

بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ژئیس‌های سازند گچساران در گسترش اشکال انحلالی

(منطقه رامهرمز، استان خوزستان)

محمدحسین قبادی^{*}، محمد محمدیان^۲، حسن محسنی^۳، رامین کرمی^۴

پذیرش مقاله: ۹۲/۰۳/۲۶

دریافت مقاله: ۹۰/۱۰/۰۷

چکیده

پدیده کارست در ژئیس‌ها به دلیل قابلیت انحلال زیاد به آسانی توسعه پیدا می‌کند. در این پژوهش با استفاده از مطالعات سنگ‌شناسی و تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های ژئیس سازند گچساران در منطقه رامهرمز، رابطه بین خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی ژئیس با چگونگی توسعه اشکال انحلالی بررسی گردیده است. برای تعیین نوع سنگ ژئیس از ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) به عنوان ترکیبی از منطق فازی با شبکه‌های عصبی در قالب روش‌های Neuro-Fuzzy استفاده شد. پارامترهای ورودی این مدل شامل مقاومت تراکمی تک محوره، مقاومت کششی، شاخص دوام سیکل اول و درصد تخلخل ۸۰ نمونه آزمایشگاهی می‌باشند. با استفاده از ANFIS مدلی ساخته شد که با داشتن اطلاعات اندکی از سنگ، قادر به پیش‌بینی نوع سنگ خواهیم بود. با توجه به مطالعات سنگ‌شناسی، ژئیس‌های سازند گچساران در دو نوع آلاباستر (دارای بافت ریزدانه) و پورفیریتیک (دارای بافت درشت‌دانه) تقسیم‌بندی شده‌اند. نتایج نشان داد که بافت سنگ، به‌ویژه شکل و اندازه دانه‌ها، یک پارامتر مهم کنترل‌کننده خصوصیات مکانیکی ژئیس‌های مذکور می‌باشد. با توجه به رده‌بندی مهندسی سنگ بکر، ژئیس آلاباستر در رده سنگ ضعیف با نسبت مدولی زیاد (DH) و ژئیس پورفیریتیک در رده سنگ بسیار ضعیف با نسبت مدولی زیاد (EH) قرار می‌گیرند. ژئیس آلاباستر نسبت به ژئیس پورفیریتیک دارای مقاومت تراکمی، مقاومت کششی و قابلیت انحلال بیشتری بوده و رفتار شکننده‌تری از خود نشان می‌دهد. به همین علت پدیده‌های کارستی همچون فروچاله انحلالی، چاه‌های کارستی، طاق‌های طبیعی و غار در آنها گسترش بیشتری دارند. ژئیس پورفیریتیک دوام شکستگی بیشتر و مقاومت کمتری نسبت به ژئیس آلاباستر دارد. به همین دلیل فروچاله‌های فرونشستی و فروریزی در آنها توسعه زیادتری دارد. هم‌چنین کارن‌ها و برج‌های انحلالی در آنها با ابعاد بزرگتری شکل می‌گیرند.

کلید واژه‌ها: سازند گچساران، ژئیس آلاباستر، ژئیس پورفیریتیک، ANFIS، توسعه کارست، خصوصیات مهندسی

۱. استاد گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا همدان amirghobadi@yahoo.com

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

۴. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد و عضو هیات علمی دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

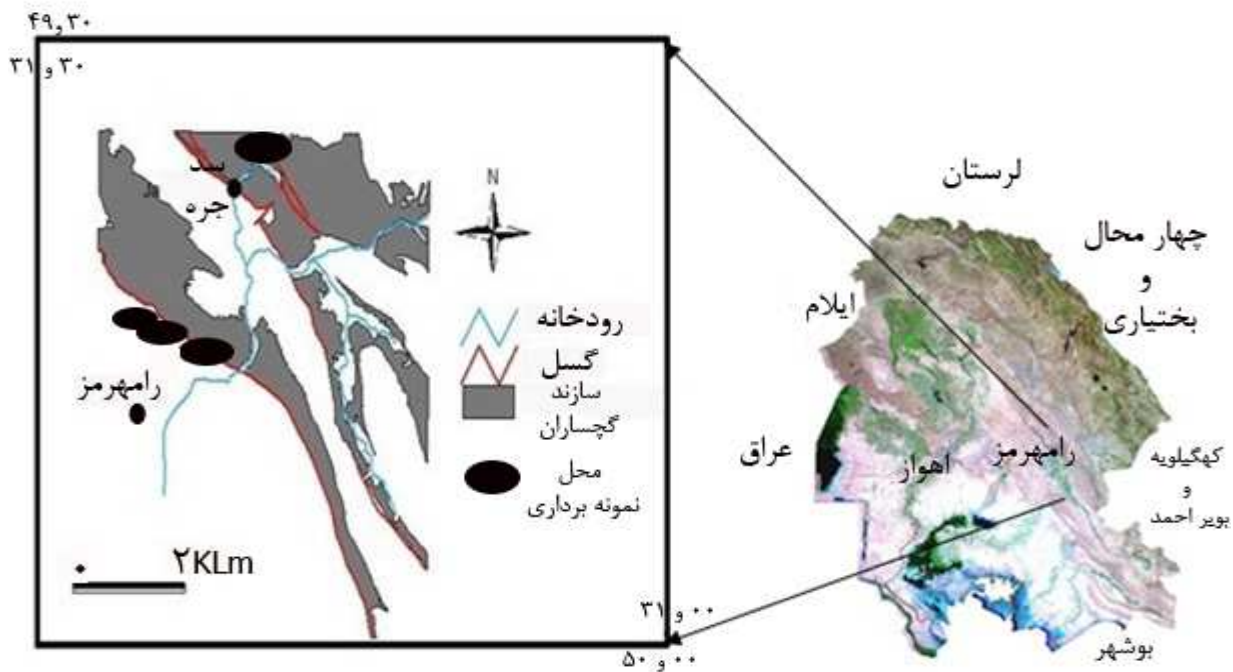
تاکنون موضوع انحلال پذیری ژئیس توسط پژوهشگران زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است. رمانف و همکاران در سال ۲۰۰۳ مدلی برای محاسبه زمان لازم جهت پیشرفت پدیده کارست، تا رسیدن به مرحله بحرانی ارائه دادند. مدل طراحی شده، پدیده کارستی شدن در زیر یک سد را به وسیله ارتباط عریض شدگی انحلالی با جریان هیدرودینامیکی موجود نمایش می‌داد. متیو و همکارانش در سال ۱۹۹۸ فراوانی پدیده‌های ژئومورفولوژیکی کارست به ویژه فروچاله‌ها، در ارتباط با چگونگی توسعه کارست در ژئیس‌های ترشیاری منطقه ابرو (Ebro) در اسپانیا را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که فروچاله‌ها ممکن است به صورت ناگهانی تشکیل شوند و خطرات زیادی برای سد، ناپایداری شیب و ایجاد سیلاب در منطقه داشته باشند. برناردس و همکاران در سال ۱۹۹۹ پهنه‌بندی خطرات کارست‌شدگی ژئیس در مناطق شمالی لیتوانی و شمال شرقی انگلستان را انجام داده و تشکیل فروچاله، تغییر کیفیت و آلودگی منابع آب در منطقه را از مسائل اساسی در ارتباط با کارست لایه‌های ژئیس بیان کردند. کوپر در سال ۲۰۰۸ با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به بررسی خطرات کارست تبخیری (کارست در سنگ‌های تبخیری ژئیس و نمک) در انگلستان پرداخت و برای مناطقی که سنگ‌های تبخیری رخنمون داشتند نقشه‌های خطر تهیه کرد. کوپر در این تحقیق برای تهیه نقشه خطر از نقشه‌های پایه پراکندگی فروچاله‌ها، چشمه‌ها، غارها، جریان‌های فرورونده و مناطق آسیب دیده از کارست، استفاده کرد. کوپر نتیجه گرفت که با تعیین محل مناطق پرخطر، می‌توان با کنترل ساخت‌وساز جلوی خطرات بیشتر را گرفت و مناطقی که در آنجا کارست شدگی ژئیس در ارتباط با آب‌های زیرزمینی قابل شرب است را محافظت کرد.

کنت در سال ۲۰۰۸ مسائل ناشی از کارست ژئیس در ساخت سد در آمریکا را مورد مطالعه قرار داد. این مسائل شامل ریزش و تخریب سد و فرار آب از اطراف یا زیر سد معرفی شدند. کنت مهم‌ترین روش‌ها برای کنترل کارست‌شدگی ژئیس را

شامل احداث دیوار آب‌بند عمیق، احداث پتوی رسی و تزریق سیمان به درون غارها معرفی کرد. کلیمچاک و آکسم در سال ۲۰۰۵ نرخ انحلال ژئیس در غرب اوکراین را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نرخ انحلال ژئیس به ترکیب شیمیایی آب در تماس با ژئیس و همچنین رژیم جریان آب بستگی دارد. یلماز در سال ۲۰۰۵ دوام‌پذیری و ارتباط آن با تشکیل فروچاله را در ژئیس مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که بافت، به ویژه اندازه دانه‌ها و تخلخل مؤثر مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده دوام شکستگی و تشکیل فروچاله در ژئیس می‌باشند. تونی و همکاران در سال ۲۰۰۵ مکانسیم تشکیل فروچاله‌ها را تشریح کرده و در ارتباط با آهک بیان داشتند که بیشتر غارها، فروچاله‌ها و اشکال کارستی در سنگ‌های با مقاومت تراکمی تک‌محوره بیش از ۶۰ مگاپاسکال، وزن مخصوص $2/6 \text{ KN/m}^3$ و نفوذپذیری اولیه کمتر از ۲٪ تشکیل می‌شوند. اما در ارتباط با تفاوت کارست در یک منطقه و رابطه بین گسترش کارست و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ مطالعات اندکی صورت گرفته است. در سال‌های اخیر تحقیقاتی در ارتباط با انحلال ژئیس در محل تعدادی از سدهای کشور انجام گردیده است. مطالعه انحلال‌پذیری ژئیس‌های سازند گچساران در محل سد تنگ شمیران ایلام (باغداردخت، ۱۳۸۴)، ارزیابی میزان انحلال ژئیس‌های سازند آغاچاری در ساختگاه سد خیرآباد بهبهان (موسوی، ۱۳۸۵)، تعیین انحلال ژئیس‌های سازند گچساران در سد تنگ سرخ (پرهیزکار، ۱۳۸۶) و مطالعه انحلال‌پذیری ژئیس‌های سازند گچساران در محل سد چم‌شیر (ترابی، ۱۳۸۹) نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده است. نتیجه این مطالعات، لزوم توجه به میزان انحلال ژئیس و احتمال فرار آب از طریق این سنگ‌های سولفات‌دار بوده است. در این مطالعات توجهی به نوع بافت ژئیس نشده و نقش خصوصیات سنگ‌شناسی در گسترش کارست را کمتر در نظر گرفتند و پارامترهایی چون ترکیب شیمیایی آب منطقه و درزه‌داری را از عوامل مؤثر بر انحلال‌پذیری بیان کردند. این پژوهش به بررسی ارتباط بین تشکیل و گسترش کارست با ویژگی‌های لیتولوژیکی و مکانیکی ژئیس‌های سازند گچساران

منطق فازی با شبکه‌های عصبی در قالب سیستم‌های Neuro-Fuzzy دارای توانایی زیادی برای حل مسائل پیچیده می‌باشد. فرآیندی که طی آن نگاهت از ورودی‌ها به خروجی‌ها با استفاده از منطق فازی فرموله‌سازی می‌گردد، استنتاج فازی گفته می‌شود. (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) ANFIS ترکیبی از منطق فازی و شبکه‌های عصبی است که به کمک مجموعه‌ای از داده‌های ورودی-خروجی، یک سیستم استنتاج فازی ایجاد می‌کند (کیا، ۱۳۸۹). تکنیک شناخته شده ANFIS برای مدل‌کردن مسائل پیچیده‌ای که ارتباط بین متغیرهای مدل ناشناخته است، بسیار مناسب می‌باشد. در این تحقیق سعی شده که به کمک ANFIS مدلی بیان شود که به وسیله آن و با استفاده از پارامترهایی مثل دوام، مقاومت تراکمی و مقاومت کششی و تخلخل که رابطه مستقیمی با یکدیگر ندارند، بتوان نوع سنگ ژئیس را تعیین کرد تا در مرحله انتخاب یک پی مناسب برای احداث سازه کمک بیشتری به ما نماید.

در منطقه رامهرمز می‌پردازد. منطقه رامهرمز در ۹۰ کیلومتری شرق شهر اهواز واقع شده و سازند تبخیری گچساران در این منطقه گسترش فراوانی دارد (شکل ۱). مهم‌ترین مرحله در ساخت یک سازه انتخاب یک پی مناسب است. این انتخاب در مورد سنگ‌های کارستی مثل ژئیس با حساسیت بیشتری همراه است. انتخاب سنگ ژئیس که کمتر دچار انحلال شده و مقاومت بالاتری داشته باشد، بسیار مهم است. در این تحقیق جهت تعیین نوع سنگ ژئیس سازند گچساران از سیستم Neuro-Fuzzy استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) شبیه‌سازی شده دستگاه عصبی بدن می‌باشند که هم مانند سیستم‌های عصبی قادر به انجام عملیات‌های زیادی هستند. منطق فازی (Fuzzy Logic) از جمله قواعدی است که به شکل مطلوبی قدرت استدلال کاربر را افزایش می‌دهد. منطق فازی دارای قابلیت مدل‌سازی توابع غیرخطی پیچیده می‌باشد و بین پارامترهایی که رابطه مستقیمی با یکدیگر ندارند، یک رابطه منطقی برقرار می‌کند. ترکیب



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکندگی سازند گچساران در منطقه

۲. زمین شناسی

در ناحیه مورد مطالعه سازند گچساران در دو بخش رخنمون دارد: یک بخش از جنوب شرق تا شمال غرب شهر رامهرمز با طول حدود ۱۰۰ و با پهنای ۴ تا ۱۱ کیلومتر کشیده شده است که در نتیجه عملکرد گسل رامهرمز رخنمون پیدا کرده است (محمدیان و همکاران، ۱۳۸۹) و بخش دیگر که تقریباً به موازات بخش قبلی است، در اثر عملکرد گسل جره رخنمون پیدا کرده و در حدود دو سوم از مخزن سد جره در شمال شهر رامهرمز را در بر می گیرد. تکرار متناوب لایه های سنگی از بارزترین مشخصات سازند گچساران می باشد. این تناوب به ترتیب شامل ردیفی از مارن های رنگی، کربنات ها، انیدریت، ژپس و نمک ها می باشند. چنین توالی را در سازند گچساران در منطقه رامهرمز می توان مشاهده کرد (شکل ۲). ژپس ها بیشترین ضخامت و گسترش را در منطقه دارند. بعد از ژپس، مارن ها بیشترین پراکندگی را در سازند گچساران دارند و به رنگ های مختلفی دیده می شوند که انواع خاکستری تا سبز و مارن های قرمز بیشترین گسترش را داراست اما در مقابل رخنمون آهک به صورت لایه های نازک بوده و گسترش کمی دارند. با توجه به فرسایش ژپس و مارن ها، سازند گچساران دارای مورفولوژی تپه ماهوری است. چین های بسیار کوچک و متعدد از ویژگی های این سازند محسوب می گردد. در این منطقه، نمک به دلیل انحلال سریع در رخنمون ها بسیار کم دیده می شود.

تشکیل دهنده سنگ، آنالیز XRD مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور انجام آزمایش های مکانیک سنگ، برای هر نمونه سنگ ۸۰ مغزه از بلوک های به ابعاد $60 \times 60 \times 40$ cm تهیه گردید و آزمایش ها بر اساس استانداردهای (ISRM(1981) و یا ASTM انجام شد. برای تعیین نوع سنگ ژپس با استفاده از داده های آزمایشگاهی، سیستم ANFIS مورد استفاده قرار گرفت. به این منظور نرم افزار MATLAB به کار گرفته شده که در آن داده های آزمایشگاهی به عنوان ورودی و گراف های پیش بینی نوع سنگ نقش خروجی را داشتند. در نهایت ارتباط بین ویژگی های لیتولوژیکی و مکانیکی ژپس ها و توسعه کارست مورد تجزیه و تحلیل واقع شده است.



شکل ۲. مقطع سازند گچساران در منطقه رامهرمز (Gyp: ژپس، MrL: مارن، LS: آهک ماسه ای)

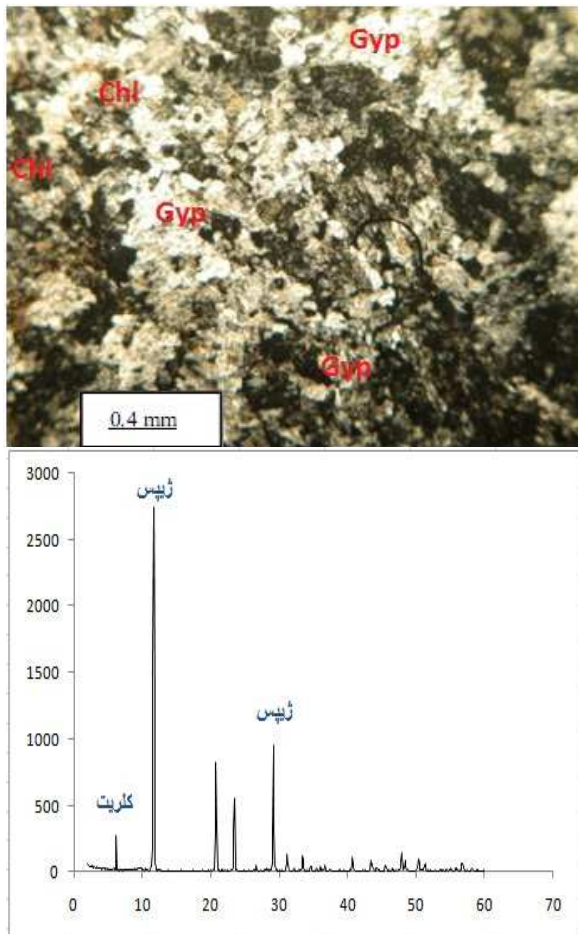
۴. سنگ شناسی

در منطقه مورد مطالعه ژپس ها در اشکال مختلف به صورت نودولی، دانه شکری، رشته ای، خوشه ای و توده ای با دو نوع بافت به شرح زیر مشاهده می گردد.
 (۱) ژپس آلباستر: ژپس توده ای بسیار متراکم، بافت بسیار ریزدانه، معمولاً سفید برفی و مات، اما گاهی اوقات به رنگ زرد، قهوه ای، قرمز، نارنجی یا سبز دیده می شود.
 (۲) ژپس پورفیریتیک: دارای بافت درشت دانه است که در آن بلورهای بزرگ در زمینه ای از ریزدانه ها دیده می شود.

۳. روش تحقیق

به منظور مقایسه میزان توسعه کارست در ژپس های سازند گچساران در منطقه رامهرمز، ابتدا مطالعات صحرایی شامل شناسایی پدیده های مورفولوژیکی کارست، درزه برداری و نمونه برداری از منطقه صورت گرفت. در دو منطقه بیشترین تفاوت در اشکال کارستی مشاهده شد: (۱) شمال شهر رامهرمز و در امتداد گسل رامهرمز، (۲) در مخزن سد جره و در امتداد گسل های دشت شیر و دشت انار. به منظور یافتن علت تفاوت، مطالعات تکتونیکی و آزمایشگاهی انجام شد. از هر دو منطقه نمونه هایی جمع آوری گردیده، ۱۰ مقطع میکروسکوپی تهیه و مطالعات پتروگرافی انجام شده است. جهت شناسایی کانی های

رسی (کلریت-Chl) بوده و بافت ریزدانه دارد (شکل ۴). به علت وجود کلریت این نوع ژئوس در نمونه دستی سبز رنگ دیده می‌شود.

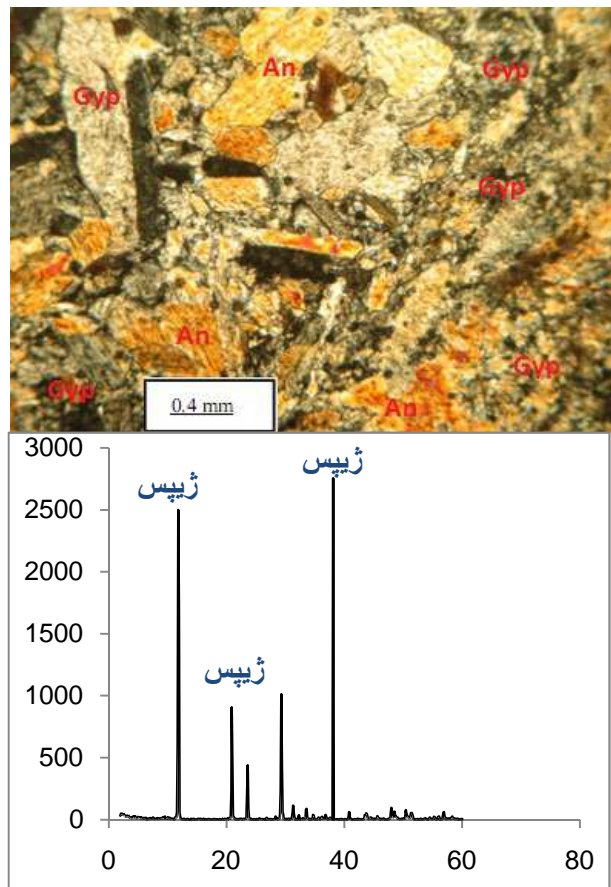


شکل ۴. تصویرمقطع میکروسکوپی در حالت XPL و نمودار آنالیز پرتو X برای ژئوس آلاستر (An: انیدریت، Gyp: ژئوس و Chl: کلریت)

نتایج مطالعات پتروگرافی نشان داد که ژئوس موجود در محدوده شمالی شهر رامهرمز غالباً از نوع ژئوس پورفیریتیک و ژئوس موجود در مخزن سد جره از نوع آلاستر است.

۵. ویژگی‌های فیزیکی ژئوس

وزن واحد حجم نمونه‌ها مطابق با روش‌های طراحی شده توسط براون تعیین شدند (Brown, 1981). بر اساس کار دیر و همکاران وزن واحد حجم ژئوس $23/2 \text{ kN/m}^3$ می‌باشد (Deer and Miller, 1966). نمونه‌ها تفاوت قابل توجهی در



شکل ۳. تصویر مقطع میکروسکوپی در حالت XPL و نمودار آنالیز پرتو X برای ژئوس پورفیریتیک (An: انیدریت و Gyp: ژئوس)

ژئوس به دو صورت تشکیل می‌شود: اولیه یا ثانویه. انواع اولیه در زمان نهشته شدن، از آب حوضه تشکیل شده‌اند که با افزایش عمق و با از دست دادن آب، به انیدریت تبدیل می‌شوند. انیدریت در اثر فشارهای تکتونیکی بالا آمده و در نتیجه جذب آب به ژئوس تبدیل می‌شود که این نوع ژئوس ثانویه می‌باشد. ژئوس‌های آلاستر و پورفیریتیک ثانویه هستند. ژئوس پورفیریتیک درشت‌دانه در اثر آگیری انیدریت تشکیل شده است. نوع آلاستر یا پورفیریتیک بودن نمونه‌ها با مطالعات میکروسکوپی مشخص شده است. ژئوس پورفیریتیک در مقطع میکروسکوپی دارای بلورهای درشت انیدریت (An) و زمینه ریزدانه ژئوس (Gyp) بوده و آنالیز XRD نشان داده که بدون ناخالصی می‌باشد (شکل ۳).

ژئوس آلاستر ریزدانه بعد از ژئوس پورفیریتیک و در نزدیکی سطح زمین تشکیل می‌گردد (Tony and et al., 2005). این نوع ژئوس در مقطع دارای بلورهای ریز ژئوس (Gyp) و کانی

وزن واحد حجم نداشتند زیرا مقدار ناخالصی آنها پایین است. میانگین وزن واحد حجم برای ژئوپس آلباستر $23/3 \text{ kN/m}^3$ و برای ژئوپس پورفیریتیک $22/4 \text{ KN/m}^3$ به دست آمد. تمامی نمونه‌های آزمایش شده بر اساس طبقه‌بندی IAEG با دانسیته کم معرفی می‌شوند (Anonymous, 1979). میانگین درصد تخلخل برای ژئوپس آلباستر برابر $1/54\%$ و برای ژئوپس پورفیریتیک $2/36\%$ به دست آمد.

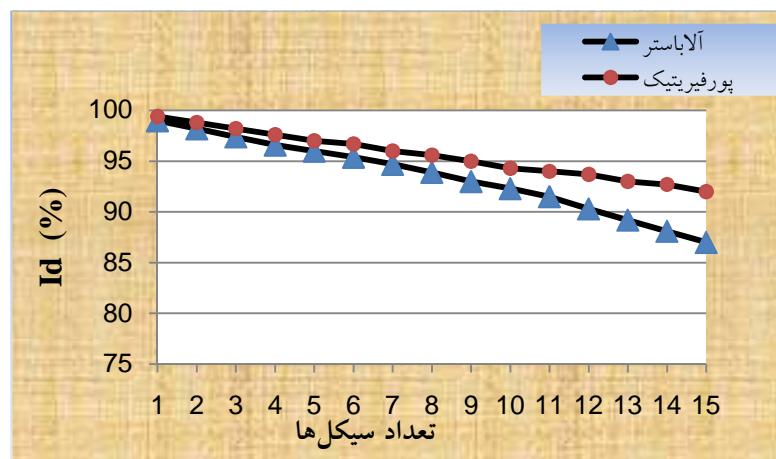
۶. ویژگی شیمیایی ژئوپس

۶-۱. انحلال‌پذیری

میزان انحلال سنگ به نوع کانی‌های تشکیل دهنده، درجه اشباع محلول، سطح در معرض تماس با محلول و نوع جریان وابسته است (Derek and Paul, 2007). در این مطالعه جهت بررسی میزان انحلال‌پذیری نمونه‌ها، از آزمایش انحلال به روش سیرکولاسیون استفاده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان انحلال‌پذیری ژئوپس آلباستر برابر با $2/6$ گرم بر لیتر و میزان انحلال‌پذیری ژئوپس پورفیریتیک برابر با $2/57$ گرم بر لیتر می‌باشد. لذا ژئوپس آلباستر قابلیت انحلال‌پذیری بیشتری نسبت به ژئوپس پورفیریتیک دارد که علت آن نیز ریزدانه بودن سنگ و بالا بودن سطح در معرض تماس دانه‌ها با آب می‌باشد.

۶-۲. دوام‌پذیری

آزمون دوام‌پذیری براساس استاندارد ASTM D4644 و برای مشاهده تغییرات در ۱۵ سیکل انجام گردید. شاخص دوام شکستگی (Id) برای هر سیکل به عنوان درصدی از نسبت بین وزن خشک ابتدایی و نهایی سنگ بعد از سیکل‌های تر و خشک شدن محاسبه شد. جهت خشک کردن نمونه‌ها از دمای کمتر از 50°C درجه استفاده گردید زیرا که ژئوپس در تغییرات زیاد دما ناپایدار بوده و تغییر حالت می‌دهد. بعد از سیکل‌های مختلف آزمون دوام‌پذیری، تغییر در شکل نمونه‌ها مشاهده شد. با افزایش تعداد سیکل‌ها گردشگری در نمونه‌های ژئوپس آلباستر مشاهده شد. ژئوپس پورفیریتیک رفتار پایدارتری را از خود نشان داد اما با افزایش تعداد سیکل‌ها یک کاهش قابل توجه در مقدار و اندازه نمونه‌ها رخ داد. دوام شکستگی ژئوپس پورفیریتیک کمی بالاتر از آلباستر بوده و هنگامی که اندازه ذرات افزایش می‌یابد، این مقدار بیشتر می‌شود. نمودار شاخص دوام در مقابل تعداد سیکل‌ها در آب مقطر برای ژئوپس آلباستر و ژئوپس پورفیریتیک ترسیم گردید (شکل ۵). این نمودار نشان می‌دهد که دوام‌پذیری وابسته به بافت سنگ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل‌ها شاخص دوام شکستگی هر دو نمونه کاهش پیدا می‌کند. ژئوپس آلباستر به دلیل داشتن بافت ریزدانه، دارای سطح در معرض تماس بیشتری بوده و به این علت دوام‌پذیری کمتری نسبت به ژئوپس پورفیریتیک دارد.



شکل ۵. نمودار تعداد سیکل‌ها در برابر شاخص دوام برای نمونه‌های ژئوپس آلباستر و پورفیریتیک

۷. خصوصیات مکانیکی

در مقیاس کوچک مقاومت سنگ تابعی از پیوند بین ذرات آن است. در این مطالعه جهت مقایسه مقاومت نمونه‌ها از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، سختی و اجهشی چکش اشمیت، بار نقطه‌ای و آزمایش کشش برزیلی استفاده شده است.

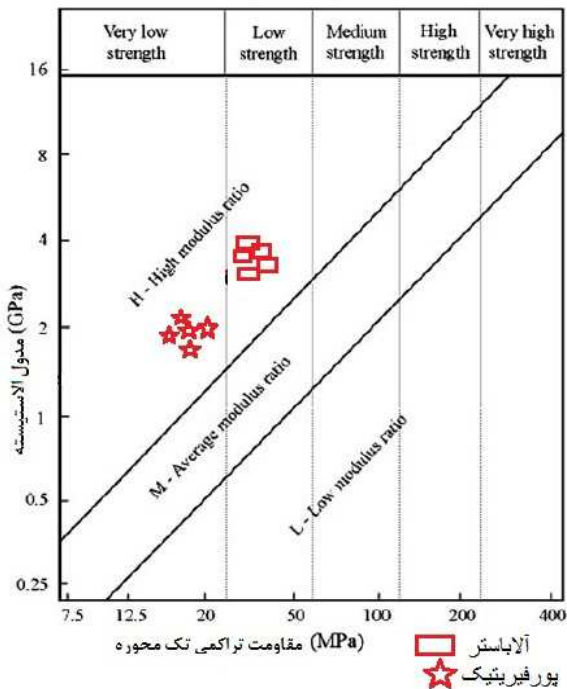
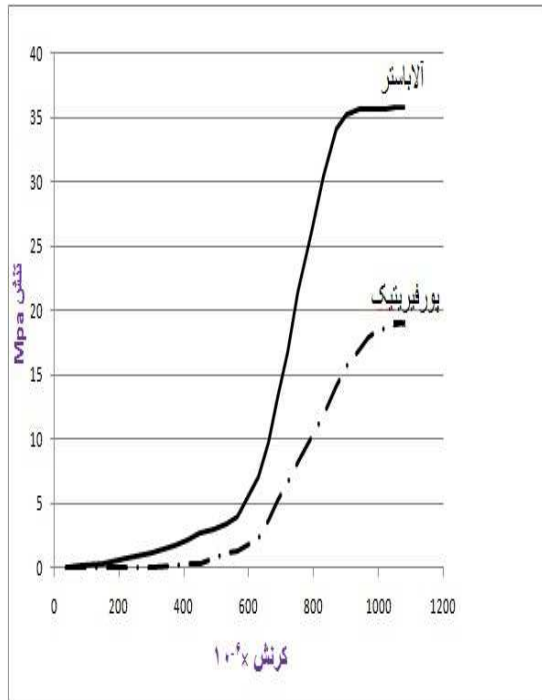
۷-۱. مقاومت تراکمی تک‌محوری، مدول الاستیسیته

هر دو آزمون بر اساس استاندارد (ISRM, 1981) و بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی با قطر ۵۲ میلی‌متر (NX) و نسبت طول به قطر ۲:۱ انجام شدند. کمترین مقدار مقاومت تراکمی تک‌محوره برای ژئیس پورفیریتیک درشت‌دانه و بیشترین مقدار مربوط به ژئیس آلاباستر بوده است (جدول ۱). مدول‌های ارتجاعی با استفاده از منحنی‌های تنش-تغییر شکل و در تنش معادل ۵۰٪ تنش حداکثر محاسبه شده‌اند، که نتایج آن همراه با نسبت مدولی در جدول ۱ آورده شده است. این دو سنگ در منحنی تنش کرنش شامل رفتار پلاستیک-الاستیک-پلاستیک و خزش (creep) می‌باشد. با توجه به مقادیر مقاومت تراکم تک‌محوری و نسبت مدولی و بر اساس طبقه‌بندی دیر و میلر (۱۹۶۶)، ژئیس آلاباستر (AG) به عنوان سنگ ضعیف با نسبت مدولی زیاد (رده DH) و ژئیس پورفیریتیک (PG) به عنوان سنگ بسیار ضعیف با نسبت مدولی زیاد (رده EH) طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۶). بالا بودن مقاومت ژئیس آلاباستر نسبت به ژئیس پورفیریتیک به علت وجود قفل‌شدگی در بین کانی‌های تشکیل‌دهنده آن می‌باشد.

۷-۲. سختی و اجهشی اشمیت

آزمون سختی و اجهشی اشمیت سریع، ارزان و غیرمخرب می‌باشد. ۲۰ آزمون جداگانه بر روی هر بلوک سنگی با وضعیت افقی چکش و بر اساس استاندارد (ISRM, 1981) و ASTM D2216 انجام شد و اعداد به ترتیب نزولی مرتب شدند. جهت به دست آوردن مقادیر نزدیک به واقعیت، مقادیر ۵۰٪ پایین کنار گذاشته شد و میانگین مقادیر ۵۰٪ بالا

منظور گردید. مقادیر بالاتر مربوط به ژئیس آلاباستر و مقادیر کمتر به ژئیس پورفیریتیک تعلق دارند (جدول ۱).



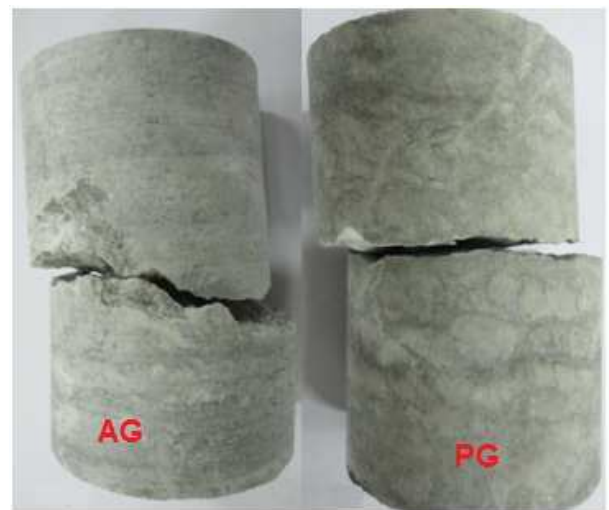
شکل ۶. الف) منحنی تنش-کرنش برای هر دو ژئیس

ب) طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های ژئیس

(Deere and Miller, 1966)

۳-۷. مقاومت بار نقطه‌ای

آزمون مقاومت بار نقطه‌ای یک آزمایش سریع و آسان برای به دست آوردن مقاومت تراکم تک‌محوری سنگ‌های سخت می‌باشد (Goodman, 1982). در این پژوهش آزمون بار نقطه‌ای براساس استاندارد (ISRM (1981 انجام شد. نمونه‌های مورد آزمایش قطری برابر با ۵۸/۵ میلی‌متر و طولی ۱/۵ برابر قطر داشتند. نتایج در جدول ۱ آورده شده است. تقریباً در تمام آزمایش‌های انجام شده صفحه شکست نمونه‌های آلاباستر دندانه‌دار و صفحه شکست نمونه‌های پورفیریتیک ناهموار بود (شکل ۷). تفاوت در وضعیت هندسی صفحات شکست دو نمونه ژئیس را می‌توان به قفل شدگی زیاد ذرات ژئیس آلاباستر نسبت به ژئیس ورفیریتیک نسبت داد.



شکل ۷. صفحه شکست دندانه‌دار برای ژئیس آلاباستر (AG) و ناهموار برای ژئیس پورفیریتیک (PG) در آزمون بار نقطه‌ای.

۴-۷. مقاومت کششی

اطلاع از رفتار سنگ‌ها در کشش و مقاومت کششی آنها، در تحلیل پایداری سقف و کف فضاهای زیرزمینی و بررسی پایداری سنگ‌ها در زون‌های کششی اهمیت بسیاری دارد. در این پژوهش مقاومت کششی نمونه‌ها به طور غیرمستقیم توسط آزمایش برزیلین و بر اساس استاندارد پیشنهادی (ISRM (1981 تعیین شد. بر اساس نتایج به دست آمده بالاترین مقادیر مقاومت کششی مربوط به ژئیس آلاباستر بوده و کمترین مقادیر برای ژئیس پورفیریتیک می‌باشد (جدول ۱). اثر قفل

شدگی بلورها وقتی که مقاومت تراکمی تک‌محوره محاسبه شد مهم بود، ولی این مورد برای وضعیت تنش کششی تأثیر بیشتری داشت.

جدول ۱. ویژگی‌های ژئوتکنیکی سنگ‌های ژئوسی سازند

گچساران

ویژگی	نمونه	حداقل	حداکثر	میانگین
σ_c (Mpa)	آلاباستر	۲۹	۳۶	۳۲/۵
	پورفیریتیک	۱۹/۷۵	۲۱/۲۶	۲۰/۲
σ_t (Mpa)	آلاباستر	۲/۸	۴/۲	۳/۷
	پورفیریتیک	۲/۳	۳/۲	۲/۸
E (Gpa)	آلاباستر	۲/۸	۳/۳	۳
	پورفیریتیک	۱/۷۴	۲/۵	۱/۹۴
E/ σ_u	آلاباستر	۸۹	۱۰۹	۹۸
	پورفیریتیک	۹۳	۱۲۱	۱۰۳
I_s (Mpa)	آلاباستر	۰/۸۲	۱/۲۱	۰/۹۸
	پورفیریتیک	۰/۴۷	۰/۷۵	۰/۵۸
عدد سختی	آلاباستر	۳۴	۴۳	۳۹
واجهی اشمت (N)	پورفیریتیک	۲۶	۳۶	۳۲

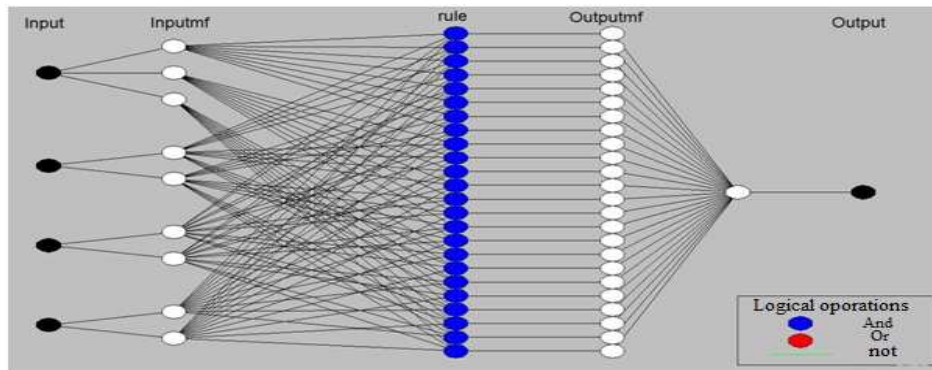
۸. سیستم ANFIS

در سیستم ANFIS برای مدل‌سازی داده‌ها از الگوریتم پس انتشار (Back propagation) و از قاعده Sugeno برای درون‌یابی و پیش‌بینی خروجی استفاده می‌شود (کیا، ۱۳۸۹). ابتدا ورودی و خروجی‌ها به سیستم معرفی شده و سیستم مرحله یادگیری را انجام می‌دهد. سپس برای معتبرسازی مدل، سیستم آزمایش می‌شود. در این پژوهش داده‌های ورودی شامل مقاومت تراکمی تک‌محوری، مقاومت کششی، شاخص دوام سیکل اول و تخلخل ۸۰ نمونه از ژئیس‌های سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه می‌باشند و پارامتر خروجی، نوع سنگ ژئیس است. هر مدل دارای یک ساختار می‌باشد که ورودی، خروجی، قواعد مورد استفاده و نرون‌ها را به ما نشان می‌دهد. ساختار مدل مورد استفاده در این پژوهش در زیر آورده شده، سمت چپ‌ترین گره مربوط به ورودی‌ها و سمت راست‌ترین گره مربوط به خروجی می‌باشد (شکل ۸). با توجه به این ساختار، در هر مرحله با وارد کردن دو تا از داده‌های

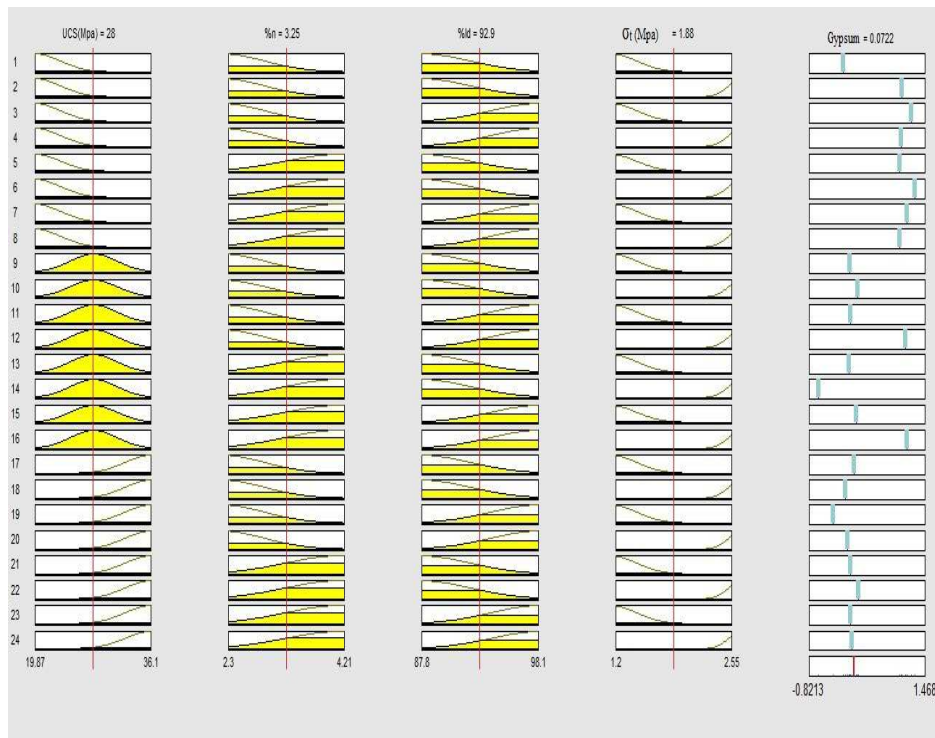
تعداد ستون‌ها به اندازه تعداد ورودی و خروجی‌هاست. هر سطر مربوط به یک قاعده بوده که شماره هر یک از قواعد در سمت چپ نمودارها نشان داده شده و هر ستون مربوط به یک متغیر است. چهار ستون زرد رنگ (سمت چپ) مربوط به فرض قواعد بوده و ستون آخر مربوط به نتیجه قواعد است. به عنوان مثال پنج نمودار ردیف اول نشان دهنده فرض و نتیجه مربوط به قاعده اول است. با تغییر محل خط قرمز در هر ستون (خط وسط هر ستون) می‌توان تغییرات مقدار ورودی‌ها و مقدار خروجی را در برنامه مشاهده کرد.

ورودی، خروجی سیستم که نوع ژئوسازند می‌باشد را به دست می‌آوریم.

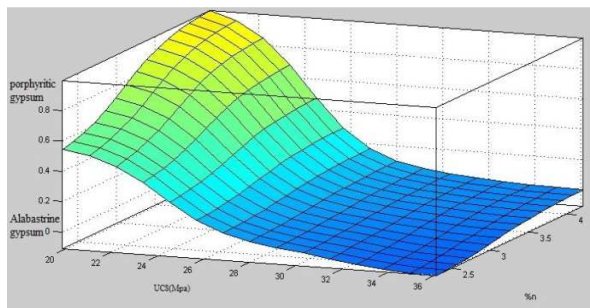
نمایشگر قواعد (Rule Viewer) یک محیط محاسبات تکنیکی MATLAB است که برای نمایش نمودارهای مربوط به استنتاج فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این ابزار برای تشخیص و نمایش قواعد و نحوه تأثیر توابع در نتیجه نهایی استفاده می‌شود (کیا، ۱۳۸۹). نمایشگر قواعد قابلیت تفسیر کل فرآیند استنتاج فازی را فراهم می‌آورد. نمایشگر قواعد مربوط به این پژوهش شامل ۲۴ سطر و ۵ ستون می‌باشد (شکل ۹) که



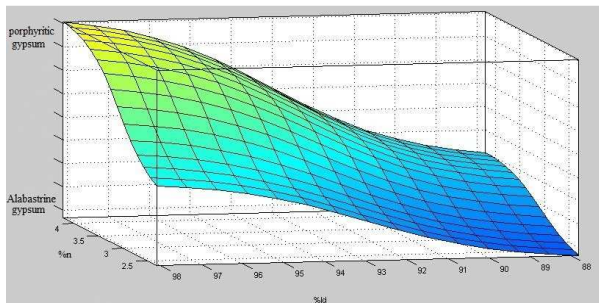
شکل ۸. نمایشی از ساختار مدل استفاده شده در این پژوهش



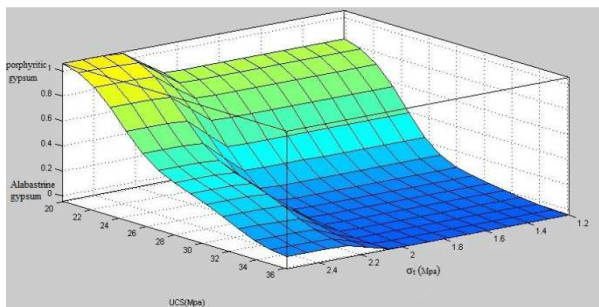
شکل ۹. تصویر مربوط به نمایشگر قواعد برای پژوهش حاضر



شکل ۱۰. شکل سه بعدی نمایشگر سطوح برای مقاومت تراکمی تک محوره و تخلخل نمونه‌ها در برابر نوع سنگ ژئیس



شکل ۱۱. شکل سه بعدی نمایشگر سطوح برای تخلخل و شاخص دوام نمونه‌ها در برابر نوع سنگ ژئیس



شکل ۱۲. شکل سه بعدی نمایشگر سطوح برای مقاومت تراکمی تک محوره و مقاومت کششی نمونه‌ها در برابر نوع سنگ ژئیس

۱۰. بحث

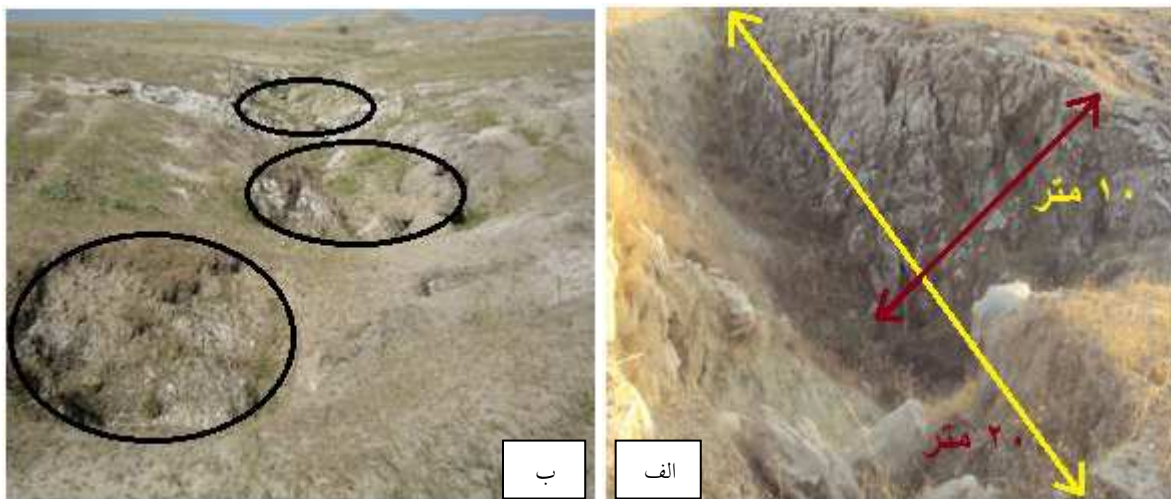
توسعه کارست در یک منطقه به پارامترهای زیادی همچون تکتونیک منطقه، شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های سنگ‌شناسی، ترکیب شیمیایی آب منطقه و... بستگی دارد. در یک منطقه که بسیاری از این پارامترها یکسان و مشابه است، عامل اصلی تفاوت در کارست، وجود تفاوت در خصوصیات سنگ‌شناسی می‌باشد. مطالعه عوامل ساختاری نشان داد که در محدوده شمالی شهر رامهرمز، عملکرد گسل معکوس رامهرمز در الگوی توزیع فروچاله‌ها نقش داشته و در مخزن سد جره،

۹. پیش‌بینی نوع سنگ ژئیس با استفاده از سیستم ANFIS

شناسایی نوع سنگ با داشتن اطلاعات اندکی از آن در بسیاری از موارد با ارزش می‌باشد. در این پژوهش سیستم ANFIS با استفاده از تکنیک‌های یادگیری الگوریتم پس انتشار (Backpropagation algorithm)، خصوصیات ژئیس آلاباستر و پورفیریتیک را یاد گرفته و در نهایت مدلی را در قالب نمایشگر سطوح (Surface Viewer) برای ما طراحی کرد که تنها با داشتن دو پارامتر از خصوصیات سنگ می‌توان نوع سنگ را تعیین کرد. نمایشگر سطوح برای نمایش وابستگی پارامتر خروجی به هر یک از ورودی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نمایشگر یک نمودار سه بعدی شبکه‌بندی شده است که پارامترهای ورودی را به پارامتر خروجی انگاشت می‌کند. ANFIS با استفاده از قواعد و تکنیک‌های خود، به درون‌یابی پارامترهای معرفی شده پرداخته و پیش‌بینی خود از نتایج را در قالب این نمایشگرها ارائه می‌کند. پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش شامل مقاومت تراکمی تک محوره، مقاومت کششی، شاخص دوام سیکل اول و تخلخل می‌باشد که با استفاده از ANFIS رابطه بین این پارامترها پیش‌بینی و نوع ژئیس معین گردید. مقادیر آستانه این مدل برای مقاومت تراکمی تک محوره ۲۲ مگاپاسکال، درصد تخلخل ۳/۵٪، شاخص دوام سیکل اول ۹۶٪ و مقاومت کششی ۲/۴ مگاپاسکال تعریف شده است. بر این اساس سنگ‌های ژئیزی با درصد تخلخل بیش از ۳/۵٪ و مقاومت تراکمی تک محوره کمتر از ۲۲ مگاپاسکال از نوع ژئیس پورفیریتیک بوده و در مقابل سنگ به سمت ژئیس آلاباستر میل می‌کنند (شکل ۱۰). سنگ‌هایی که شاخص دوام سیکل اول آنها بیش از ۹۶٪ بوده و درصد تخلخل آنها بیش از ۳/۵٪ باشد از نوع ژئیس پورفیریتیک و خلاف آن از نوع ژئیس آلاباستر می‌باشد (شکل ۱۱). از طرفی سنگی با مقاومت کششی کمتر از ۲/۴ مگاپاسکال و مقاومت تراکمی بیش از ۳۲ مگاپاسکال از نوع ژئیس آلاباستر می‌باشد (شکل ۱۲).

منطقه باشد. از جمله پدیده‌های کارستی قابل مشاهده در منطقه فروچاله‌ها، غارها، طاق‌های طبیعی، کارنها و برج‌های انحلالی می‌باشد.

انحلال‌پذیری بیشتر (با توجه به نتایج آزمایش انحلال‌پذیری) و رفتار شکننده (بر اساس نتایج آزمایش تراکم تک‌محوره) ژئوس آلباستر نسبت به ژئوس پورفیریتیک سبب شده که ژئوس آلباستر دارای درزه و شکستگی فراوانی بوده و سریع‌تر حل شود از این رو تعداد فروچاله‌های انحلالی و چاه‌های کارستی تشکیل شده در ژئوس آلباستر فراوان‌تر می‌باشد. در مخزن سد جره تعداد زیادی از این فروچاله‌ها (شکل ۱۳-الف) و چاه‌ها (شکل ۱۳-ب) را می‌توان دید که ممکن است بعد از آبیگری سد مسئله‌ساز باشند.

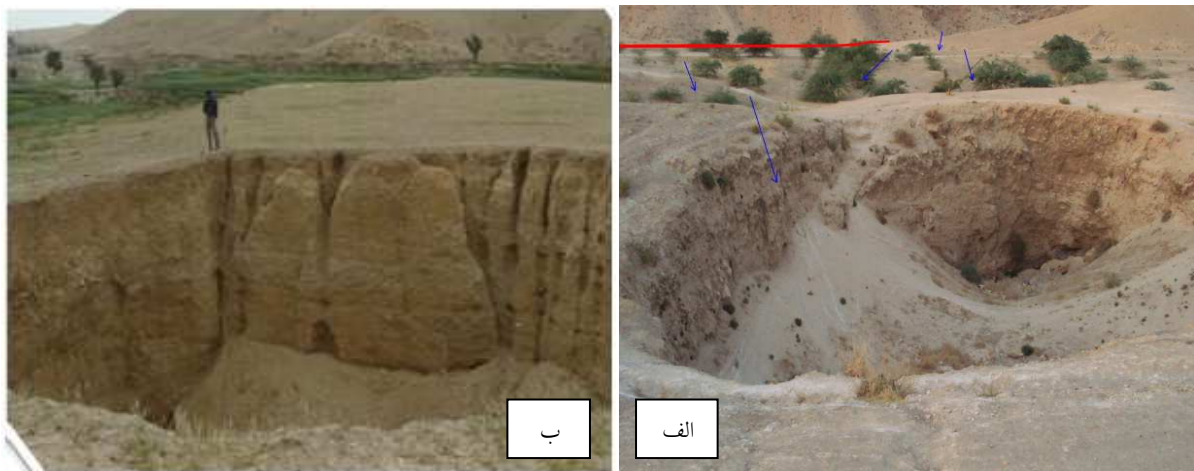


شکل ۱۳. نمونه‌ای از یک فروچاله انحلالی (الف)، و تصویری از چاه‌های کارستی در ژئوس آلباستر (ب) سازند گچساران، مخزن سد جره

امکان وجود نداشته است. بر اساس نتایج آزمایش تراکمی تک‌محوره، ژئوس آلباستر رفتار شکننده‌تری دارد اما به علت قفل و بست بین دانه‌ها دارای مقاومت بالایی است از این رو تحت بارهای وارده مقاوم بوده و دچار ریزش نمی‌شود. در منطقه مورد مطالعه فروچاله‌های فرونشستی بیشتر در اثر نشست رسوبات عهد حاضر در بالای فروچاله‌های قدیمی تشکیل شده در ژئوس پورفیروتیک و غالباً در پهنه‌های هموار ایجاد شده‌اند (شکل ۱۴-ب). این فروچاله‌ها اغلب دهانه بیضی تا دایره‌ای شکل و دیواره قائم دارند (شکل ۱۵).

عملکرد گسل‌های معکوس دشت شیر و دشت انار باعث توزیع فروچاله‌ها شده‌اند. اما نوع و اندازه فروچاله‌ها در این دو منطقه با هم تفاوت دارند. همچنین مطالعات نشان داد که درزه‌های موجود در هر دو منطقه از نوع کششی بوده و در محل اشکال کارستی نمایان هستند (محمدیان و قبادی، ۱۳۸۹). علیرغم عملکرد تقریباً یکسان عوامل ساختاری در این دو منطقه و یکسان بودن عوامل آب و هوایی، شاهد تفاوت در کارستی شدن ژئوس‌های سازند گچساران مشاهده می‌شود. لیتولوژی‌های مختلف به دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف، رفتار متفاوتی در برابر کارست‌شدگی از خود نشان می‌دهند. خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی ژئوس‌ها، می‌تواند از عوامل اصلی تفاوت در کارست‌شدگی

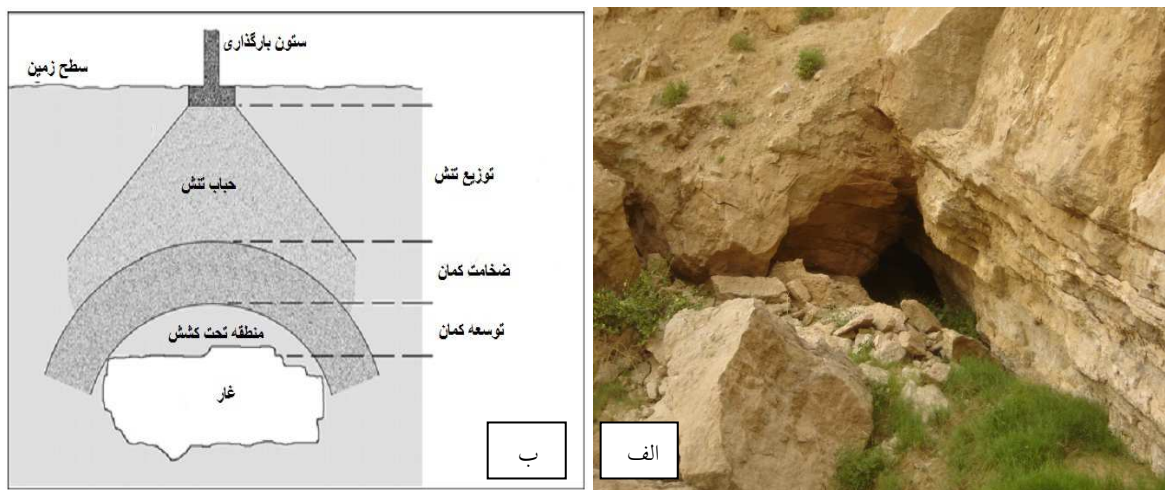
در منطقه مورد مطالعه فروچاله‌های فروریزی و فرونشستی نیز گسترش دارند اما بیشتر در ژئوس‌های پورفیریتیک تشکیل شده‌اند. از آنجایی که مقاومت تراکمی ژئوس پورفیریتیک کمتر از ژئوس آلباستر است این سنگ تحمل بار وارده از لایه‌های فوقانی را نداشته و دچار ریزش می‌شود و فروچاله فروریزی تشکیل می‌گردد (شکل ۱۴-الف). آزمایش مقاومت تراکمی تک‌محوره بر روی نمونه بکر سنگ انجام شد. به علت وجود درزه و شکستگی در توده سنگ، مقاومت توده سنگ با مقاومت نمونه بکر متفاوت است. به دست آوردن مقاومت توده سنگ نیازمند انجام آزمایش‌های برجاست که در پژوهش حاضر این



شکل ۱۴. نمونه‌ای از فروچاله فروریزی (الف) و فروچاله فرونشستی (ب) در سازند گچساران



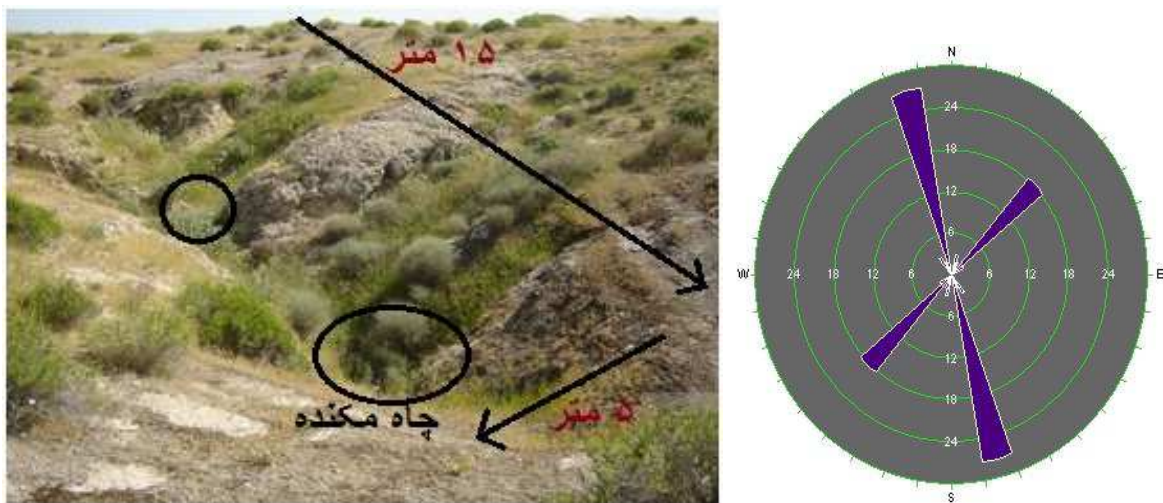
شکل ۱۵. تصویری از فروچاله‌های تشکیل شده با دیواره قائم در ژئوسپیس‌های سازند گچساران



شکل ۱۶. تصویر غار تشکیل شده در ژئوسپیس آلاباستر گچساران (الف) و مکانیسم تشکیل غار (ب - Tony et al., 2005)

دارند که نمودار گلسرخی آنها تهیه گردید (شکل ۱۷- الف). در این محل دو سیستم درزه با میانگین روند N45E و N15W قابل شناسایی بوده و درزه‌های با روند N45E به عنوان درزه‌های کششی محسوب می‌شوند. این شکستگی‌ها راهی برای نفوذ آب و شروع انحلال می‌باشند. در اثر پیشرفت انحلال در این درزه‌ها به طرف عمق، دولین‌های انحلالی ایجاد شده‌اند. در منطقه مورد مطالعه بعضی از دولین‌ها با هم ادغام شده و ویژگی‌های یک کور دره (blind valley) را به خود گرفتند (شکل ۱۷- ب). کور دره‌ها، دره‌های خشک و یا دارای جریان کمی هستند که به طور ناگهانی به داخل غار یا چاهکی ختم می‌شوند (Kenneth, 2008). عمق این دولین‌های به هم پیوسته در منطقه به ۲۰ متر می‌رسد. کف این دولین‌ها معمولاً توسط خاک پوشیده شده و گیاهان در آنها رشد کرده‌اند. در اکثر موارد در کف دولین‌ها، چاه‌های مکنده (swallow holes) وجود دارد.

عملکرد سقف غار را می‌توان بصورت یک تیر در نظر گرفت که وقتی تیر تحت فشار قرار می‌گیرد، در قسمت کمانی دچار کشش می‌شود (شکل ۱۶- ب) (Tony et al., 2005). اگر سنگ دارای مقاومت کششی بالایی باشد غار در آن باقی می‌ماند و سقف آن ریزش نمی‌کند. آزمون برزیلین شبیه‌سازی حالتی است که جسم تحت یک بار خطی به کشش افتاده و دچار گسیختگی شود. بر اساس نتایج آزمایش برزیلین، ژئوس آلاباستر نسبت به ژئوس پورفیریتیک دارای مقاومت کششی بالاتری بوده لذا غارها در آن نمایان‌تر می‌باشند (شکل ۱۶- الف). غارها در محل درزه و شکستگی‌ها تمرکز بیشتری دارند که رفتار شکننده آلاباستر و تشکیل شکستگی در آنها در ایجاد غار نیز می‌تواند اثرگذار باشد. چنانچه بیان شد ژئوس آلاباستر دارای رفتار شکننده‌تری می‌باشد. در مخزن سد جره و در محل فروچاله‌های انحلالی سیستم‌های شکستگی در ژئوس‌های آلاباستر توسعه زیادی



شکل ۱۷. دیاگرام گلسرخی شکستگی‌ها (الف) و نمایی از دولین انحلالی و چاه‌های مکنده در مخزن سد جره قبل از آبیگری سد (ب)

در ژئوس آلاباستر دارای ابعاد کوچکتری بوده و نسبت به ژئوس پورفیریتیک زودتر از بین می‌روند که علت آن هم دوام‌پذیری کمتر ژئوس‌های آلاباستر می‌باشد.

ژئوس‌ها به علت دوام‌پذیری پایین به راحتی توسط آب باران فرسایش یافته و کارن‌ها تشکیل می‌شوند اما چون ژئوس‌ها مقاومت کمی دارند و نرم می‌باشند به راحتی شسته می‌شوند. لذا کارن‌های تشکیل شده در آنها عمق زیادی ندارند ولی فراوان می‌باشند (شکل ۱۸). در این بین کارن‌های تشکیل شده



شکل ۱۸. تصویری از کارن ایجاد شده در ژئیس پورفیروتیک (الف) و ژئیس آلاباستر (ب)



شکل ۱۹. برج انحلالی در ژئیس پورفیروتیک گچساران

۱۱. نتیجه‌گیری

با وجود یکسان بودن عملکرد عوامل ساختاری (گسل‌ها و درزه‌ها)، آب‌شناسی و آب و هوایی در منطقه مورد مطالعه، توسعه پدیده‌های مورفولوژیکی کارست در ژئیس‌های منطقه با هم متفاوت هستند. این تفاوت مربوط به خصوصیات شیمیایی و مکانیکی ژئیس‌ها است که می‌تواند عامل اصلی اختلاف در توسعه کارست باشد. بر اساس مطالعات سنگ‌شناسی نمونه‌های ژئیس به لحاظ بافتی در دو گروه ریزدانه (آلاباستر) و درشت‌دانه (پورفیریتیک) قرار گرفته‌اند که به دلیل دارا بودن ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی متفاوت، رفتار آنها در برابر کارستی شدن نیز متفاوت بود. ژئیس

مخروط کارستی و برج‌های انحلالی از مناظر کارستی بوده که در مدت زمان طولانی تشکیل شده و بلوغ کارست را در یک منطقه نشان می‌دهند (Tony et al., 2005). برج‌های انحلالی از جمله پدیده‌های کارستی بوده که در آب و هوای گرم تشکیل می‌شوند. وجود خاک در بالای سنگ انحلال‌پذیر برای تشکیل این پدیده‌ها لازم می‌باشد. این خاک‌ها نفوذپذیری بالایی داشته، آب از درون این خاک‌ها نفوذ کرده تا اینکه به سنگ میزبان (Rockhead) می‌رسد با انحلال سنگ توسط آب، زمینه ایجاد شکاف‌های باز و برج‌ها فراهم می‌شود (Francisco et al., 2008). در منطقه مورد مطالعه چنین پدیده‌هایی را در ژئیس‌های گچساران و در کنار رودخانه و آبراهه‌ها می‌توان مشاهده کرد که حداکثر دارای یک متر ارتفاع می‌باشند خاک موجود در بالای این سنگ‌ها، آبرفت‌های دارای نفوذپذیری بالا می‌باشند (شکل ۱۹).

لایه‌های ژئیس آلاباستر به علت دوام‌پذیری کمتر، در کوتاه مدت دچار فرسایش می‌شوند و اینگونه اشکال کارستی در آنها کمتر یافت می‌شوند. هرچند که برج‌های انحلالی تشکیل شده در ژئیس پورفیریتیک در مقایسه با برج‌های انحلالی تشکیل شده در آهک نیز کوچک مقیاس می‌باشند.

فراوان‌تر هستند. بر اساس نتایج آزمایش دوام شکستگی در ۱۵ سیکل، ژئوس پورفیریتیک دارای دوام پذیری بالاتری است. کارنها و برج‌های انحلالی که پایداری آنها به دوام سنگ بستگی دارد در ژئوس پورفیروتیک توسعه بیشتری داشته و نمایان‌تر می‌باشند. با استفاده از مدل ANFIS ارائه شده در این پژوهش می‌توان نوع آلاباستر و یا پورفیریتیک بودن ژئوس را تعیین و سپس در مورد پدیده‌های کارستی رایج در آنها اظهار نظر کرد.

آلاباستر دارای قابلیت انحلال ۲/۶ گرم بر لیتر و ژئوس پورفیریتیک دارای قابلیت انحلال ۲/۵۷ گرم بر لیتر می‌باشد. هر دو نوع ژئوس تحت بارهای وارده رفتار پلاستیک-الاستیک-پلاستیک و خزش از خود نشان می‌دهند اما ژئوس آلاباستر شکننده‌تر رفتار می‌کند. قابلیت انحلال بالاتر و رفتار شکننده‌تر ژئوس آلاباستر سبب شده که فروچاله‌های انحلالی در آنها گسترش بیشتری داشته باشد. ژئوس پورفیریتیک مقاومت کمتری دارد و فروچاله‌های فروریزی و فرونشستی در آن

منابع

- باغدادرخت، ز.، ۱۳۸۴. مطالعه انحلال‌پذیری سازندهای کارستیک در ساختگاه سد تنگ شمیران ایلام. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بو علی سینا همدان.
- پرهیزگار، م.، ر.، ۱۳۸۶. بررسی مخاطرات زمین‌شناسی در محدوده سد تنگ سرخ شیراز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ترابی، م.، ۱۳۸۹. مطالعه انحلال‌پذیری ژئوسیت‌های سازند گچساران در محل سد چم‌شیر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- قبادی، م.، ج. ۱۳۸۸. زمین‌شناسی مهندسی کارست. انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، همدان، چاپ دوم.
- کیا، س. م.، ۱۳۸۹. محاسبات نرم در MATLAB. انتشارات کیان رایانه سبز
- محمدیان، م.، قبادی، م.، ح.، محسنی، ح.، کرمی، ر.، ۱۳۸۹. مطالعه لیتولوژی سازند گچساران و ارتباط آن با ژئومورفولوژی کارست در منطقه رامهرمز-خوزستان. چهاردهمین همایش انجمن زمین‌شناسی-دانشگاه ارومیه.
- محمدیان، م.، قبادی، م.، ح.، ۱۳۸۹. فروچاله‌های کارستی و عوامل توسعه آنها در منطقه رامهرمز-خوزستان. بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- موسوی، س. س.، ۱۳۸۵. مطالعه دوام سنگ‌ها و انحلال‌پذیری ژئوس به منظور آب‌بندی محل سد خیرآباد در شرق بهبهان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- Anonymous, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, part 1 rock and soil materials. *Bulletin of International Association of Engineering Geology and the Environment*, 19:355–371.
- Bernardas, P., Anthony H., Jurga A., 1999. Planning for gypsum geohazards in Lithuania and England. *Engineering Geology*, 52: 93–103.
- Brown, E.T. 1981. Rock characterization, testing and monitoring (ISRM suggested methods). Pergamon, London.
- Cooper, A.H., 2008. Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazards in evaporate karst areas. *Environmental Geology*, 53:1007-1022.
- Deere, D.U., Miller, R.P., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. Technical Report No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico, pp 308.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1962. Rock forming minerals, vol 5, Non-silicates. Longman, London.
- Derek, F., Paul, W., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology, wiley Publications.
- Franklin, J.A., Chandra, A. 1972. The slake durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9:325–341.

- Francisco, G., Johnson, K., Anthony H., 2008. Evaporite Karst processes, landforms, and environmental problems. *Environmental Geology*, 53: 935-936.
- Goodman, R.E., 1982. *Introduction to rock mechanics*. Wiley, New York, 478p.
- Kenneth, S.J., 2008. Gypsum-karst problems in constructing dams in USA. *Environmental Geology*, 53: 945-950.
- Klimchouk, A.B., Aksem, S.D., 2005. Hydrochemistry and solution rates in gypsum karst: case study from the western Ukraine, *Environmental Geology*, 48: 307-319.
- Mateo, G., Francisco, G., 1998. Geomorphology of the Tertiary gypsum formation in the Ebro Depression (Spain), *Geodema*, 87: 1-29.
- Romenov, D.K., Gabrovsek, F. Debrodt, W., 2003. Dam site in soluble rocks: a model of increasing leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam. *Engineering Geology*, 70: 17-35.
- Tony, W., Fred, B., Martin, C., 2005. *Sinkholes and Subsidence*, springer publications.
- Waele, J., Plan, L., Audra, P.H., 2009. Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction. *Geomorphology*, 106: 1-8.
- Yilmaz, I., Karakan., E., 2005. Slaking durability and its effect on the doline formation in the gypsum, *Environ Geol* 47: 1010-1016.