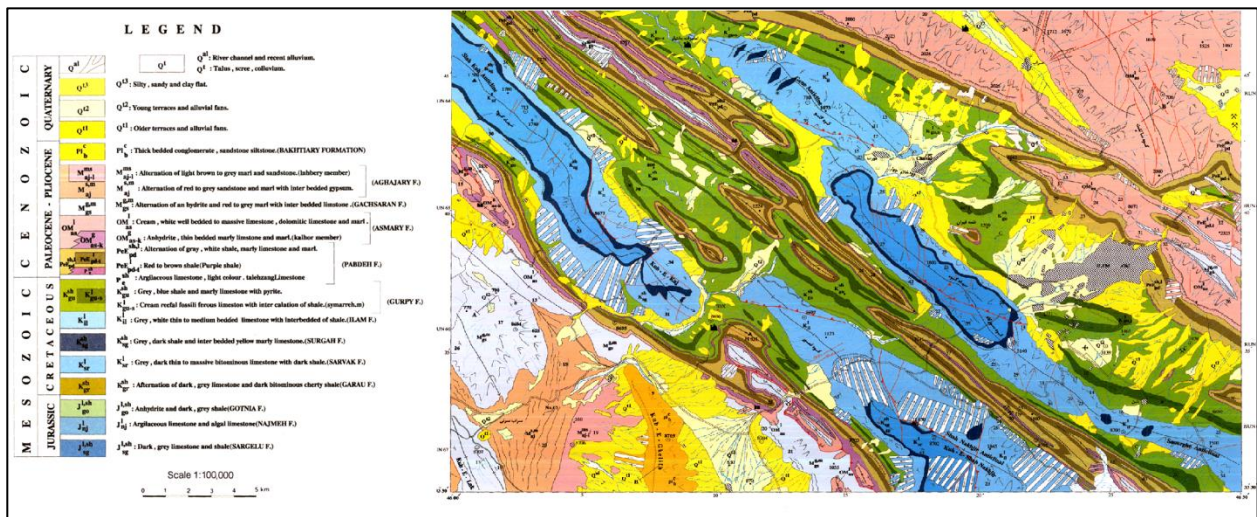
سازند ایلام برای اولین بار توسط جیمز و واین (James and Wynd, 1965) در تاقدیس کبیرکوه در استان ایلام معرفی گردید. برش الگوی این سازند در پایانه شمال غربی کبیرکوه در ۱۲ کیلومتری شهرستان ایلام انتخاب شده است. ضخامت سازند ایلام در برش الگو ۱۹۰ متر است و از سنگ آهک-های رسی ریزدانه پلاژیک خاکستری روشن تا تیره با میان لایه های نازکی از شیل تشکیل شده است. سن این سازند سانتونین تا کامپانین گزارش شده است.

سازند ایلام از سازندهای مهم حوضه رسوبی زاگرس است که متعلق به گروه بنگستان است. این سازند دارای دو رخساره متفاوت می باشد. یکی رخساره کم عمق دریایی که در نواحی فروافتادگی دزفول و فارس ساحلی و فارس داخلی گسترش دارد و از انواع مختلف رخساره های نریتیک تشکیل یافته است. دیگری رخساره مناطق عمیق دریایی که گسترش آن در غرب و شمال خوزستان مشاهده می شود و این رخساره از نوع

پلاژیک است. سازند آهکی ایلام با رخساره کم عمق دریایی در منطقه خوزستان به صورت تحت الارضی نقش سنگ مخزن نفت را ایفا می نماید و در رأس مخزن بنگستان قرار دارد. از سمت فارس و خوزستان به سمت غرب، حاکمیت محیط عمیق تداوم یافته و طی کنیاسین موجب رسوب شیل ها و سنگ آهک های رسی (سازند سورگاه) گردیده است (Motiei, 1993). شکل ۲ نقشه زمین شناسی این سازند و شکل ۳ نمایی از این سازند را نشان می دهد.

به منظور جمع آوری نمونه ها، ۳ مکان شامل مقطع الگو سازند در استان ایلام و استان های لرستان و کرمانشاه مورد بازدید قرار گرفت و نمونه برداری انجام شد. هر نمونه بلوک برای عیوب ماکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفت تا نمونه های جمع آوری شده عاری از شکستگی و ترک باشد.

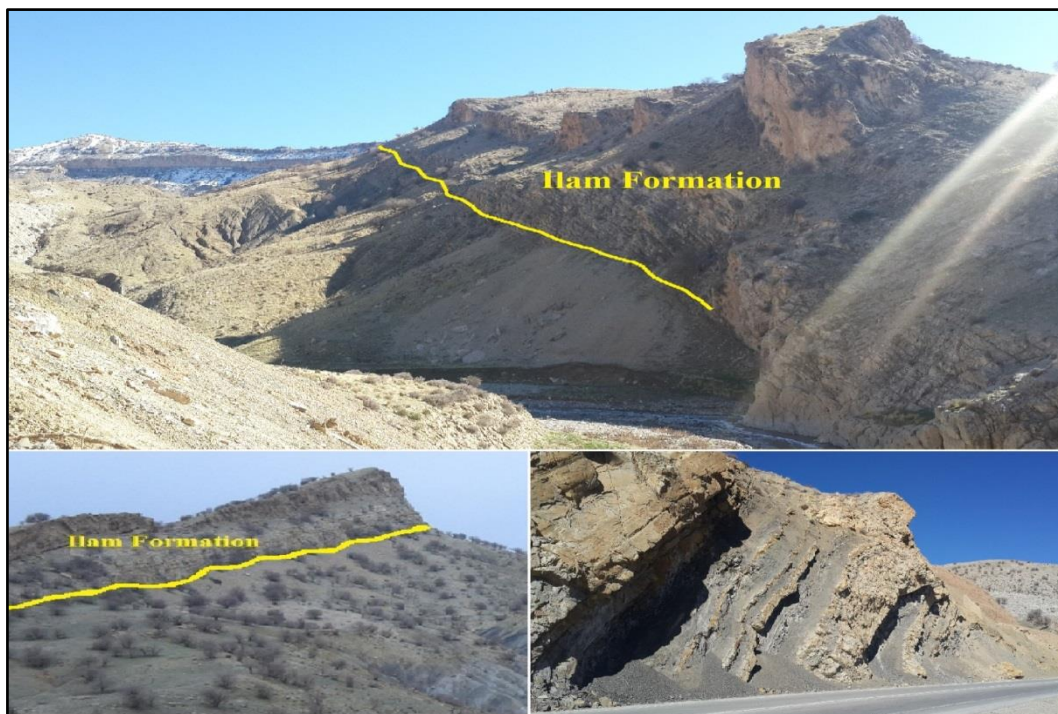
پس از انتقال نمونه ها به کارگاه برش سنگ، نمونه های استوانه ای با قطر ۵۴ میلیمتر و با نسبت طول به قطر ۲/۵-۲ برای انجام آزمایش های مکانیکی و فیزیکی تهیه شد (شکل ۴). سپس به منظور سنگ شناسی و نامگذاری نمونه ها، مقاطع نازک میکروسکوپی از نمونه ها تهیه گردید.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی در برش الگو سازند ایلام

ویلسون (Wilson, 1975) و فلوگل (Flügel, 2004) استفاده شده است. روش مطالعه با در نظر گرفتن میزان حضور عناصر اصلی متشکله در ریزرخساره‌ها نظیر فرامینفرهای پلاژیک، و سایر خرده‌های اسکلتی غیرپلاژیک اندازه‌گیری شد.

۲-۲. مطالعات میکروسکوپی و سنگ‌شناسی به منظور نامگذاری سنگ‌ها و شناسایی ریزرخساره تعداد ۱۱۰ مقطع نازک تهیه شد. جهت نامگذاری سنگ‌ها از روش دانهام (Dunham, 1962) استفاده شده است. برای توصیف ریزرخساره‌ها و تعیین محیط رسوبی آن‌ها از روش‌های



شکل ۳. نمایی از سازند ایلام



شکل ۴. نمونه های استوانه ای آماده شده

اجزای اصلی تشکیل دهنده این ریزرخساره شامل گونه های مختلف فرامینیفرهای پلانکتونیک مانند هتروهلیکس (Heterhelix) و گلوبوترونکانا (Globotruncana) می باشد. پیریت از تشکیل دهنده های فرعی و دیاژنزی این ریزرخساره می باشد. این ریزرخساره با توجه به حضور فرامینیفرهای پلانکتونیک به محیط رمپ خارجی نسبت داده می شود. زمینه سنگ از نوع میکریتی و به صورت گل پشتیبان می باشد. این ریزرخساره از نظر بلوغ بافتی، نابالغ بوده که به علت فراوانی گل، در یک محیط عمیق و کم انرژی نهشته شده است و با ریزرخساره استاندارد RMF3 قابل مقایسه است (شکل 5b).

#### هدبرگلا وکستون (*Hedbergella Wackestone*)

خرده های اسکلتی شامل فسیل های پلاژیک هدبرگلا (*Hedbergella*) از اجزای تشکیل دهنده این ریزرخساره است. پیریت از تشکیل دهنده های فرعی و دیاژنزی این ریزرخساره می باشد. این ریزرخساره دارای بافت گل پشتیبان می باشد، در این بافت خرده های اسکلتی پلاژیک در یک زمینه گل کربناته و یا میکرایتی می باشد. ریزبودن دانه ها و حضور فسیل های پلانکتونیک در این ریزرخساره نشان دهنده ته نشست این رخساره در بخش های عمیق رمپ خارجی بوده است و با ریزرخساره استاندارد RMF3 قابل مقایسه است (شکل 5c).

#### ۲-۳. ریزرخساره و محیط رسوبی

بر اساس مطالعات میکروسکوپی انجام شده تعداد ۷ تیپ ریزرخساره مربوط به بخش های عمیق حوضه و محیط رمپ خارجی (Outer ramp) شناسایی شده اند و انواع آن ها به شرح زیر می باشند:

#### هتروهلیکس، هدبرگلا مادستون (*Heterhelix, Hedbergella Mudstone*)

خرده های اسکلتی شامل میکروفسیل های پلانکتونی هتروهلیکس (*Heterhelix*) و هدبرگلا (*Hedbergella*) از اجزای تشکیل دهنده آن است. نمونه دارای بافت گل پشتیبان می باشد، در این بافت خرده های اسکلتی پلانکتونی در یک زمینه گل کربناته و یا میکرایتی می باشد. ریزبودن دانه ها و حضور فسیل های پلانکتونی در این ریزرخساره نشان دهنده ته نشست این ریزرخساره در بخش های عمیق و آرام رمپ خارجی بوده است. این ریزرخساره به علت فراوانی گل، در یک محیط کم انرژی نهشته شده است و با ریزرخساره استاندارد RMF2 قابل مقایسه است (شکل 5a).

#### هتروهلیکس، گلوبوترونکانا وکستون (*Heterhelix, Globotruncana Wackestone*)

**اولیگوستژینا، هتروهلیکس پکستون (Oligostegina, )  
(Heterhelix Packstone)**

در این ریزرخساره فراوانی بیشتر با هتروهلیکس می باشد، ولی اولیگوستژینا (Oligostegina) به میزان کمتر نسبت به هتروهلیکس مشاهده می شود. همچنین خرده های خارپوست و فرامینفر بتیک نیز دیده می شود. این ریزرخساره نشان-دهنده ته نشست این رخساره در بخش های عمیق رمپ خارجی بوده است و با ریزرخساره استاندارد RMF3 قابل مقایسه است (شکل 5f).

**بایوکلاست پکستون گریستون (Bioclast Packstone )  
(Grainstone)**

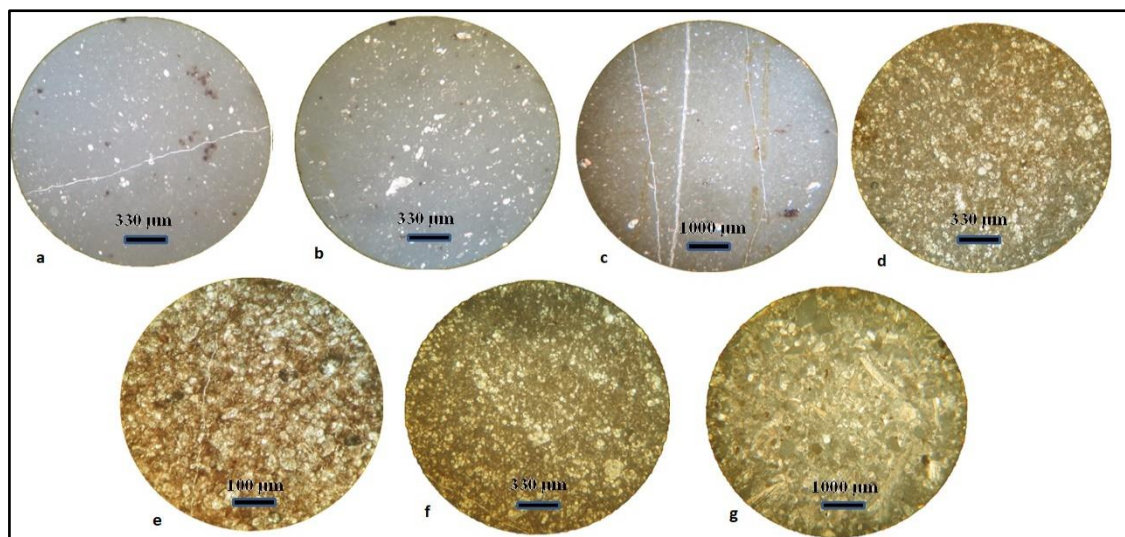
خرده های اسکلتی شامل دوکفه ای ها و اینتراکلاست ها از اجزای تشکیل دهنده می باشد. این ریزرخساره دارای بافت دانه پشتیبان می باشد، در این بافت خرده های اسکلتی و اینتراکلاست در یک زمینه سیمان کربناته می باشد. درشت بودن دانه ها و حضور فسیل های بتیک در این ریزرخساره نشان دهنده ته نشست این رخساره در بخش های کم عمق رمپ داخلی بوده است و با ریزرخساره استاندارد RMF7 قابل مقایسه است (شکل 5g).

**هدبرگلا، هتروهلیکس وکستون پکستون (Hedbergella, )  
(Heterhelix Wackestone Packstone)**

اجزای اصلی تشکیل دهنده این ریزرخساره خرده های اسکلتی شامل میکروفسیل های پلاژیک هدبرگلا و هتروهلیکس به همراه اجزای تشکیل دهنده فرعی فرامینفر بتیک می باشد که در زمینه میکریتم قرار دارند. ریزبودن دانه ها و حضور فسیل-های پلانکتونیک در این ریزرخساره نشان دهنده ته نشست این رخساره در بخش های عمیق رمپ خارجی بوده است و با ریزرخساره استاندارد RMF4 قابل مقایسه است (شکل 5d).

**هدبرگلا پکستون (Heterhelix, Hedbergella )  
(Packstone)**

خرده های اسکلتی شامل میکروفسیل های پلاژیک هتروهلیکس (Heterhelix) و هدبرگلا (Hedbergella) از اجزای تشکیل دهنده آن است. پیریت و گلوکونیت از تشکیل-دهنده های فرعی و دیاژنزی این ریزرخساره می باشد. نمونه دارای بافت گل پشتیبان می باشد، در این بافت خرده های اسکلتی پلاژیک در یک زمینه گل کربناته و یا میکریتمی می-باشد. ریزبودن دانه ها و حضور فسیل های پلانکتونی در این ریزرخساره نشان دهنده ته نشست این رخساره در بخش های عمیق رمپ خارجی بوده است و با ریزرخساره استاندارد RMF4 قابل مقایسه است (شکل 5e).



**شکل ۵.** مقاطع نازک: 5a: هتروهلیکس، هدبرگلا مادستون؛ 5b: هتروهلیکس، گلوبوترونکانا وکستون؛ 5c: هدبرگلا وکستون؛ 5d: هدبرگلا، هتروهلیکس وکستون؛ 5e: هتروهلیکس، هدبرگلا پکستون؛ 5f: اولیگوستژینا، هتروهلیکس؛ 5g: بایوکلاست پکستون گرینستون

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

در این مطالعه ۱۱۰ نمونه سازند ایلام جهت تعیین ویژگی های فیزیکی و مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی های فیزیکی نمونه ها شامل دانسیته ( $\rho$ )، تخلخل ( $n$ ) و جذب آب وزنی ( $W_a$ ) با استفاده از روش اشباع-غوطه‌وری و سرعت موج طولی ( $V_p$ ) طبق استاندارد (ASTM D2845, 2017) اندازه‌گیری شد. سرعت طولی از اندازه‌گیری زمان و فاصله بین فرستنده و گیرنده محاسبه می‌شود.

به منظور تعیین ویژگی های مکانیکی نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) بر اساس استاندارد (ASTM D7012, 2014) انجام گرفت. همچنین آزمایش شاخص بار نقطه‌ای (Is) بر اساس استاندارد (ASTM D5731, 2008) بر روی تمامی نمونه‌ها انجام گرفت.

با توجه به ویژگی های سنگ‌شناسی و بر اساس نامگذاری آن-ها، نمونه‌ها در ۴ گروه مادستون (A)، وکستون (B)، وکستون پکستون (C) و پکستون (D) تقسیم شده و مورد مقایسه قرار

گرفتند. لازم به ذکر است به دلیل شباهت خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های پکستون گرینستون با پکستون، این نمونه‌ها در گروه پکستون قرار داده شده است. نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد مقدار تخلخل نمونه سنگ‌ها بین ۳/۷۲ تا ۱۰/۹۳ درصد متغیر می‌باشد. میانگین مقدار تخلخل نمونه‌های مادستون نسبت به دیگر انواع سنگ‌های مورد آزمایش بالاتر می‌باشد که به دلیل وجود درصد بیشتر گل کربناته و ریزدانه‌تر بودن بافت سنگ می‌باشد. مقدار دانسیته نمونه‌ها بین ۲/۰۸ تا ۲/۴۴ گرم بر مترمکعب می‌باشد که میانگین دانسیته هر ۴ نوع سنگ بسیار به یکدیگر نزدیک هستند. مقدار درصد جذب آب نمونه سنگ‌ها بین ۰/۲۹ تا ۴/۳۴ درصد متغیر می‌باشد. میانگین مقدار درصد جذب آب نمونه‌های مادستون نسبت به دیگر انواع سنگ‌ها مورد آزمایش بالاتر می‌باشد که به دلیل وجود درصد بیشتر گل کربناته و ریزدانه‌تر بودن بافت سنگ می‌باشد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مطالعه شده

Group	N (sample)	index	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)	$W_a$ (%)	$V_p$ (km/s)	UCS (Mpa)	Is (Mpa)
A	23	Mean	2.26	7.14	2.85	4.78	90.48	3.36
B	28	Mean	2.28	6.36	2.53	4.98	94.32	3.52
C	33	Mean	2.31	5.95	2.33	5.08	97.21	3.69
D	26	Mean	2.32	5.48	1.90	5.23	101.94	3.93
	110	Mean	2.30	6.18	2.39	5.03	96.18	3.63
		Min	2.08	3.72	0.29	3.97	68.29	2.21
		Max	2.44	10.93	4.34	5.82	124.99	4.80
total		Std. Deviation	0.09	1.54	0.93	0.39	11.37	0.56
		Std. Error of Mean	0.01	0.15	0.09	0.04	1.14	0.06

انواع دیگر سنگ‌ها است. مقاومت فشاری تک‌محوره و شاخص بار نقطه‌ای به ترتیب در محدوده ۶۸/۲۹ تا ۱۲۴/۹۹

سرعت موج طولی بین ۳/۹۷ تا ۵/۸۲ کیلومتر بر ثانیه متغیر می‌باشد که میانگین سرعت در نمونه‌های پکستون بیشتر از

(UCS) از نظر آماری رابطه معناداری وجود دارد. به منظور تعیین روابط بین این متغیرها انواع مدل‌های رگرسیونی مورد بررسی قرار گرفت و مدل رگرسیونی با ضریب همبستگی ( $R^2$ ) بیشتر به عنوان رابطه بین متغیرها انتخاب گردید. بر این اساس رابطه بین دانسیته، تخلخل، جذب آب و سرعت موج طولی با مقاومت فشاری تک‌محوره به ترتیب خطی، توانی، نمایی و توانی بود. علاوه بر این، رابطه بین  $I_s$  و UCS نیز خطی بود (جدول ۲).

و ۲/۲۱ تا ۴/۸۰ مگاپاسکال متغیر است. نمونه‌های پکستون میانگین مقاومت بالاتری نسبت به انواع دیگر سنگ‌ها نشان می‌دهند که به دلیل وجود دانه‌های بیشتر در بافت سنگ و در نتیجه استحکام بالاتر آن می‌باشد. براساس طبقه‌بندی دیر و میلر (Deere and Miller 1966)، نمونه‌های پکستون متعلق به رده با مقاومت بالا (B) و نمونه‌های مادستون متعلق به رده با مقاومت متوسط (B) می‌باشند.

### ۲-۳. آنالیزهای آماری

نتایج آزمون‌های ANOVA و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) نشان داد که بین متغیرهای مستقل ( $n, \rho, W_a, V_p$ ) و متغیر وابسته

جدول ۲. آنالیز آماری پارامترهای مورد مطالعه

parameter	Equation	$R^2$	Adjusted $R^2$	P-value
UCS- $\rho$	$UCS = 105.97\rho - 147.02$	0.72	0.71	<0.05
UCS-n	$UCS = 213.26n - 0.448$	0.84	0.83	<0.05
UCS- $W_a$	$UCS = 125.39e - 0.114W_a$	0.79	0.78	<0.05
UCS- $V_p$	$UCS = 10.474V_p + 1.3712$	0.82	0.81	<0.05
UCS- $I_s$	$UCS = 19.079I_s + 26.879$	0.88	0.87	<0.05

تخلخل را به عنوان بهترین پیش‌بینی‌کننده استحکام در سنگ - های آهکی معرفی کرده‌اند (Palchik and Hatzor, 2004; Kahraman et al, 2005).

تأثیر آب و رطوبت بر کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره انواع سنگ‌ها توسط محققین مختلف به اثبات رسیده است (Wong et al, 2016). شکل C۶ نشان می‌دهد که رابطه نمایی بین جذب آب و مقاومت فشاری تک‌محوره با ضریب همبستگی ۰/۷۹، وجود دارد که با نتایج منتشر شده قبلی نیز مطابقت دارد (Ghafoori et al, 2018).

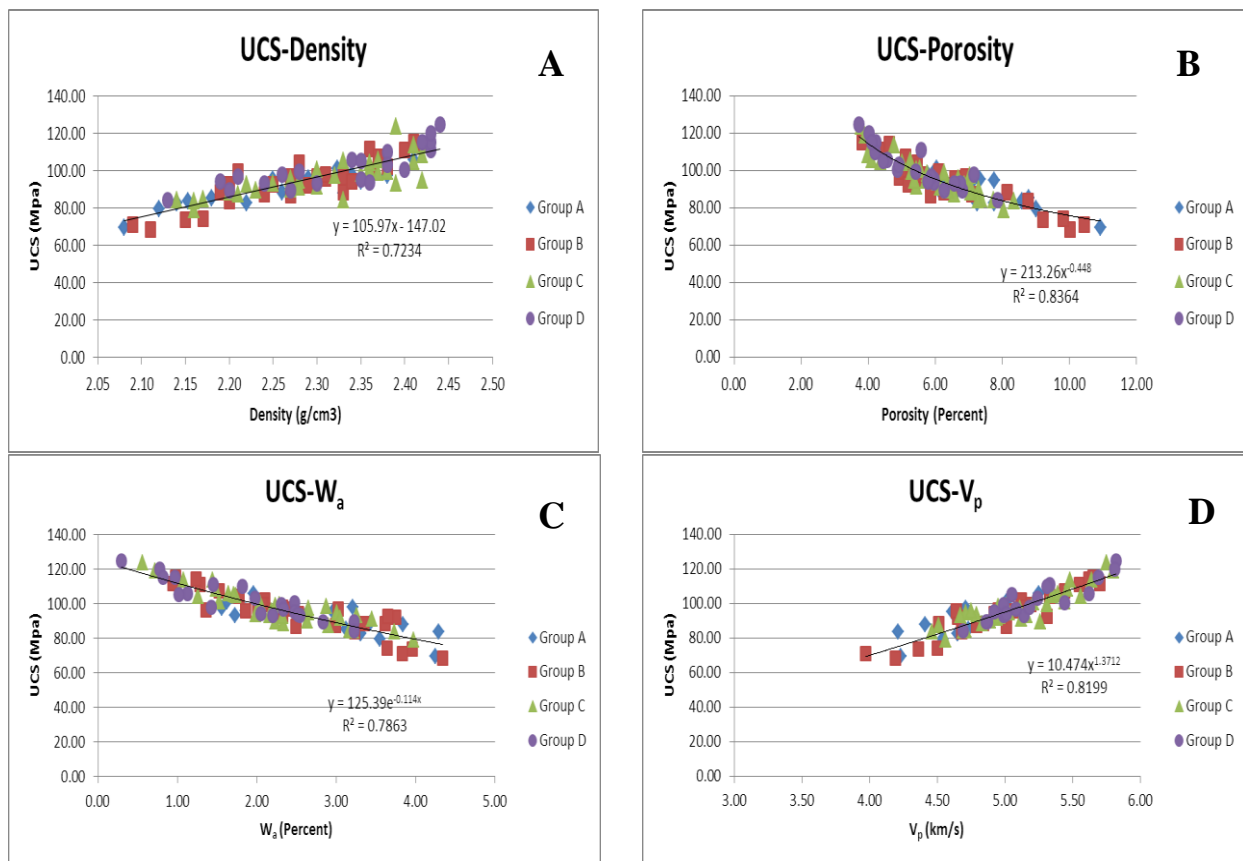
شکل D۶ نشان می‌دهد که رابطه توانی بین  $V_p$  و مقاومت فشاری تک‌محوره با ضریب همبستگی ۰/۸۲، وجود دارد که با نتایج منتشر شده قبلی نیز مطابقت دارد (Kahraman, 2001).

نتایج نشان می‌دهند که همبستگی UCS با دانسیته با ضریب همبستگی ۰/۷۲، کمتر از سایر پارامترهای مورد مطالعه است. این نتایج به دلیل تفاوت کم دانسیته نمونه‌ها قابل انتظار بود. شکل A۶ نشان می‌دهد رابطه خطی بین دانسیته و مقاومت فشاری تک محوری وجود دارد که نتایج منتشر شده توسط محققین قبلی را تایید می‌کند (Török and, 2017).

شکل B۶ نشان می‌دهد که بین تخلخل و مقاومت فشاری تک‌محوره رابطه توانی با ضریب همبستگی ۰/۸۴، وجود دارد که با نتایج منتشر شده توسط محققین قبلی نیز مطابقت دارد (Lashkaripour, 2002). بیشترین ضریب همبستگی در بین پارامترهای مطالعه شده مربوط به تخلخل است که نشان می‌دهد یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی موثر در خصوصیات مکانیکی سنگ است. بسیاری از محققین نیز

و کستون با ضریب همبستگی ۰/۸۴ و کمترین مربوط به مادستون با ضریب همبستگی ۰/۷۴ می باشد. ضمن اینکه بیشترین همبستگی جذب آب و مقاومت فشاری تک محوره طبق شکل ۹ مربوط به پکستون با ضریب همبستگی ۰/۸۳ و کمترین مربوط به مادستون با ضریب همبستگی ۰/۶۱ است. براساس شکل ۱۰ بیشترین همبستگی سرعت موج طولی مربوط به وکستون با ضریب همبستگی ۰/۸۵ و کمترین مربوط به مادستون با ضریب همبستگی ۰/۶۴ است.

به منظور بررسی ارتباط پارامترها بر مبنای نوع سنگ، رابطه بین دانسیته، تخلخل، جذب آب و سرعت موج طولی با مقاومت فشاری تک محوره به تفکیک نوع سنگ ارائه شده است. براین اساس طبق شکل ۷، بیشترین همبستگی دانسیته و مقاومت فشاری تک محوره مربوط به مادستون با ضریب همبستگی ۰/۸۱ و کمترین مربوط به وکستون پکستون با ضریب همبستگی ۰/۶۴ می باشد. بیشترین همبستگی تخلخل و مقاومت فشاری تک محوره مطابق شکل ۸ مربوط به



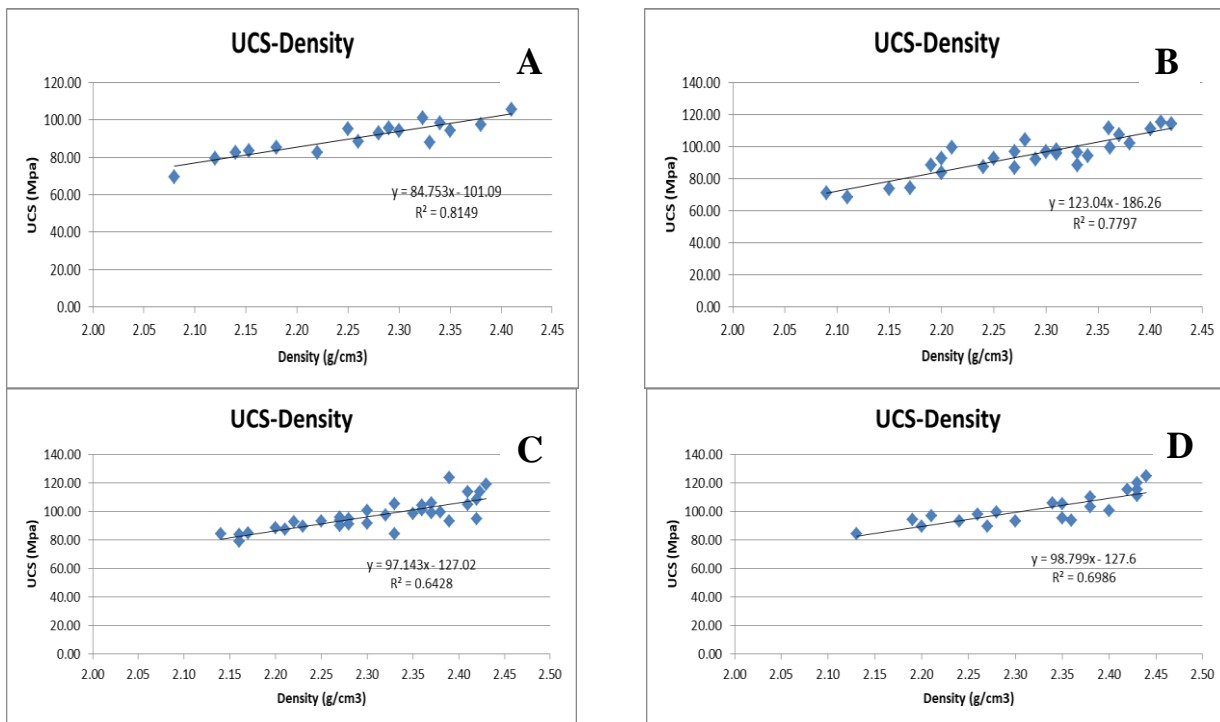
شکل ۶- روابط بین مقاومت فشاری تک محوره با A: دانسیته، B: تخلخل، C: درصد آب وزنی و D: سرعت موج طولی

انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره ممکن است در دسترس نباشد. در اینصورت مهندسان اغلب مقاومت فشاری تک محوره سنگ را بر اساس معادلات تجربی و نتایج حاصل از آزمون های فیزیکی و ساده تر تخمین می زنند. یکی از بهترین پارامترها برای تخمین آن شاخص بار نقطه ای است. شکل ۱۱ نشان می دهد که رابطه خطی بین Is و مقاومت

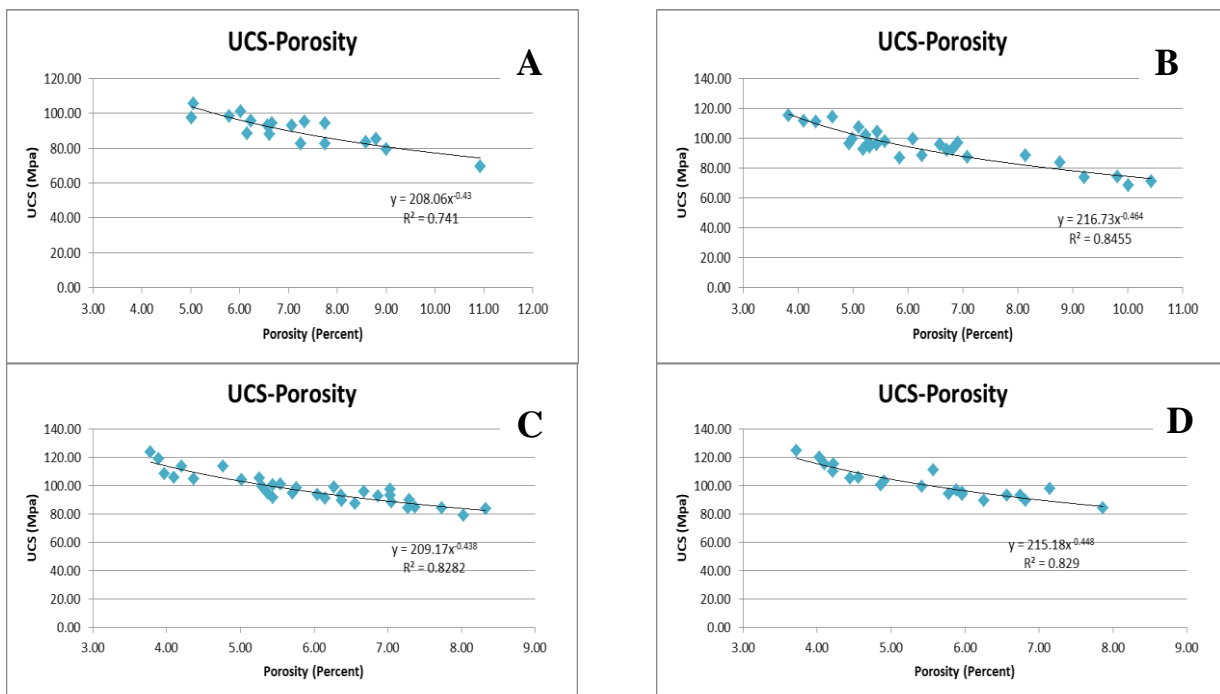
۳-۳. رابطه مقاومت فشاری تک محوره و شاخص بار نقطه ای مقاومت فشاری تک محوره یکی از پارامترهای اساسی مورد نیاز برای طراحی و تجزیه و تحلیل اکثر پروژه های مهندسی است. آماده سازی نمونه ها برای آزمایش مقاومت فشاری تک-محوره خسته کننده، زمان بر و گران هستند. ضمن اینکه در مراحل اولیه بسیاری از پروژه های کوچک تا متوسط، شرایط

رابطه بیش از ۰٫۸۸ به دست آمده که نشان‌دهنده قابلیت تخمین مناسب این رابطه می‌باشد.

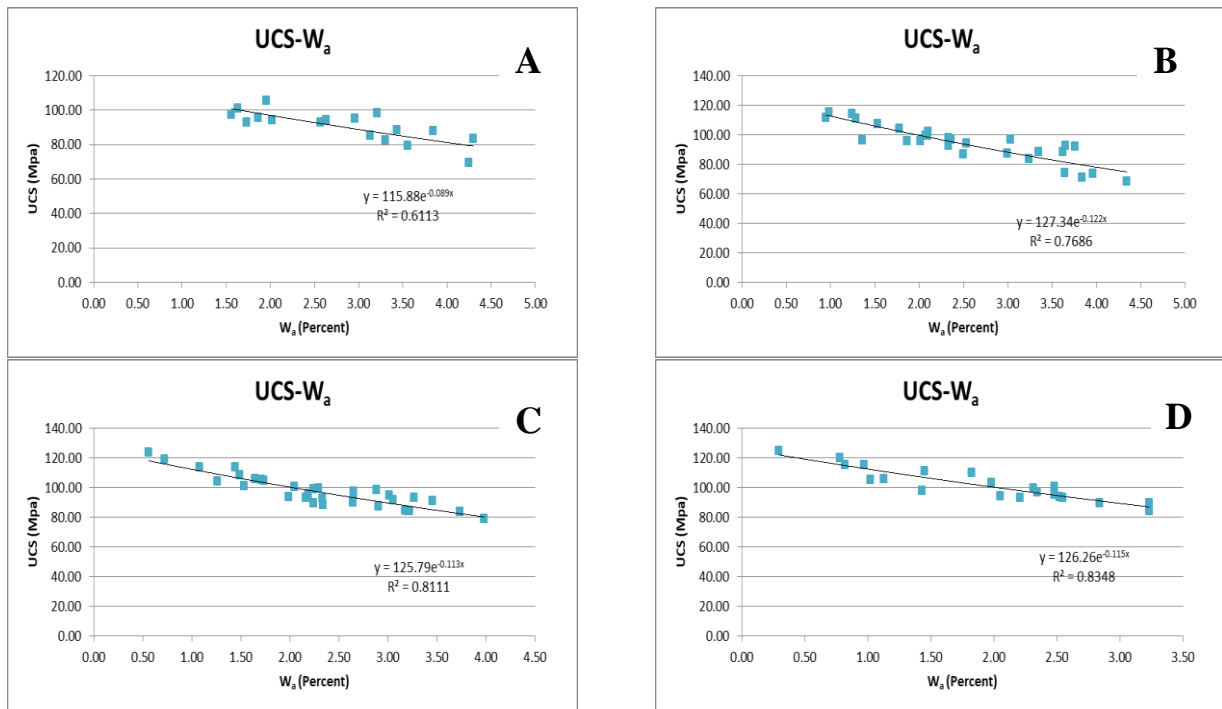
فشاری تک محوری وجود دارد که با نتایج منتشر شده قبلی نیز مطابقت دارد (Aladejare, 2020). ضریب همبستگی این



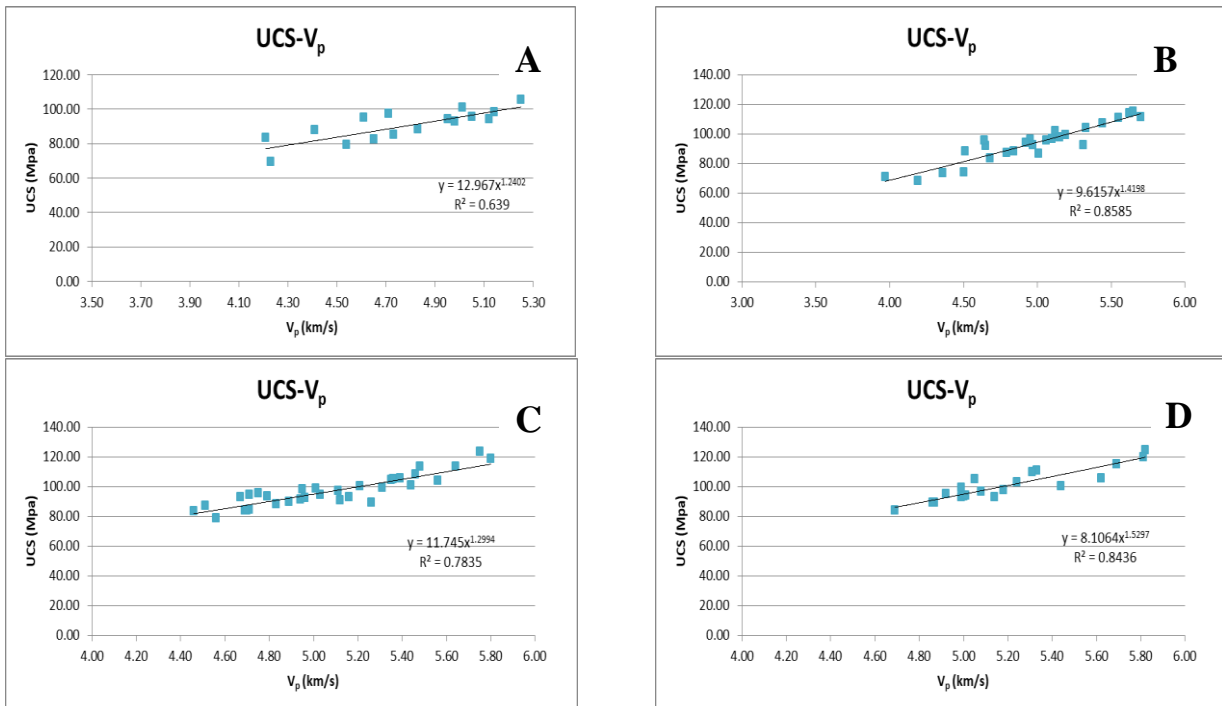
شکل ۷. روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوره با دانسیته A: مادستون، B: وکستون، C: وکستون پکستون، D: پکستون



شکل ۸. روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوره با تخلخل A: مادستون، B: وکستون، C: وکستون پکستون، D: پکستون



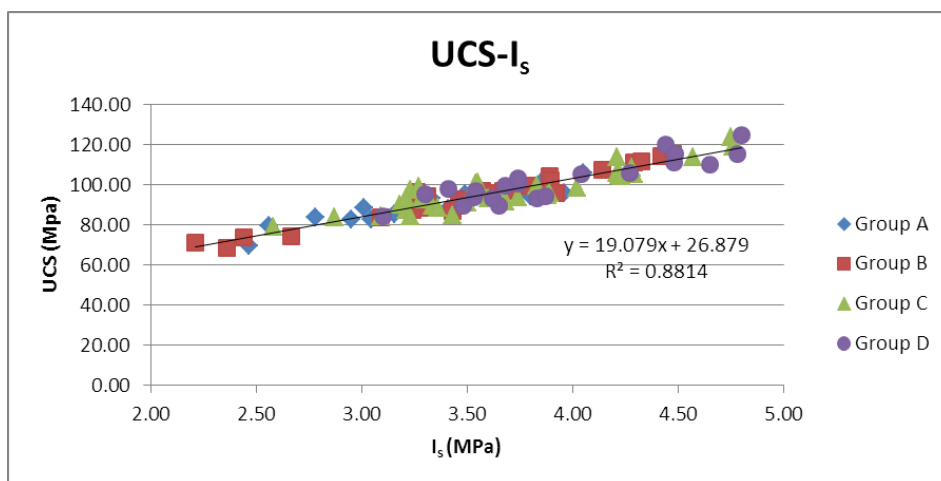
شکل ۹. روابط بین مقاومت فشاری تک محوره با جذب آب A: مادستون، B: وکستون، C: وکستون پکستون D: پکستون



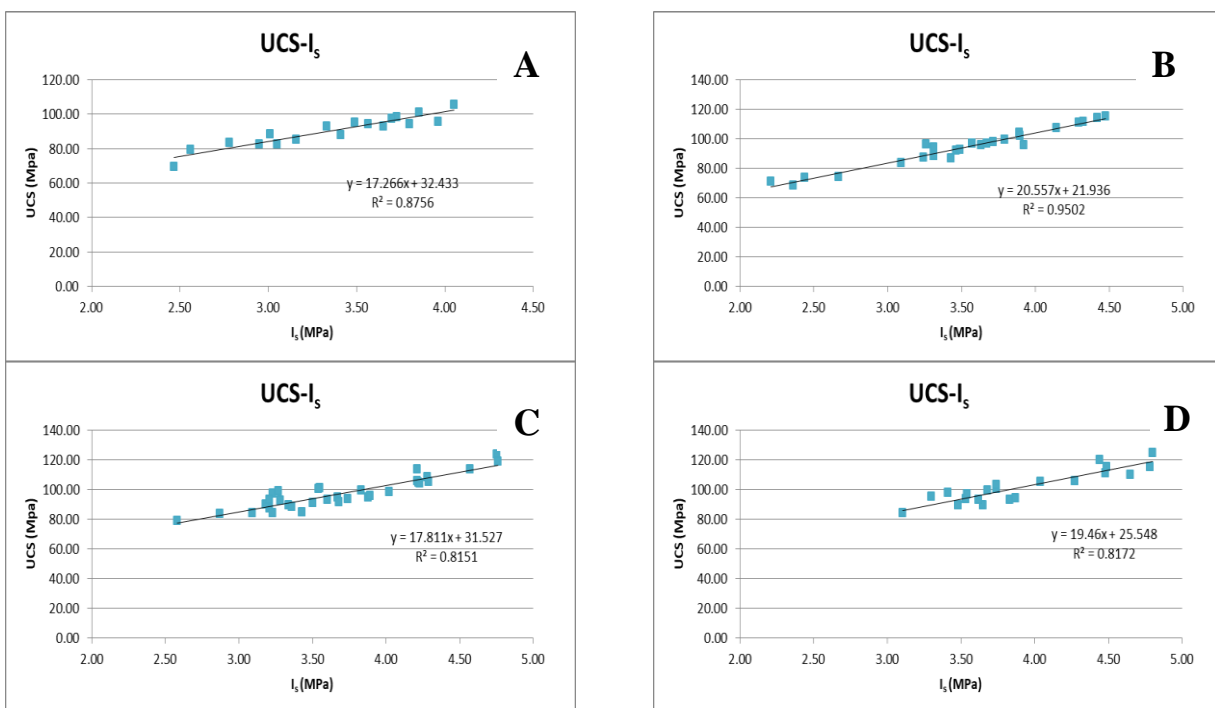
شکل ۱۰. روابط بین مقاومت فشاری تک محوره با سرعت موج طولی A: مادستون، B: وکستون، C: وکستون پکستون D: پکستون

مربوط به وکستون پکستون با ضریب همبستگی ۰/۸۱ می- باشد.

طبق شکل ۱۲، با توجه به طبقه بندی نمونه ها بیشترین همبستگی شاخص بار نقطه ای و مقاومت فشاری تک محوره مربوط به وکستون با ضریب همبستگی ۰/۹۵ و کمترین



شکل ۱۱. رابطه بین مقاومت فشاری تک محوره با شاخص بار نقطه‌ای



شکل ۱۲. روابط بین مقاومت فشاری تک محوره با شاخص بار نقطه‌ای A: مادستون، B: وکستون، C: وکستون پکستون، D: پکستون

#### ۴. نتیجه گیری

سازند ایلام به دلیل ویژگی‌های سنگ‌شناسی یکی از مهم‌ترین سنگ مخزن میادین نفتی ایران و خاورمیانه و به دلیل گسترش بسیار زیاد یکی از ساختگاه‌های پروژه‌های مهم عمرانی مانند سد ایلام، تونل نوسود و ... به شمار می‌رود. لذا شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی و مهندسی آن بسیار مهم می‌باشد. از نظر سنگ‌شناسی طیف وسیعی از ریزرخساره‌ها در این سازند قابل شناسایی می‌باشد و انواع مختلف سنگ آهک

شامل مادستون، وکستون، پکستون و گرینستون را شامل می‌شود. میانگین تخلخل و درصد جذب آب از نمونه‌های گرینستون به سمت مادستون افزایش می‌یابد که به دلیل وجود درصد بیشتر گل کربناته و ریزدانه‌تر بودن بافت می‌باشد. هرچند که میانگین دانسیته هر ۴ نوع سنگ بسیار به یکدیگر نزدیک هستند اما مقدار دانسیته نمونه‌های گرینستون بیشتر از بقیه نمونه‌ها بود.

فشاری تک محوری وجود دارد که امکان تخمین معقولی از استحکام سنگ‌های آهکی ایلام را فراهم می‌کند. تجزیه و تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد طبقه‌بندی سنگ‌ها می‌تواند باعث افزایش ضریب همبستگی پارامترها شود. بنابراین افزایش تعداد نمونه‌های با جنس‌های مختلف، همیشه باعث افزایش ضریب همبستگی بین پارامترها نمی‌شود، بلکه تحلیل برمبنای طبقه‌بندی نوع سنگ می‌تواند روابط بین پارامترها را بهتر و واقعی‌تر نشان دهد.

میانگین سرعت موج P، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوره در نمونه‌های پکستون بیشتر از انواع دیگر سنگ‌ها است که به دلیل وجود دانه‌های بیشتر در بافت سنگ و در نتیجه استحکام بالاتر آن می‌باشد. با انجام این مطالعه روابط تجربی مناسبی بین مقاومت فشاری تک‌محوره با ویژگی‌های فیزیکی سازند آهکی ایلام به دست آمد. تجزیه و تحلیل آماری نشان می‌دهد که بهترین همبستگی UCS مربوط به تخلخل و کمترین آن مربوط به دانسیته است. ضمن اینکه همبستگی قابل اعتمادی بین شاخص بار نقطه‌ای با مقاومت

#### منابع

- Adabi, M. H., Asadi-Mehmandosti, E., 2008. Microfacies and geochemistry of the Ilam Formation in the Tang-E Rashid area, Izeh, SW Iran. *J Asian Earth Sci* 33:267–277
- Agustawijaya, D. S., 2007. The Uniaxial compressive strength of soft rock. *Civil Engineering Dimension*, 9 (1), 9–14
- Aladejare, A. E., 2020. Evaluation of empirical estimation of uniaxial compressive strength of rock using measurements from index and physical tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), 256-268. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.08.001>.
- Altindag, R., Guney, A., 2010. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. *Scientific Research and Essays*. 5 (16), 2107 – 2118
- Aqrabi, A. A. M., Thehni, G. A., Sherwani, G. H., Kareem, B. M. A., 1998. Midcretaceous rudist bearing carbonates of the Mishrif formation: an important reservoir sequence in the Mesopotamian basin, Iraq. *J Petrol Geol* 21:57–82
- ASTM D2845-08, 2017. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- ASTM D7012-14, 2014. Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens Under Varying States of Stress and Temperatures. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- ASTM D5731-08, 2008 Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA
- Basu, A., Aydin, A., 2006. Predicting uniaxial compressive strength by point load test: Significance of cone penetration. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39 (5). 483–490. <http://doi:10.1007/s00603-006-0082-y>
- Bell, F. G., Lindsay, P., 1999. The petrographic and geomechanical properties of some sandstones from the Newspaper Member of the Natal Group near Durban, South Africa, *Engineering Geology*, 53. 57–81
- Bieniawski, Z. T., 1974. Estimating the strength of rock materials. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 312-320
- Broch, E., Franklin, J. A., 1972. The point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9 (6). 669–676. [http://doi:10.1016/0148-9062\(72\)90030-7](http://doi:10.1016/0148-9062(72)90030-7)
- Cargill, J. S., Shakoor, A., 1990. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27 (6). 495–503. [http://doi:10.1016/0148-9062\(90\)91001-n](http://doi:10.1016/0148-9062(90)91001-n)
- Chang, C., Zoback, M., Khaksar, A., 2006. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 51. 223-237. [10.1016/j.petrol.2006.01.003](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.01.003)

- Chau, K. T., Wong, R. H. C., 1996. Uniaxial compressive strength and point load strength of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 33 (2), 183–188. [http://doi:10.1016/0148-9062\(95\)00056-9](http://doi:10.1016/0148-9062(95)00056-9)
- Deere, D. U., Miller, R. P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Illinois University at Urbana Department of Civil Engineering
- Diamantis, K., Gartzos, E., Migiros, G., 2009. Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations. *Engineering Geology*. 108 (3–4), 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.07.002>
- Dunham, R. J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture, In: Ham, W. E. (ed.), *Classification of carbonate rocks*, American Association of Petroleum Geologists, Mem. 1: 108-121
- Flügel, E., 2004, "Microfacies of Carbonate Rocks, Analysis, Interpretation and Application", SpringerVerlag, 976 pp
- Forster, I. R., 1983. The influence of core sample geometry on the axial point-load test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 20 (6), 291–295. [http://doi:10.1016/0148-9062\(83\)90599-5](http://doi:10.1016/0148-9062(83)90599-5)
- Ghafoori, M., Rastegarnia, A., Lashkaripour, G. M., 2018. Estimation of static parameters based on dynamical and physical properties in limestone rocks. *Journal of African Earth Sciences*, 137, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.09.008>.
- Ghosh, D. K., Srivastava, M., 1991. Point-load strength: An index for classification of rock material. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 44 (1), 27–33. <http://doi:10.1007/bf02602707>
- Goldsmith, W., Sackman, J. L., Ewerts, C., 1976. Static and dynamic fracture strength of Barre granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13 (11), 303-309. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)91829-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)91829-5).
- Gupta, V., 2009. Non-destructive testing of some Higher Himalayan rocks in the Satluj Valley. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 68 (3). 409–416. <http://doi:10.1007/s10064-009-0211-4>
- Gupta, V., Sharma, R., 2012. Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya. *Engineering Geology*, 135-136. 1–9. <http://doi:10.1016/j.enggeo.2012.02.006>
- Jahed Armaghani, D., Safari, V., Fahimifar, A., Mohd, A. M. F., Monjezi, M., Mohammadi, M. A., 2017. Uniaxial compressive strength prediction through a new technique based on gene expression programming. *Neural Computing and Applications*. 30 (11), 3523-3532. <http://doi:10.1007/s00521-017-2939-2>
- James, G. A., & Wynd, J. G. 1965, Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium, agreement area, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*,. 49 (12): 2182 – 2245
- Kahraman, S., 2001. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38 (7). 981–994. [http://doi:10.1016/s1365-1609\(01\)00039-9](http://doi:10.1016/s1365-1609(01)00039-9)
- Kahraman, S., 2014. The determination of uniaxial compressive strength from point load strength for pyroclastic rocks. *Engineering Geology*, 170. 33–42. <http://doi:10.1016/j.enggeo.2013.12.009>
- Kahraman, S., Gunaydin, O., Fener, M., 2005. The effect of porosity on the relation between uniaxial compressive strength and point load index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42 (4). 584–589. <http://doi:10.1016/j.ijrmms.2005.02.004>
- Katz, O., Reches, Z., Roegiers, J.-C., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37 (4), 723–728. [http://doi:10.1016/s1365-1609\(00\)00004-6](http://doi:10.1016/s1365-1609(00)00004-6)
- Khandelwal, M., 2012. Correlating P-wave velocity with the physico-mechanical properties of different rocks. *Pure and Applied Geophysics*. 170 (4). 507–514. <http://doi:10.1007/s00024-012-0556-7>
- Kong, F., Shang, J., 2018. A Validation study for the estimation of uniaxial compressive strength based on index tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 51 (7). 2289-2297. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1462-9>
- Lashkaripour, G. R., 2002. Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters. *Bull Eng Geol Environ*. 61, 73–77. <https://doi.org/10.1007/s100640100116>

- Madhubabu, N., Singh, P. K., Kainthola, A., Mahanta, B., Tripathy, A., Singh, T. N., 2016. Prediction of compressive strength and elastic modulus of carbonate rocks. *Measurement*, 88, 202–213. <http://doi:10.1016/j.measurement.2016.03.050>
- Motiei, H., 1993. *Geology of Iran, the stratigraphy of Zagros*. Geol Survey of Iran, Tehran (in Farsi), p 572
- Nazir, R., Momeni, E., Jahed Armaghani, D., Mohd For, M., 2013. Correlation between unconfined compressive strength and indirect tensile strength of limestone rock samples, *Electr J GeotechEng*. 18 (I). 1737–1746
- Palchik, V., Hatzor, Y. H., 2004. The influence of porosity on tensile and compressive strength of porous chalks. *Rock Mech. Rock. Eng.* 37 (4), 331e341. <https://doi.org/10.1007/s00603-003-0020-1>
- Příkryl, R., 2006. Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology*. 87 (3–4). 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.05.011>
- Quane, S. L., Russell, J. K., 2003. Rock strength as a metric of welding intensity in pyroclastic deposits. *European Journal of Mineralogy*. 15 (5), 855–864. <http://doi:10.1127/0935-1221/2003/0015-0855>
- Sabatakakis, N., Koukis, G., Tsiambaos, G., Papanakli, S., 2008. Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks. *Engineering Geology*. 97 (1-2), 80–90. <http://doi:10.1016/j.enggeo.2007.12.004>
- Sari, M., 2018. Investigating relationships between engineering properties of various rock types. *Global Journal of Earth Science and Engineering*. 5. 1-25. 10.15377/2409-5710.2018.05.1
- Sharma, P. K., Singh, T. N., 2007. A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67 (1), 17–22. <http://doi:10.1007/s10064-007-0109-y>
- Sharma, R., Gupta, V., 2013. The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya. *Engineering Geology*, 153, 125-143. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.11.005>
- Singh, V. K., Singh, D. P., 1993. Correlation between point load index and compressive strength for quartzite rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 11 (4), 269–272. <http://doi:10.1007/bf00466369>
- Sun, W., Wang, L., Wang, Y., 2017. Mechanical properties of rock materials with related to mineralogical characteristics and grain size through experimental investigation: a comprehensive review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 11 (3), 322–328. <http://doi:10.1007/s11709-017-0387-9>
- Tahir, M., Noor, M., Din, F., 2011. Strength parameters and their inter-relationship for limestone of Cherat and Kohat areas of Khyber Pakhtunkhwa, *Journal of Himalayan Earth Sciences*. 44. 45-51
- Török, Á., Czinder, B., 2017. Relationship between density, compressive strength, tensile strength and aggregate properties of andesites from Hungary. *Environ Earth Sci*, 76, 639. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6977-y>
- Tsiambaos, G., Sabatakakis, N., 2004. Considerations on strength of intact sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 72 (3-4), 261–273. <http://doi:10.1016/j.enggeo.2003.10.001>
- Tuğrul, A., Zarif, I., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*. 51 (4), 303–317. [http://doi:10.1016/s0013-7952\(98\)00071-4](http://doi:10.1016/s0013-7952(98)00071-4)
- Ulusay, R., Tureli, K., Ider, M.H., 1994. Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariable statistical techniques. *Engineering Geology*, 37, 135–157
- Wang, H., Lin, H., Cao, P., 2017. Correlation of UCS rating with schmidt hammer surface hardness for rock mass classification. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 50 (1), 195-203. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1044-7>
- Wanniarachchi, W. A. M., Ranjith, P. G., Perera, M. S. A., Rathnaweera, T. D., Lyu, Q., Mahanta, B., 2017. Assessment of dynamic material properties of intact rocks using seismic wave attenuation: an experimental study. *Royal Society Open Science*, 4 (10), 170896. <http://doi:10.1098/rsos.170896>
- Wilson, J. L., 1975, *Carbonate Facies in Geologic History*, Springer-Verlag New York, 471 pp

- 
- Wong, L. N. Y., Maruvanchery, V., Liu, G., 2016. Water effects on rock strength and stiffness degradation. *Acta Geotech.* 11, 713–737 . <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0407-7>
- Yılmaz, I., Sendir, H., 2002. Correlation of schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). *Engineering Geology*, 66 (3-4). 211–219. [http://doi:10.1016/s0013-7952\(02\)00041-8](http://doi:10.1016/s0013-7952(02)00041-8)
- Zorlu, K., Gokceoglu, C., Ocakoglu, F., Nefeslioglu, H. A., Acikalin, S., 2008. Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models. *Engineering Geology*, 96 (3-4). 141–158. <http://doi:10.1016/j.enggeo.2007.10.009>