

# مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی سازند گچساران در منطقه رامهرمز (مخزن سد جره)، شرق

## خوزستان

محمدحسین قبادی

استاد گروه زمین شناسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

محمد محمدیان

دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

حسن محسنی

استادیار گروه زمین شناسی دانشگاه بوعلی سینا همدان

رامین کرمی

دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ پذیرش: ۹۲/۸/۱۵

تاریخ دریافت: ۹۰/۷/۱۱

amirghobadi@yahoo.com

## چکیده

واحدهای سنگی مختلف در سازندها با ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی متفاوت، رفتار متفاوتی از خود نشان داده و مطالعه دقیق آنها ضروری می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی خصوصیات زمین شناسی مهندسی سازند گچساران، ارزیابی پتانسیل انحلال‌پذیری ژئوپس و ارزیابی پتانسیل تورم مارن‌ها در منطقه رامهرمز، به‌ویژه مخزن سد جره است. بر اساس مطالعات سنگ‌شناسی این سازند شامل واحدهای ژئوپس، انواع مارن و آهک ماسه‌ای رس‌دار می‌باشد. ژئوپس‌ها بر اساس بافت به دو نوع ژئوپس آلاباستر (ریزدانه) و ژئوپس پورفیریتیک (درشت دانه) و مارن‌ها بر اساس ترکیب کانی‌شناسی به ۴ واحد تقسیم شدند. نتایج نشان داد که بافت سنگ، به‌ویژه شکل و اندازه دانه‌ها، یک عامل مهم کنترل‌کننده خصوصیات مکانیکی ژئوپس‌های مذکور می‌باشد. از طرفی درصد کانی‌های رسی، کربنات کلسیم و ژئوپس عامل کنترل‌کننده ویژگی‌های مارن‌ها می‌باشد. بر اساس رده‌بندی مهندسی سنگ بکر، ژئوپس آلاباستر در رده DH، ژئوپس پورفیریتیک، مارن‌ها و آهک ماسه‌ای در رده EH قرار گرفتند. بر اساس نتایج آزمایش انحلال، ژئوپس آلاباستر به علت داشتن بافت ریز دانه و داشتن سطح تماس بیشتر با محلول دارای قابلیت انحلال بیشتری نسبت به ژئوپس پورفیریتیک می‌باشد. همچنین با افزایش اسیدیته محلول، پتانسیل انحلال ژئوپس افزایش یافته که در  $pH=6/5-7$  برای ژئوپس آلاباستر و پورفیریتیک به ترتیب برابر  $2/72 g/l$  و  $2/63 g/l$  می‌باشد. نتایج آزمایش تورم مارن‌ها نشان داد که بیشترین مقدار کرنش تورمی در آب مقطر برابر  $23/64\%$  بوده و فشار تورمی آن برابر با  $Kpa$   $315/7$  می‌باشد. همچنین مشخص شد که افزایش درصد ژئوپس در نمونه‌های مارن و افزایش غلظت ژئوپس محلول در آب نقش مهمی در کاهش درصد کرنش تورمی و فشار تورمی مارن‌ها دارد. در این پژوهش برای پیش‌بینی مقاومت واحدهای سنگی، از سیستم ANFIS به عنوان ترکیبی از منطق فازی با شبکه‌های عصبی در قالب روش‌های neuro-fuzzy استفاده شد که ورودی‌های آن شامل مقاومت کششی، درصد تخلخل و شاخص دوام سیکل اول برای ۱۰۵ نمونه آزمایشگاهی می‌باشد. نتایج این مدل نشان داد که بیشترین مقاومت در بین واحدهای سنگی، مربوط به ژئوپس آلاباستر است.

**کلمات کلیدی:** خصوصیات زمین شناسی مهندسی، سازند گچساران، انحلال‌پذیری، تورم، سیستم ANFIS، مخزن سد جره، رامهرمز

## مقدمه

داشته و پروژه‌هایی مثل مخزن سد جره، سازه پارک کوهستان، دیوارهای حایل پارک کوهستان، جاده رامهرمز به شهرهای باغملک، ایذه، مسجد سلیمان، هفتکل و شوشتر، دیوارهای حایل مسیر جاده، دکل‌های فشار قوی انتقال برق رامهرمز، خط لوله انتقال نفت رامهرمز-اصفهان و غیره بر روی سازند گچساران احداث شده‌اند. عدم توجه به مسائل مهندسی سازند گچساران، ممکن است که مشکلاتی را برای این پروژه‌ها ایجاد کند. هدف از انجام این پژوهش، مطالعه خصوصیات مهندسی سنگ‌های سازند گچساران، مطالعه انحلال‌پذیری ژئوپس‌ها، مطالعه تورم مارن‌ها و ارائه یک مدل کامپیوتری برای سازند گچساران، جهت تعیین مقاومت مکانیکی سنگ‌ها با استفاده از دیگر پارامترها است. در این پژوهش سعی شده تا با انجام آزمایش، خصوصیات مهندسی سازند گچساران به‌ویژه در مخزن سد جره، بصورت عددی بیان گردد تا در پروژه‌های در حال اجرا بر روی این سازند، بکار گرفته شده و جلوی ایجاد مشکلات بیشتر را بگیرد.

طراحی و اجرای موفق سازه‌های عمرانی در گرو شناخت ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، ترکیب کانی شناسی و آگاهی از رفتار مهندسی سنگ‌ها در محل پروژه است که در مواردی مانند سد سازی، تونلبری و جاده سازی این موضوع از اهمیت بیشتری برخوردار است. سازند گچساران به عنوان یکی از سازندهای تبخیری ناحیه زاگرس در مناطق جنوبی و جنوب‌غربی کشور گسترش زیادی دارد. بسیاری از راه‌های ارتباطی در این مناطق از این سازند عبور می‌کنند. سدهای زیادی در این مناطق احداث شده‌اند که مخزن آنها روی این سازند واقع است (سدهای مارون، سلمان فارسی، تنگ سرخ، گتوند، کارون ۳، کرخه، چم شیر، تنگ شمیران). تمام و یا قسمتی از تونل‌های بزرگراه خرم‌آباد-پل زال هم در سازند گچساران حفاری شده‌اند. همواره اجرای پروژه‌های عمرانی و مهندسی بر روی این سازند با مشکلاتی همراه می‌باشد. انحلال ژئوپس‌ها، متورم شدن مارن‌ها و پایین بودن مقاومت مکانیکی سنگ‌های سازند گچساران، از جمله این مشکلات مهندسی است که می‌توانند برای پروژه‌های مهندسی، هزینه‌ساز باشند. در منطقه رامهرمز، سازند گچساران گسترش زیادی

ساختگاه سد خیرآباد بهبهان (موسوی، ۱۳۸۵)، تعیین انحلال ژئوسپیس‌های سازند گچساران در سد تنگ سرخ (پرهیزکار، ۱۳۸۶) و مطالعه انحلال پذیری ژئوسپیس‌های سازند گچساران در محل سد چم شیر (ترابی، ۱۳۸۹) نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده است. نتیجه این مطالعات، لزوم توجه به میزان انحلال ژئوسپیس و احتمال فرار آب از طریق این سنگ را مشخص‌تر کرد. ساخت سازه‌های عمرانی در هر منطقه نیازمند پی مناسب است. یافتن پی مناسب از میان چند لیتولوژی با رفتارهای مکانیکی متفاوت، مثل لیتولوژی‌های سازند گچساران به مطالعه زیاده‌تری نیاز دارد. در این تحقیق جهت پیش بینی مقاومت واحدهای سنگی سازند گچساران و یافتن مقاومت حداکثر از ترکیب شبکه عصبی و منطق فازی در قالب سیستم neuro-fuzzy و با عنوان ANFIS استفاده شده است. ANFIS برای حل بسیاری از مسائل ژئوتکنیکی مثل مدل کردن زاویه اصطکاک خاک، آنالیز پایداری تونل، تخمین عمق جوشش در اطراف گروه شمع‌ها، پیش بینی مقاومت تراکمی تک محوره تخمین پتانسیل تورم و تخمین نفوذپذیری خاک بکار گرفته شد که بسیار مفید واقع شد (Cabalar et al., 2012).

### زمین شناسی

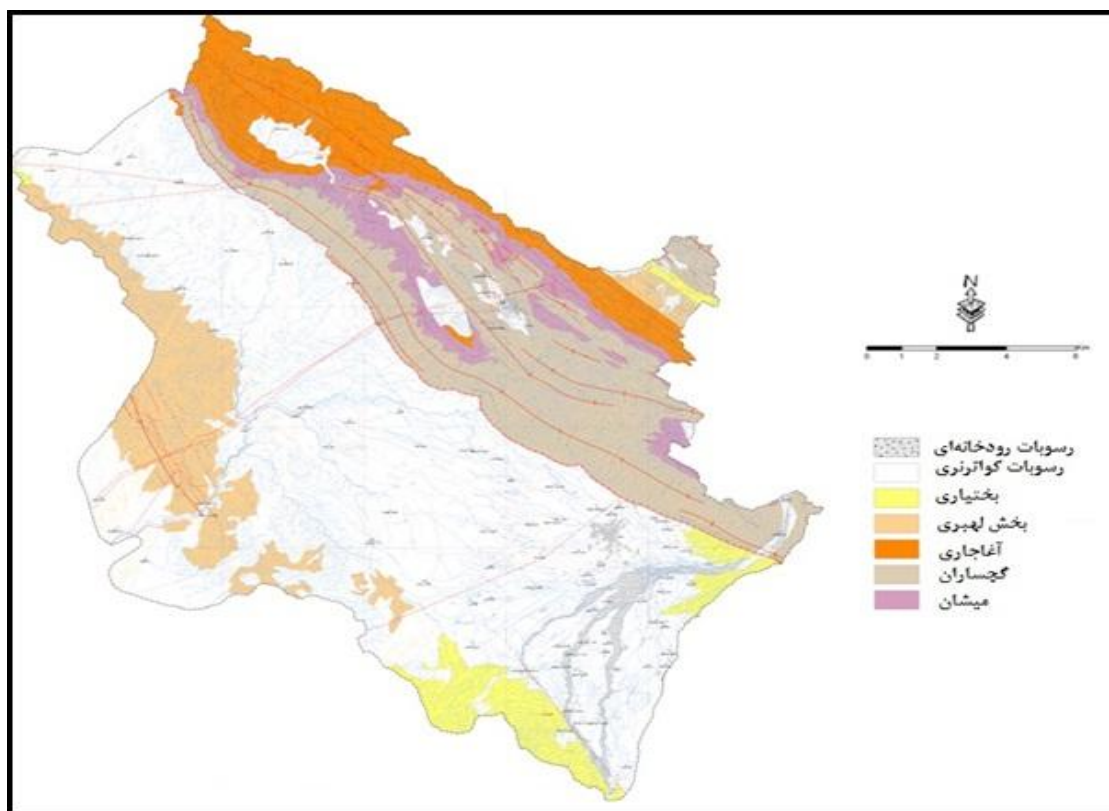
در منطقه رامهرمز سازندهای عهد حاضر رخمون دارند که در این بین سازند گچساران بیشترین گسترش را دارد (شکل ۱). سازند گچساران که نام آن از میدان نفتی گچساران گرفته شده از ۷ بخش (ممبر) تشکیل شده که بخش ۱ بصورت همشیب در بالای مخزن نفتی آهک آسماری قرار گرفته و مهمترین بخش می‌باشد که پوش سنگ نامیده می‌شود. بخش ۷ بصورت همشیب زیر سازند میشان قرار گرفته و شامل لایه‌های ژئوسپیس، مارن‌های سبز و قرمز، آهک ماسه ای و نمک می باشد (James and Wynd, 1965). در ناحیه مورد مطالعه سازند گچساران در دو بخش رخمون دارد: یک بخش از جنوب شرق تا شمال غرب شهر رامهرمز با طول حدود ۱۰۰ و با پهنای ۴ تا ۱۱ کیلومتر که در نتیجه عملکرد گسل رامهرمز در مجاورت دشت رامهرمز رخمون پیدا کرده است (محمدیان و همکاران، ۱۳۸۹). بخش دیگر که تقریباً به موازات بخش قبلی است، در اثر عملکرد گسل جره رخمون پیدا کرده (شکل ۲) و در حدود دو سوم از مخزن سد جره در شمال شهر رامهرمز را در بر می‌گیرد (برجسته و برقی، ۱۳۸۸). بارزترین مشخصه سازند گچساران چرخه‌ای بودن نهشته‌های آن می‌باشد. این چرخه به ترتیب شامل ردیفی از مارن‌های رنگی، کربنات‌ها، انیدریت، ژئوسپیس و نمک‌ها می‌باشند. سازند گچساران در منطقه رامهرمز شامل تناوبی از لایه‌های ژئوسپیس، انواع مارن و آهک ماسه‌ای است (شکل ۳). ژئوسپیس‌ها بیشترین ضخامت و گسترش را در منطقه دارند اما رخمون‌های آهک بصورت لایه‌های نازک گسترش کمی دارند. مارن‌های سازند گچساران بعد از ژئوسپیس بیشترین پراکندگی را دارد و به رنگ‌های مختلفی دیده می‌شوند. مارن‌های خاکستری تا سبز و مارن‌های قرمز دارای گسترش بیشتری می‌باشند. با توجه به فرسایش ژئوسپیس و مارن‌ها سازند گچساران دارای مورفولوژی تپه ماهوری است. وجود چین‌های بسیار کوچک و متعدد از ویژگی‌های این سازند محسوب می‌گردد. در این منطقه، نمک به دلیل انحلال سریع در رخمون‌ها بسیار کم دیده می‌شود. در نتیجه انحلال نمک، آب‌های خارج شده از این سازند دارای شوری بالایی بوده و سبب ایجاد نمک‌زایی در منطقه شده‌اند. بر اساس مطالعات صحرایی، سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه همراه با سازند میشان رخمون دارد. از این رو، سازند گچساران در منطقه رامهرمز در مقایسه با مقطع تیپ، معادل بخش هفتم سازند گچساران است.

مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی واحدهای مارنی ایران مورد توجه پژوهشگران داخلی و خارجی بوده است. خامه‌چیان، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مارنی-رسی از دو سازند آغاچاری، میشان و لایه‌های مارن تبریز را مورد مطالعه قرار داد و نتیجه گرفت که درصد رس و کربنات و نوع رس از عوامل اصلی کنترل کننده ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی این سنگ‌ها می‌باشد. به نحوی که با افزایش درصد کربنات در سنگ‌های مارنی-رسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنها بهبود می‌یابد و حساسیت سنگ در برابر آب کاهش پیدا می‌کند (خامه‌چیان، ۱۳۶۹).

مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگ‌های مارنی (سازند تلخ) ساختگاه سد دوستی نشان داد که بسیاری از خواص فیزیکی و مکانیکی مارن‌ها تابع ترکیب شیمیایی آنها بوده و این سنگ‌ها از نظر رفتار مکانیکی در ضعیف ترین گروه سنگی قرار می‌گیرند (رضایی، ۱۳۷۹). نتایج مطالعه دوام سنگ‌های مارنی و انحلال پذیری ژئوسپیس‌های سازند آغاچاری در محل سد خیرآباد نشان داد که بین شاخص دوام و ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌ها ارتباط مشخصی وجود دارد بگونه‌ای که سنگ‌های دارای درصد کربنات بیشتر از شاخص دوام و شکستگی بالاتری برخوردار می‌باشند. همچنین با افزایش مقدار رطوبت، شاخص خمیری و فشار تورم، دوام به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کند (موسوی، ۱۳۸۵).

مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی سازند قم در شمال و شمال شرق همدان نشان داد که ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها متأثر از ترکیب کانی شناسی، اندازه دانه‌ها، ساخت و بافت می‌باشد. همچنین مشخص شد که درصد کربنات و کانی رسی موجود در مارن‌ها تأثیر بسزایی در رفتار مهندسی آنها دارد (کاپله‌ی، ۱۳۸۷). عمرانی و همکاران، ویژگی‌های مهندسی مارن‌های نئوزن در جنوب شرقی اسپانیا را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که میزان کربنات کلسیم با مقاومت برشی ارتباط مستقیم داشته و با شاخص واگرایی و رفتار تورمی رابطه عکس دارد (Amrani et al., 1998). صدر کریمی و همکاران ویژگی‌های ژئوتکنیکی مارن‌های شهر تبریز را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که حد روانی و حد خمیری مارن‌ها به ترتیب بین ۳۲ تا ۱۰۰ و ۷ تا ۶۰ در تغییر است. همچنین درصد تورم و فشار تورمی به ترتیب حدود ۱۳/۶٪ و ۱۰۲۰ کیلو پاسکال اندازه گیری شد (Sadrekarimi et al., 2006). لوانا و همکاران، ویژگی‌های کانی شناسی و ژئوتکنیکی سنگ‌های ضعیف در مناطق مرکزی یونان را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که با کاهش مقدار کانی‌های رسی در سنگ، مقاومت و شاخص دوام افزایش یافت (Loanna et al., 2009).

سنگ‌های سولفاته مثل ژئوسپیس به دلیل گسترش و اهمیتی که دارند توسط پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بل، خصوصیات مهندسی انیدریت و ژئوسپیس‌های مناطق شمال و مناطق میانی انگلستان را مورد مطالعه قرار داد، و نتیجه گرفت که کانی‌های یاد شده تداخل کمی دارند و بر اساس آزمون مقاومت تراکمی تک محوری، ژئوسپیس دارای مقاومت متوسطی می باشد (Bell F., 1994). یلماز (Yilmaz I., 2007)، تفاوت در خصوصیات ژئوتکنیکی دو نوع ژئوسپیس در ترکیه را مورد مطالعه قرار داد و نتیجه گرفت که بافت، به‌ویژه اندازه و شکل دانه‌ها، نقش مهمی در کنترل و تفاوت خصوصیات مکانیکی دو نوع ژئوسپیس دارد. همچنین در سال‌های اخیر تحقیقاتی در ارتباط با انحلال ژئوسپیس در محل تعدادی از سدهای کشور انجام گردیده است. مطالعه انحلال پذیری ژئوسپیس‌های سازند گچساران در محل سد تنگ شمیران ایلام (باغداردخت، ۱۳۸۴)، ارزیابی میزان انحلال ژئوسپیس‌های سازند آغاچاری در



شکل ۱. نقشه زمین شناسی منطقه رامهرمز (اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شرکت نفت)



شکل ۲. رخنمون سازند گچساران در مخزن سد جره در شمال رامهرمز (دید به سمت شمال شرق)



شکل ۳. مقطع چینه شناسی سازند گچساران در منطقه رامهرمز

## روش کار

در این پژوهش بلوک‌های سنگی از مخزن سد جره و دیگر بخش‌های مختلف سازند گچساران در منطقه رامهرمز به آزمایشگاه زمین شناسی مهندسی دانشگاه بو علی سینا همدان انتقال داده شد و از آنها مقاطع نازک تهیه گردید. با استفاده از آزمایش کلسیمتری به روش "تیتراسیون برگشتی" مقدار کربنات کلسیم نمونه‌های مارن و آهک ماسه‌ای تعیین شد. جهت تفکیک کردن مارن از سیلتستون، آزمایش هیدرومتری بر روی نمونه‌ها انجام گردید. برای تعیین نوع کانی‌های رسی، از آنالیز XRD استفاده شد. بر اساس ویژگی‌های سنگ شناسی، نمونه‌های سنگی طبقه بندی شدند. به منظور انجام آزمایشات فیزیکی و مکانیکی بر روی نمونه‌ها، از بلوک‌های سنگی مغزه‌گیری به عمل آمد. خصوصیات فیزیکی مثل وزن مخصوص بخش جامد، وزن واحد حجم، درصد رطوبت، درصد جذب آب، درصد تخلخل، سختی اشمیت و ویژگی‌های مکانیکی سنگ مانند شاخص مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت تراکمی تک محوره و مقاومت کششی بر اساس استانداردهای ASTM و ISRM بدست آمد. جهت تعیین میزان انحلال پذیری ژپس، از آزمایش انحلال به روش سیرکولاسیون استفاده شد. تورم نمونه‌های مارن با استفاده از دستگاه تحکیم و طبق استاندارد ISRM تعیین گردید. برای پیش بینی مقاومت واحدهای سنگی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، از سیستم ANFIS استفاده شد. به این منظور نرم افزار

MATLAB به کار گرفته شده که در آن داده‌های آزمایشگاهی به عنوان ورودی منظور شدند و گراف‌های پیش بینی مقاومت سنگ، نقش خروجی را داشتند.

## سنگ‌شناسی

بر اساس مطالعات سنگ‌شناسی که توسط میکروسکوپ نوری انجام شده، سنگ‌های منطقه مورد مطالعه شامل ژپس، مارن و آهک ماسه‌ای می‌باشند.

## ژپس

سولفات‌های سازند گچساران ابتدا بصورت ژپس بوده اما با افزایش عمق و دما، آب خود را از دست داده و به انیدریت تبدیل شده‌اند. در اثر فرایندهای تکتونیکی انیدریت به سطح آمده و در شرایط فشار و دمای کمتر قرار می‌گیرد که در اثر آبیگری مجدد به ژپس تبدیل می‌شود. بنابر این سولفات‌های سازند گچساران در اعماق زیاد (مثل میدان‌های نفتی) به صورت انیدریت بوده و در سطح زمین بصورت ژپس نمایان می‌شوند. بر اساس مطالعات میکروسکوپی، ژپس‌های مورد مطالعه با دو بافت آلاباستر و پورفیریتیک دیده می‌شوند. ژپس‌های آلاباستر و پورفیریتیک ثانویه می‌باشند. ژپس آلاباستر، بصورت ژپس توده‌ای بسیار متراکم، بافت بسیار ریزدانه، معمولاً سفید برفی و مات بوده اما گاهی اوقات دارای رنگ زرد، قهوه ای، قرمز، نارنجی یا سبز دیده می‌شوند. ژپس پورفیریتیک، دارای بافت درشت دانه بوده که در آن بلورهای بزرگ در

دوام سطح آب و پایداری سنگ‌ها دارد. آزمون دوام پذیری براساس استاندارد ASTM D4644 در ۱۵ سیکل برای نمونه‌های ژئیس، آهک ماسه‌ای، واحدهای ۱ و ۲ مارتنی و در ۱۰ سیکل برای واحدهای ۳ و ۴ مارتنی 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 خشک‌شدگی محاسبه شد. جهت خشک کردن نمونه‌های ژئیس و مارن‌های حاوی ژئیس از دمای کمتر از ۵۰ درجه آن استفاده گردید زیرا که ژئیس در تغییرات زیاد دما ناپایدار بوده و تغییر حالت می‌دهد. نمودار شاخص دوام در مقابل تعداد سیکل‌ها در آب مقطر برای نمونه‌ها ترسیم گردید (شکل ۵). همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل‌ها شاخص دوام شکستگی همه نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. ژئیس آلاباستر به دلیل داشتن بافت ریزدانه، دارای سطح در معرض تماس بیشتری بوده و به این علت دوام کمتری نسبت به ژئیس پورفیریتیک دارد. دوام سنگ‌های مارتنی شدیداً تابع میزان کربنات کلسیم آن بوده و با افزایش درصد کربنات کلسیم، شاخص دوام افزایش می‌یابد.

### ویژگی‌های فیزیکی

ویژگی‌های فیزیکی ژئیس‌ها و آهک‌های ماسه‌ای بر اساس استاندارد ASTM, 1981 تعیین شدند (جدول ۲). با توجه به حساسیت مارن‌ها در برابر آب، برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی مارن‌ها از روش تلون استفاده شد. نمونه‌های ژئیس تفاوت قابل توجهی در وزن واحد حجم نداشتند زیرا مقدار ناخالصی آنها پایین است. وزن واحد حجم سنگ‌های مارتنی تابع ترکیب کانی-شناسی و میزان تخلخل و همچنین میزان گسترش فرایندهای تکنونیک نظیر ریز ترک‌ها و درزه‌هاست. با افزایش میزان کربنات کلسیم چگالی مارن‌ها کاهش می‌یابد زیرا بطور کلی کائولینیت، مونتوریلونیت، ایلیت و کلریت چگالی بیشتری نسبت به کربنات‌ها (کلسیت) دارند. با افزایش کربنات کلسیم فراوانی کانی‌های رسی کمتر شده لذا چگالی سنگ مارتنی کاهش می‌یابد.

### خصوصیات مکانیکی

#### مقاومت تراکمی تک محوری، مدول الاستیسیته

آزمون مقاومت فشاری تک محوره رایج‌ترین روش ارزیابی مقاومت سنگ است. علاوه بر اینکه از نتایج آن در محاسبات طراحی پی استفاده می‌گردد، در طبقه‌بندی مهندسی سنگ بعنوان یک شاخص با اهمیت کاربرد دارد. هر دو آزمون مقاومت تراکمی تک محوره ( $\sigma_c$ ) و مدول الاستیسیته (E) بر اساس استاندارد ASTM D 2938 و ISRM, 1981 بر روی نمونه‌های ژئیس و مارن (قطر نمونه‌ها ۵۴ میلی‌متر (NX) و نسبت طول به قطر ۲:۱ انجام شدند (جدول ۳). به علت ضخامت کم آهک ماسه‌ای، این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی شکل صورت گرفت. مدول‌های ارتجاعی با استفاده از منحنی‌های تنش-تغییر شکل و در تنش معادل ۵۰٪ تنش حداکثر محاسبه شده‌اند. بر اساس این منحنی‌ها، رفتار ژئیس‌ها پلاستیک-الاستیک-پلاستیک و خزش (creep) و رفتار مارن‌ها الاستیک-پلاستیک می‌باشند. با توجه به مقادیر مقاومت تراکم تک‌محوری و نسبت مدولی و بر اساس طبقه‌بندی دیر و میلر (۱۹۶۶)، ژئیس آلاباستر به عنوان سنگ ضعیف با نسبت مدولی زیاد (DH) و ژئیس پورفیریتیک، مارن‌ها و آهک ماسه‌ای به عنوان سنگ بسیار ضعیف با نسبت مدولی زیاد (EH) طبقه‌بندی شدند.

زمینه‌ای از ریز دانه‌ها دیده می‌شوند. ژئیس پورفیریتیک درشت دانه در اثر آبیگری انیدریت تشکیل شده است. ژئیس پورفیریتیک در مقطع میکروسکوپی دارای بلورهای درشت انیدریت (An) و زمینه ریزدانه ژئیس (Gyp) است (شکل ۴-الف) و آنالیز XRD نشان داده که ناخالصی ندارد. ژئیس آلاباستر ریزدانه بعد از ژئیس پورفیریتیک و در نزدیکی سطح زمین تشکیل می‌گردد (Tony et al, 2005). این نوع ژئیس در مقطع دارای بلورهای ریز ژئیس (Gyp) و کانی رسی (کلریت-Chl) است و بافت ریزدانه دارد (شکل ۴-ب) و آنالیز XRD نشان داد که کانی رسی کلریت در آن وجود دارد (شکل ۴-د). به دلیل وجود کلریت، این نوع ژئیس در نمونه دستی سبز رنگ دیده می‌شود.

### آهک ماسه‌ای رس‌دار

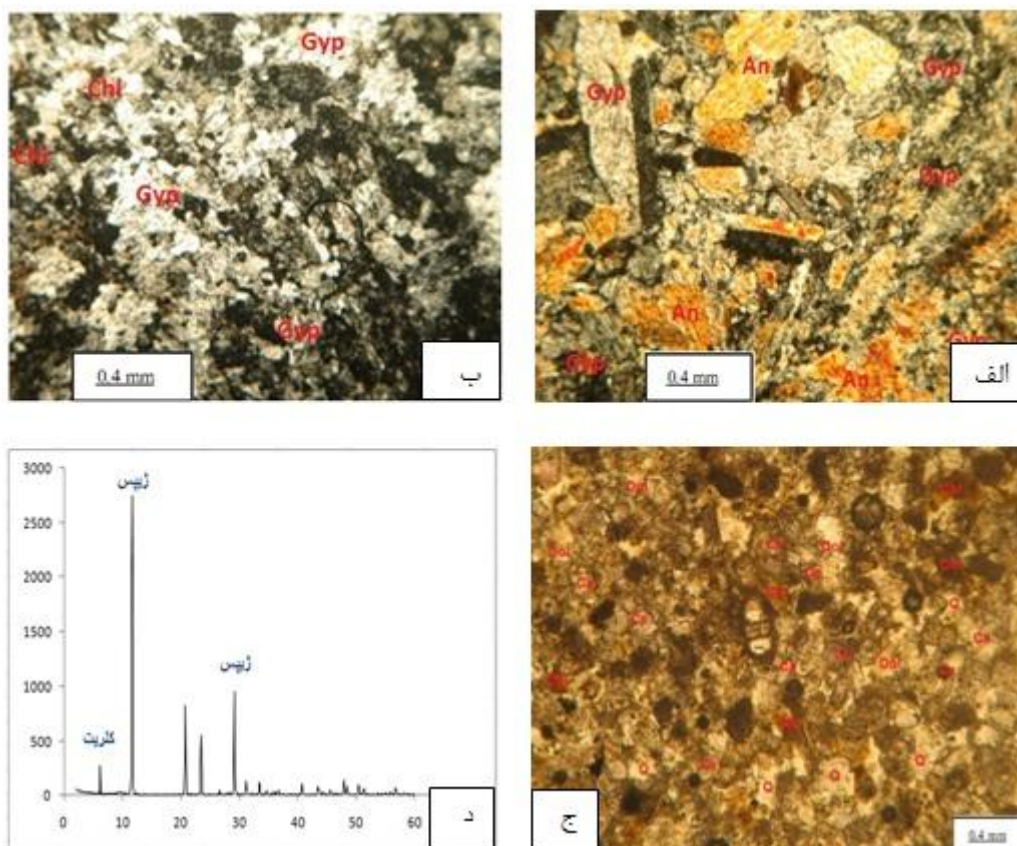
این سنگ در مقطع نازک از کلسیت، دولومیت، کوارتز و کانی‌های رسی تشکیل شده و فسیل نیز در آن نمایان است (شکل ۴-ج). بر اساس نتایج آزمایش کلسیمتری به روش تیتراسیون برگشتی، کربنات این سنگ ۴۵٪ می‌باشد، مواد باقی مانده در آزمایش کلسیمتری حدود ۳۵٪ کوارتز و ۲۰٪ کانی‌های رسی است. نتایج آنالیز XRD نشان می‌دهد که این سنگ از کانی‌های کلسیت، دولومیت، کوارتز و ایلیت تشکیل شده است. آهک‌های سازند گچساران از نوع میکریتی و دولومیکریتی بوده که در مقطع نازک شبیه دولومیت‌ها دیده می‌شوند. دانه‌های کوارتز که در آزمایش کلسیمتری جدا شده بودند، در زیر میکروسکوپ پلاریزان مطالعه شدند. در این مطالعه مشخص شد که دانه‌های کوارتز زرد نخودی و مات هستند که می‌تواند تأیید کننده منشأ بادی این ماسه‌ها باشد.

### مارن

به سنگ‌هایی گفته می‌شود که دارای ۳۵ تا ۶۵٪ کربنات بوده و بین ۶۵ تا ۲۵٪ رس داشته باشد (آدابی، ۱۳۶۶). در منطقه مارن‌ها به رنگ‌های قرمز، سبز، کرمی و خاکستری دیده می‌شوند. در بین انواع مارن، دو نوع مارن قرمز و سبز گسترش بیشتری در منطقه دارند. درصد سیلت و کانی رسی نمونه‌ها با آزمایش هیدرومتری تعیین و نوع کانی رسی با آنالیز XRD تعیین شد. با آزمایش کلسیمتری به روش "تیتراسیون برگشتی" مقدار کربنات کلسیم نمونه‌ها معین گردید و از طریق تعیین هدایت الکتریکی مارن‌ها، مقدار درصد ژئیس نمونه‌ها مشخص شد. بر اساس ترکیب کانی شناسی، مارن‌ها به ۴ واحد تقسیم شدند (جدول ۱). اکسید آهن فریک و هماتیت باعث ایجاد رنگ قرمز و احیاء هماتیت و وجود آهن فرو در شبکه کانی‌های ایلیت و کلریت سبب ایجاد رنگ سبز در مارن‌ها شده است. در منطقه مارن‌هایی دیده می‌شود که دارای رگه‌های نازک ژئیس فیبری ثانویه به ضخامت 1cm یا کمتر می‌باشند، ژئیس‌ها در مدت انحلال حمل شده و در شکستگی‌هایی که جهت یافتگی مختلف دارند، تزریق شده و رگه‌ها را ایجاد کرده‌اند. در بخش‌هایی مارن‌ها دارای لامینه‌هایی از ماسه و سیلت بوده که منشأ بادی دارند، این نوع مارن‌ها می‌توانند به عنوان مرز سیکل‌های رسوبگذاری در نظر گرفته شوند (Gill et al., 1972).

### دوام پذیری

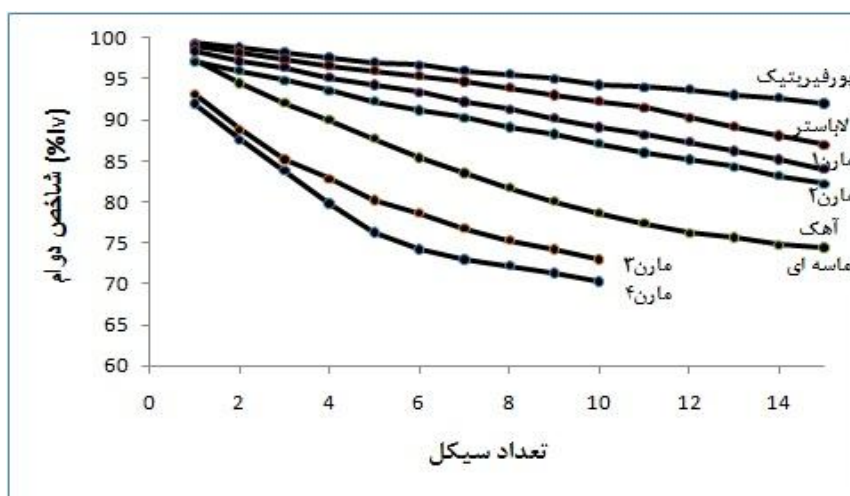
دوام به قدرت مقاومت مواد در برابر عوامل مخرب فیزیکی و شیمیایی اطلاق می‌شود. عوامل کنترل کننده دوام یک نمونه تابع کانی غالب، شکستگی-های ریز، تجزیه و هوازدگی سنگ است. نوسان مخزن سد نیز، تأثیر فراوانی بر



شکل ۴. مقطع میکروسکوپی الف:ژیپس پورفیریتیک ب:ژیپس آلاستر ج:آهک ماسه ای رس دار د:نمودار آنالیز XRD ژپس آلاستر

جدول ۱. ترکیب کانی شناسی و تقسیم بندی انواع مارن

واحد مارنی	رنگ	میانگین رس. %	میانگین سیلت. %	میانگین کریبات. %	میانگین ژپس. %	نوع کانی رسی
۱	خاکستری	٪۳۵	کمتر از ٪۱	٪۶۳	کمتر از ٪۱	ایلیت و کلریت
۲	سبز	٪۴۶	کمتر از ٪۱	٪۵۲	کمتر از ٪۱	ایلیت و کلریت
۳	قرمز مایل به نارنجی	٪۵۲	کمتر از ٪۱	٪۴۰	٪۷	ایلیت و کلریت
۴	قرمز	٪۵۸	کمتر از ٪۱	٪۳۳	٪۸	ایلیت و کلریت



شکل ۵. نمودار تعداد سیکل ها در برابر شاخص دوام برای واحدهای سنگی سازند گچساران

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی واحدهای سنگی سازند گچساران

نوع سنگ	میانگین درصد رطوبت (%ω)	میانگین درصد جذب آب (%I <sub>v</sub> )	میانگین درصد تخلخل (%n)	وزن مخصوص بخش جامد (G <sub>s</sub> )	وزن واحد حجم خشک (g/cm <sup>3</sup> )	وزن واحد حجم مرطوب (g/cm <sup>3</sup> )	وزن واحد حجم اشباع (g/cm <sup>3</sup> )
ژئیس آلاباستر	۱/۲	۰/۶۵	۱/۵۴	۲/۲	۲/۳	۲/۳۳	۲/۴۱
ژئیس پورفیریتیک	۱/۶	۰/۸	۲/۳۶	۲/۱	۲/۲	۲/۲۴	۲/۳۱
واحد ۱ مارنی	۱/۲	۴/۸	۱۱/۲	۲/۵۳	۲/۵۱	۲/۵۴	۲/۶۶
واحد ۲ مارنی	۱/۴۴	۵/۷	۱۰/۶	۲/۶۱	۲/۵۳	۲/۵۶	۲/۷۴
واحد ۳ مارنی	۲/۳	۷/۱	۱۱/۴	۲/۶۵	۲/۳۳	۲/۳۸	۲/۵۴
واحد ۴ مارنی	۱/۲	۶/۴	۱۰/۹	۲/۷	۲/۴۵	۲/۵	۲/۶۴
آهک ماسه ای	۲/۵	۱۱/۴	۱۷/۴	۲/۵۴	۲/۱	۲/۱۵	۲/۳۱

مورد سنگ‌های مارنی، با افزایش تراکم سنگ، افزایش درصد کربنات کلسیم و کاهش میزان تخلخل سنگ، سرعت انتشار امواج افزایش پیدا کرد (جدول ۳).

### سختی سنگ

سختی سنگ معیاری فیزیکی برای ارزیابی مقاومت سنگ محسوب شده که آزمایشی غیرمخرب است و به منظور شناخت مقاومت سنگ در پروژه‌های کوچک به کار گرفته می‌شود. در این پژوهش سختی نمونه‌ها با استفاده از چکش اشمیت نوع L و در صحرا تعیین شده است. ۲۰ آزمون جداگانه بر روی هر بلوک سنگی با وضعیت افقی چکش و بر اساس استاندارد (ISRM, 1981) و ASTM D2216 انجام شد. همانطور که در (جدول ۳) ملاحظه می‌شود حداقل عدد سختی اشمیت (N) مربوط به مارن واحد ۴ با کمترین میزان کربنات بوده و حداکثر آن مربوط به ژئیس آلاباستر می‌باشد.

### انحلال پذیری ژئیس

پروژه‌های متعددی در سراسر جهان و کشور ما با مسئله حضور کانی‌های انحلال‌پذیر مثل ژئیس و مشکلات ناشی از آن روبرو هستند. چنانچه ذکر شد، دو سوم از مخزن سد جره در منطقه راهرمز را سازند گچساران در بر می‌گیرد. گسترش ژئیس‌ها در مخزن سد ممکن است مشکلاتی همچون فرار آب و تغییر کیفیت آب را بوجود آورد. به منظور ارزیابی خطرات بالقوه و انجام بهسازی‌های لازم، تعیین مقدار و سرعت انحلال این سنگ‌ها ضروری می‌باشد. در این پژوهش به منظور بدست آوردن این پارامترها برای ژئیس آلاباستر و پورفیریتیک، از آزمایش انحلال‌پذیری به روش سیرکولاسیون استفاده شد. تغییرات غلظت CO<sub>2</sub> محلول در آب یا به عبارت دیگر تغییرات pH آب اثرات قابل توجهی بر قابلیت انحلال سنگ‌های انحلال‌پذیر دارد. افزایش مقدار CO<sub>2</sub> محلول در آب موجبات کاهش اسیدیته محلول را فراهم می‌آورد و فرایند انحلال را تقویت و تسریع می‌نماید. به منظور ارزیابی اثرات تغییرات pH بر انحلال‌پذیری ژئیس، آزمایش انحلال در سه سیکل و با pH های مختلف انجام شده است. ثابت سرعت انحلال نیز در هر سیکل به دو روش وزنی و حجمی محاسبه گردید (جدول ۴).

### آزمون بار نقطه‌ای

آزمون مقاومت بار نقطه‌ای یک آزمایش سریع و آسان برای بدست آوردن مقاوت تراکم تک محوری سنگ‌های سخت می‌باشد (Goodman, 1982). در این پژوهش آزمون بار نقطه‌ای بر اساس استاندارد ISRM, 1981 انجام شد (جدول ۳). نمونه‌های ژئیس و مارن، قطری برابر با ۵۸/۵ میلی‌متر و طولی ۱/۵ برابر قطر داشتند. برای آهک ماسه‌ای از نمونه‌های کلوخه‌ای استفاده شد. تقریباً در تمام آزمایش‌های انجام شده صفحه شکست نمونه‌های آلاباستر دنداندار و صفحه شکست نمونه‌های پورفیریتیک ناهموار بود. تفاوت در وضعیت هندسی صفحات شکست ژئیس‌ها را می‌توان به قفل شدگی زیاد ذرات ژئیس آلاباستر نسبت به ژئیس پورفیریتیک نسبت داد.

### آزمون کشش برزیلی

مقاومت کششی (σ<sub>t</sub>) نمونه‌ها بطور غیر مستقیم توسط آزمایش برزیلی و بر اساس استاندارد ISRM, 1981 تعیین شد. بر اساس نتایج بدست آمده بالاترین مقادیر مقاومت کششی ژئیس‌ها مربوط به ژئیس آلاباستر و کمترین مقادیر برای ژئیس پورفیریتیک می‌باشد (جدول ۳). دامنه تغییرات مقاومت کششی مارن‌ها بین ۱/۴۲ تا ۲/۲ کیلوپاسکال بر متر مربع بوده است. در نمونه‌های مارن با درصد رس بالا نمونه بعد از تغییر شکل زیاد و با افزایش تعداد گسیختگی تا رسیدن به مقاومت نهایی، دچار شکست شد و در نمونه‌های با درصد کربنات کلسیم بالا سنگ بطور ناگهانی و با صدای انفجار شکسته شد.

### سرعت موج

سرعت موج طولی (v<sub>p</sub>) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای و بر اساس استاندارد (ISRM (1981) و ASTM D 2845 با استفاده از دستگاه التراسونیک، بدست آمد. سرعت امواج متأثر از اندازه دانه‌های تشکیل دهنده سنگ بوده به نحوی که بطور کلی سرعت موج در سنگ‌های ریز بیش‌تر از سنگ‌های درشت دانه می‌باشد (خانلری ۱۳۸۹). ژئیس آلاباستر به دلیل ریزدانه بودن دارای سرعت عبور موج بیشتری نسبت به ژئیس پورفیریتیک می‌باشد. در

جدول ۳. خصوصیات ژئوتکنیکی واحدهای سنگی سازند گچساران

نوع سنگ	σ <sub>c</sub> (Mpa)	σ <sub>t</sub> (Mpa)	E (Gpa)	I <sub>s</sub> (Mpa)	v <sub>p</sub> (m/s)	N
ژئیس آلاباستر	۳۲/۵	۳/۷	۳	۰/۹۸	۴۵۸۳	۳۹
ژئیس پورفیریتیک	۲۰/۲	۲/۸	۱/۹۴	۰/۵۸	۴۳۷۲	۳۲
مارن ۱	۱۸/۳	۲/۲	۱/۸۲	۰/۸۷۹	۱۹۷۴	۲۹
مارن ۲	۱۳/۴	۱/۸۳	۱/۴۷	۰/۵۲۳	۱۷۳۴	۲۵
مارن ۳	۱۱/۲	۱/۴۲	۱/۲	۰/۴۵۷	۱۵۴۰	۲۱
مارن ۴	۹/۴	۱/۰۶	۰/۹۴	۰/۳۲۶	۱۲۱۱	۱۸
آهک ماسه‌ای	۱۴/۲	۱/۹۲	۱/۵۳	۰/۵۴۳	۱۴۲۵	۲۴

**تورم مارن**

تورم مارن‌ها در اثر جذب آب ممکن است سبب تخریب و یا ایجاد مشکلاتی در سازه‌ها شود. شواهد صحرایی نشان می‌دهد که مارن‌های سازند گچساران قابلیت تورم دارند و در برخی موارد سبب تخریب سازه‌ها مثل دیوارهای حایل پارک کوهستان، دیوار حایل جاده رامهرمز به شهرهای مجاور و ایجاد ناهمواری در سطح جاده شده‌اند. متورم شدن مارن‌ها در مخزن سد جره در اثر تماس با آب، ممکن است با ایجاد فشار تورمی، سبب ایجاد مسائلی همچون ناپایداری دامنه‌ها شود. از اینرو سعی شده که با انجام مطالعات آزمایشگاهی، درصد تورم و فشار تورمی مارن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرند. روش‌های متعددی جهت بررسی پتانسیل تورم سنگ‌ها ارائه شده ولی معمول‌ترین آنها، روش پیشنهادی ISRM یعنی آزمون تعیین شاخص تورمی در حجم ثابت می‌باشد. در این آزمون، نمونه با نسبت قطر به ضخامت بیش از ۲/۵ در حلقه تحکیم قرار داده شده و سپس با آب مقطر اشباع گردید. نمونه با دریافت آب متورم می‌شود، توسط گیج (gauge) حداکثر میزان تورم قرائت و با داشتن ضخامت نمونه، کرنش تورمی را به عنوان درصد تورم محاسبه می‌گردد. با بارگذاری روی نمونه جلوی تورم آن گرفته می‌شود. حداکثر بار لازم برای جلوگیری از نیروی تورم، بعنوان فشار تورم (Ps) در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش درصد تورم و فشار تورمی مارن‌های سازند گچساران با استفاده از آزمایش شاخص تورمی در حجم ثابت محاسبه شد. با توجه به اینکه انحلال ژئیس، احتمالاً سبب سولفات‌شدن آب مخزن سد جره خواهد شد، لذا به منظور بررسی اثر آب سولفات‌ها بر میزان تورم مارن‌ها، این آزمایش با درصدهای

اشباع ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ سولفات سدیم آبدار (ژئیس) نیز انجام گردید (جدول ۵).

**سیستم (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) ANFIS**

ترکیبی از منطق فازی و شبکه‌های عصبی می‌باشد که برای مدل کردن مسائل پیچیده‌ای که ارتباط بین متغیرهای مدل ناشناخته است، بسیار مناسب بوده و برای بکارگیری آن از نرم افزار MATLAB استفاده می‌شود. در سیستم ANFIS برای مدل سازی داده‌ها از الگوریتم پس انتشار (Back propagation) و از قاعده Sugeno برای درون‌یابی و پیش بینی خروجی استفاده می‌شود (کیا، ۱۳۸۹). ابتدا ورودی و خروجی‌ها به سیستم معرفی شده و سیستم مرحله یادگیری را انجام می‌دهد. سپس برای معتبر سازی مدل، آزمایش سیستم انجام می‌شود. در این پژوهش داده‌های ورودی شامل مقاومت کششی، شاخص دوام سیکل اول و تخلخل ۱۰۶ نمونه از واحدهای لیتولوژی سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه می‌باشند و پارامتر خروجی، مقاومت تراکمی تک محوری سنگ هاست. هر مدل دارای یک ساختار معادل می‌باشد که ورودی، خروجی، قواعد مورد استفاده و نرون‌ها را به ما نشان می‌دهد (شکل ۶). در لایه Inputmf ورودی‌ها از توابع عضویت (membership functions) عبور می‌کنند. توابع عضویت هر تابع، پارامتر مناسبی می‌تواند باشد که در اکثر موارد توابع گوسین (Gaussian function) انتخاب می‌شوند، مثل تابع زنگی شکل (شکل ۷). درجه تابع عضویت مقدار سطح وابستگی عضو به مجموعه فازی را نشان می‌دهد.

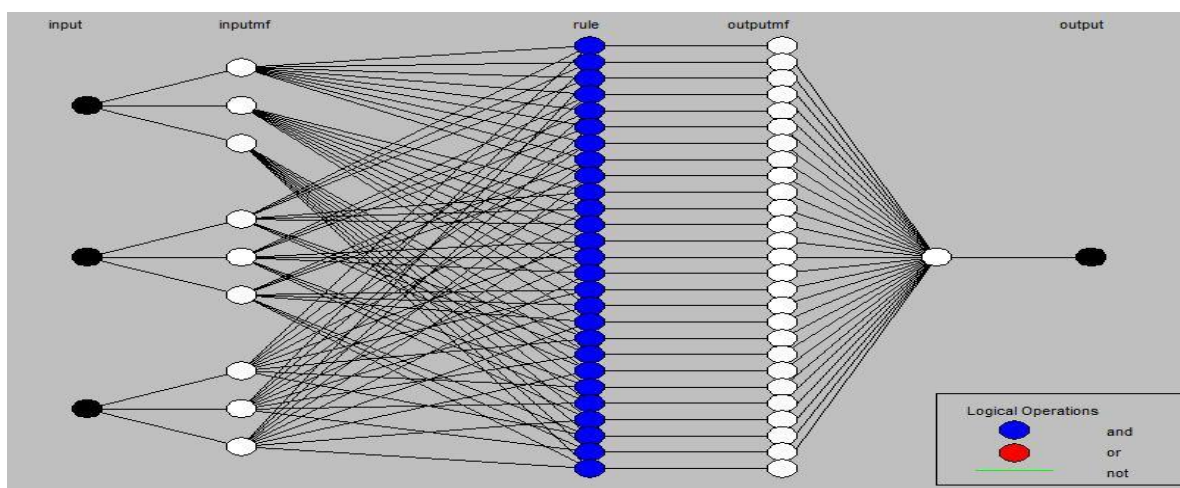
جدول ۴. قابلیت انحلال و ثابت سرعت انحلال ژئیس‌های سازند گچساران در pH های مختلف

نمونه سنگ	اسیدیته محلول pH	میزان انحلال (g/l)	ثابت سرعت انحلال به روش وزنی (m/s)	ثابت سرعت انحلال به روش حجمی (m/s)
ژئیس آلاباستر	۶/۵-۷	۲/۷۲	$0/275 \times 10^{-5}$	$0/568 \times 10^{-5}$
	۷-۷/۵	۲/۶	$0/286 \times 10^{-5}$	$0/587 \times 10^{-5}$
ژئیس پورفیریتیک	۷/۵-۸	۲/۴۶	$0/293 \times 10^{-5}$	$0/593 \times 10^{-5}$
	۶/۵-۷	۲/۶۳	$0/478 \times 10^{-5}$	$0/925 \times 10^{-5}$
	۷-۷/۵	۲/۵۷	$0/483 \times 10^{-5}$	$0/932 \times 10^{-5}$
	۷/۵-۸	۲/۴۱	$0/494 \times 10^{-5}$	$0/938 \times 10^{-5}$

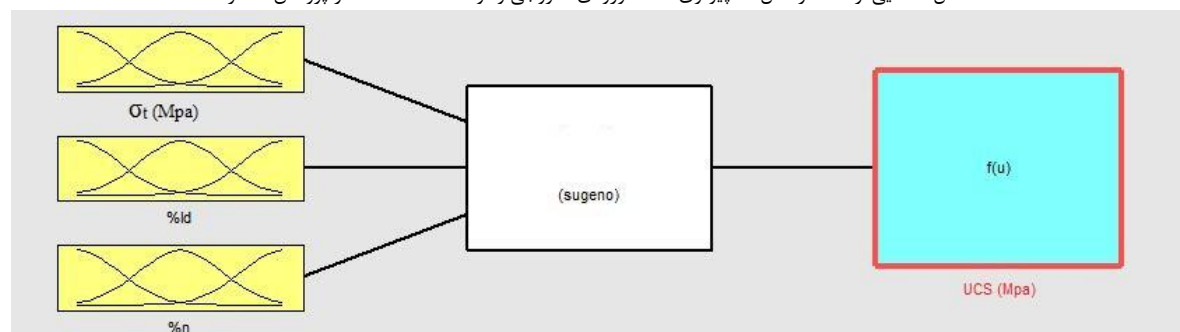
جدول ۵. کرنش تورمی و فشار تورمی مارن‌های سازند گچساران در آب مقطر و آب حاوی غلظت‌های مختلف ژئیس (سولفات سدیم)

نمونه سنگ نمونه آب	فشار تورم (Kpa)				کرنش تورمی (%)			
	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴
آب مقطر	۲۸۲/۲	۳۱۵/۷۶	۲۳۲/۸۲	۱۴۶/۹۴	٪ ۱۷/۶	٪ ۲۳/۶۴	٪ ۱۲/۳	٪ ۸/۴
ژئیس ۲۵٪	۲۴۶/۳	۲۸۴/۶۲	۲۰۱/۷۲	۱۲۱/۴۲	٪ ۱۳/۴۱	٪ ۲۱/۳	٪ ۱۰/۲	٪ ۶/۴۲
ژئیس ۵۰٪	۲۰۸/۸۳	۲۴۲/۵۱	۱۶۴/۵۲	۱۰۷/۶۳	٪ ۱۰/۲۲	٪ ۱۷/۸	٪ ۸/۴	٪ ۴/۸
ژئیس ۷۵٪	۱۵۶/۴	۱۹۷/۵۶	۱۲۵/۳	۹۲/۷۲	٪ ۸/۱۳	٪ ۱۴/۴۶	٪ ۶/۶	٪ ۳/۱۴
ژئیس ۱۰۰٪	۱۰۸/۴	۱۲۲/۷۶	۹۶/۲	۸۳/۵۳	٪ ۶/۸	٪ ۹/۲	٪ ۴/۸۲	٪ ۲/۲۶





شکل ۶. نمایی از ساختار مدل کامپیوتری، تعداد ورودی، خروجی و قواعد استفاده شده در پژوهش حاضر



شکل ۷. تصویر تابع عضویت پارامترهای ورودی برای مدل مورد نظر

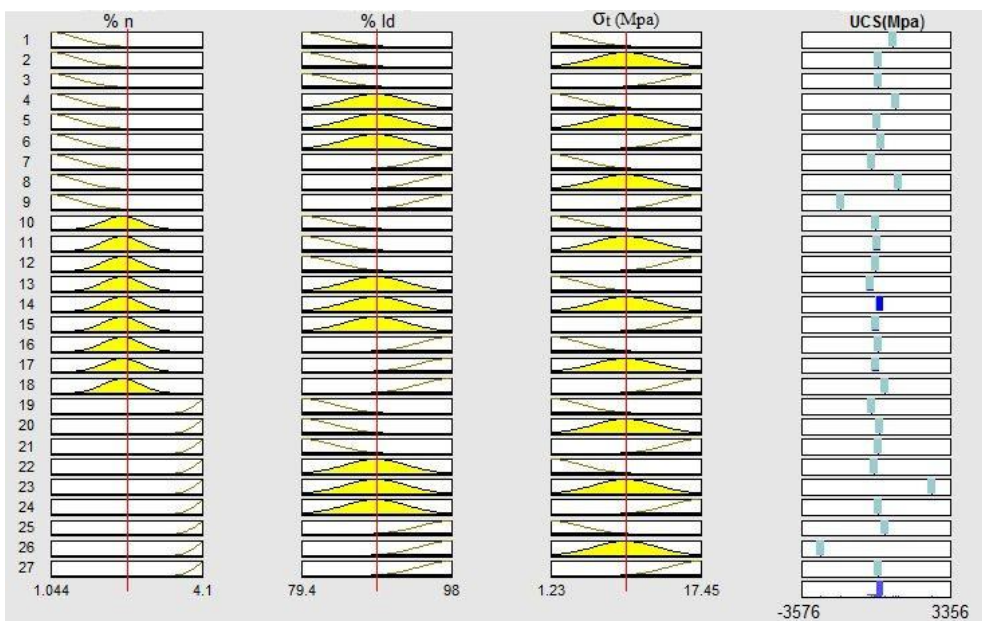
ورودی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نمایشگر یک نمودار سه بعدی شبکه-بندی شده است که پارامترهای ورودی را به پارامتر خروجی انگاشت می‌کند. ANFIS با استفاده از قواعد و تکنیک‌های خود، به درون‌یابی و شبیه‌سازی پارامترهای معرفی شده پرداخته و پیش‌بینی از نتایج را در قالب این نمایشگرها ارائه می‌کند. در شبیه‌سازی‌های انجام شده از روش *backpropagation* *online* استفاده شده است یعنی در هر تکرار به ازای هر داده که اعمال می‌شود خطا محاسبه می‌شود و پس انتشار خطا صورت می‌گیرد. پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش شامل مقاومت کششی، شاخص دوام سیکل اول و درصد تخلخل سنگ می‌باشد که با استفاده از ANFIS رابطه بین این پارامترها پیش‌بینی و مقاومت تراکمی تک محوره سنگ معین گردید. بر این اساس در بین واحدهای لیتولوژی سازند گچساران، با افزایش دوام و کاهش تخلخل، مقدار مقاومت سنگ افزایش می‌یابد (شکل ۹) و بیشترین مقاومت مربوط به سنگ با تخلخل کمتر از ۲٪ و شاخص دوام بیش از ۹۸٪ است. کمترین مقدار مقاومت مربوط به سنگ‌های با تخلخل بین ۱۲ تا ۱۴٪ و شاخص دوام کمتر از ۸۵٪ می‌باشد.

همچنین در بین این واحدها با افزایش مقاومت کششی و کاهش تخلخل، مقاومت سنگ افزایش می‌یابد و برای این حالت، حداکثر مقاومت مربوط به سنگ با تخلخل کمتر از ۲٪ و مقاومت کششی بیش از ۳/۷ کیلوپاسکال می‌باشد و کمترین مقاومت مربوط به سنگ‌های با تخلخل بیش از ۶٪ و مقاومت کششی کمتر از ۳/۲ کیلوپاسکال است (شکل ۱۰).

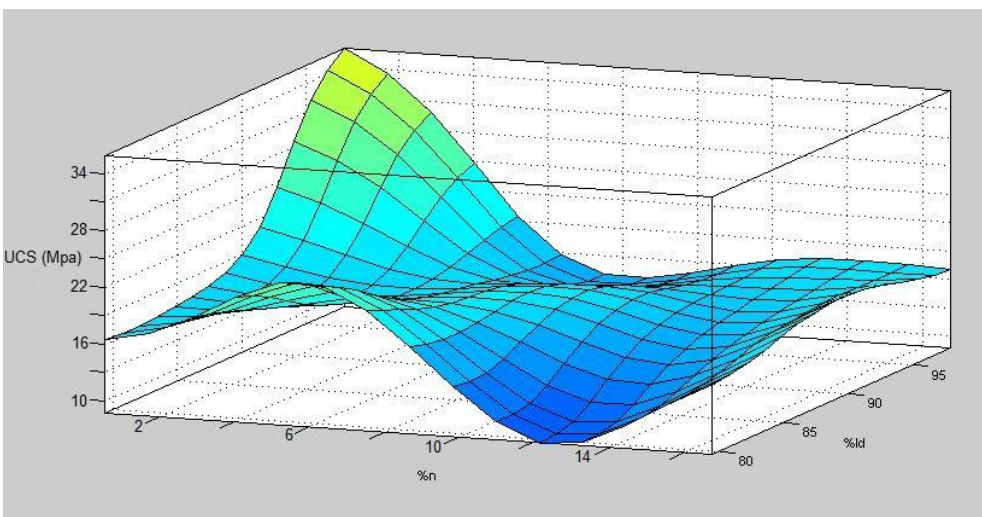
دیاگرام استنتاجی (Rule Viewer) یک محیط محاسبات تکنیکی MATLAB است که برای نمایش نمودارهای مربوط به استنتاج فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این ابزار برای تشخیص و نمایش قواعد و نحوه تأثیر توابع در نتیجه نهایی استفاده می‌شود (کیا، ۱۳۸۹). این دیاگرام قابلیت تفسیر کل فرآیند استنتاج فازی را فراهم می‌آورد. دیاگرام استنتاجی از مدل ANFIS فرض شده در (شکل ۸) برای مقادیر ورودی ۱ تا ۲۷ با مقادیر تطبیقی از عضویت خروجی که ثابت انتخاب شده، آورده شده است. 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. سه ستون زرد رنگ مربوط به فرض قواعد بوده و ستون آخر مربوط به نتیجه قواعد است. به عنوان مثال چهار نمودار ردیف اول نشان دهنده فرض و نتیجه مربوط به قاعده اول است. در دیاگرام استنتاجی، با وارد کردن مقادیر دلخواه از پارامترهای ورودی، می‌توان مقدار مقاومت سنگ را پیش‌بینی کرد.

### پیش‌بینی مقاومت تراکمی تک محوره واحدهای سنگی با استفاده از سیستم ANFIS

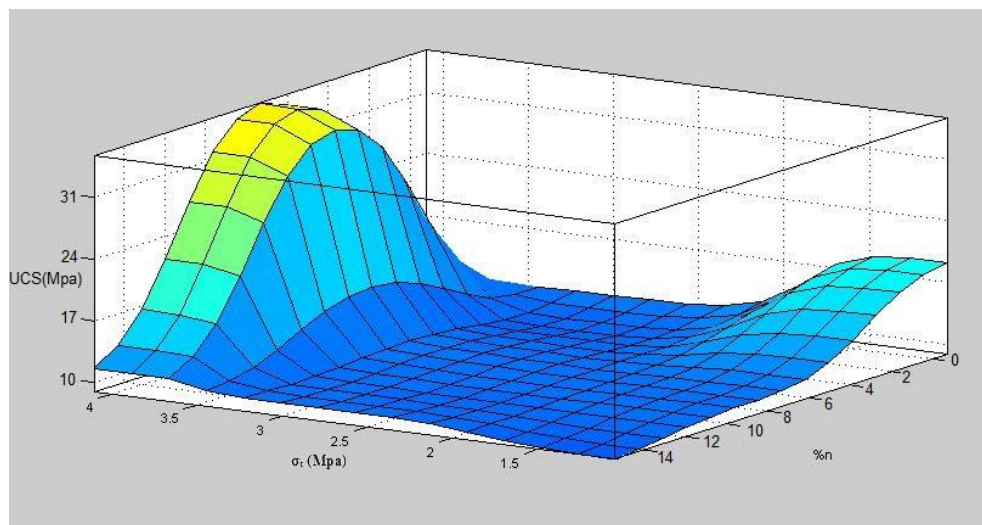
تعیین مقاومت سنگ با داشتن اطلاعات اندکی از آن در بسیاری از موارد مثل پی‌سازی، با ارزش می‌باشد. در این پژوهش سیستم ANFIS با استفاده از تکنیک‌های یادگیری، مقدار مقاومت سنگ را یاد گرفته و در نهایت مدلی را در قالب نمایشگر سطوح (Surface Viewer) برای ما طراحی کرد که تنها با داشتن دو پارامتر از خصوصیات سنگ می‌تواند مقدار مقاومت سنگ را تعیین کند. نمایشگر سطوح برای نمایش وابستگی پارامتر خروجی به هر یک از



شکل ۸. تصویر مربوط به نمایشگر قواعد برای پژوهش حاضر: ۲۷ قاعده برای پیش بینی ارتباط بین داده‌ها وجود دارد



شکل ۹. شکل سه بعدی نمایشگر سطوح: رابطه بین مقاومت تراکمی تک محوره با شاخص دوام و درصد تخلخل واحدهای سنگی



شکل ۱۰. شکل سه بعدی نمایشگر سطوح: رابطه بین مقاومت تراکمی تک محوره با مقاومت کششی و درصد تخلخل واحدهای سنگی

آزمایش باعث کاهش هر دو کمیت فشار تومی و کرنش تومی شد. بگونه‌ای که در آب ۱۰۰٪ اشباع نسبت به ژپیس (حدوداً ۲/۵ گرم ژپیس در لیتر) کرنش تومی و فشار تومی به ترتیب ۹۲٪ و ۱۲۲/۷۶ kPa بوده که نسبت به آب مقطر به ترتیب حدود ۳۹/۹ و ۳۸/۸۷ درصد کاهش نشان می‌دهند. واحدهای ژپسی موجود در این سازند نیز از نظر سنگ‌شناسی متفاوت هستند. تفاوت در خصوصیات سنگ‌شناسی سایر ویژگی‌های مهندسی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دوام ژپیس‌ها از نوع بافت تبعیت می‌کند. ژپیس آلاباستر به علت ریزدانه بودن سطح تماس بیشتری با محلول دارد و آن کمتر از ژپیس پورفیریتیک می‌باشد. ژپیس آلاباستر به دلیل ریزدانه بودن و افزایش سطح در معرض تماس با محلول، قابلیت انحلال بیشتری نسبت به ژپیس پورفیریتیک دارد. در pH بین ۶/۵ تا ۷، قابلیت انحلال ژپیس آلاباستر و ژپیس پورفیریتیک به ترتیب برابر با ۲/۲۲ و ۲/۶۳ گرم بر لیتر است. این موضوع در ارزیابی میزان انحلال‌پذیری واحدهای ژپسی سازند گچساران حائز اهمیت است. به خصوص زمانی که سازند در مخزن سدها واقع می‌شود و شناخت ثابت سرعت انحلال و میزان انحلال ژپیس برای ارزیابی کیفیت آب مخزن مورد توجه قرار دارد. خصوصیات مکانیکی سنگ ژپیس به مقدار زیادی تحت تأثیر بافت و قفل شدگی کانی‌ها می‌باشد. مقاومت تراکمی تک محوری، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، شاخص بارنقطه‌ای، سرعت عبور موج و سختی ژپیس آلاباستر نسبت به ژپیس پورفیریتیک بیشتر است و عامل اصلی آن وجود قفل شدگی در بین دانه‌ها است. بر اساس پیش‌بینی‌های ANFIS بیش‌ترین مقاومت در بین واحدهای سازند گچساران، در محدوده مقاومت ژپیس آلاباستر می‌باشد. این سنگ به علت قفل شدگی مناسب کانی‌ها، دارای تخلخل کمی بوده و دوام آن هم نسبتاً بالا است و مقاومت کششی بالاتری نسبت به دیگر واحدها دارد.

#### نتیجه‌گیری

سازند گچساران در منطقه رامهرمز متشکل از ژپیس، مارن و آهک ماسه‌ای می‌باشد. ژپیس‌ها و بعد از آن مارن‌ها بیشترین ضخامت و گسترش را دارا هستند و آهک ماسه‌ای، ضخامت و گسترش کمتری دارد. ژپیس‌ها بر اساس بافت به دو نوع ژپیس ریز دانه (آلاباستر) و ژپیس درشت دانه (پورفیریتیک) و مارن‌ها بر اساس ترکیب کانی شناسی به ۴ واحد تقسیم شدند. بر اساس درصد تخلخل، ژپیس آلاباستر و ژپیس پورفیریتیک در رده پایین، مارن‌ها در رده متوسط و آهک ماسه‌ای در رده بالا قرار گرفتند. بر اساس مقدار دانسیته خشک، ژپیس آلاباستر، ژپیس پورفیریتیک و مارن‌ها در دانسیته متوسط و آهک ماسه‌ای در دانسیته پایینی دارد. بر اساس طبقه‌بندی سنگ بکر، ژپیس آلاباستر در رده DH و ژپیس پورفیریتیک، انواع مارن و آهک ماسه‌ای در رده EH قرار گرفتند. بافت نقش اصلی در تفاوت رفتار ژپیس داشته و درصد کرنات کلسیم و کانی‌های رسی عامل کنترل‌کننده خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های مارنی هستند. ژپیس آلاباستر قابلیت انحلال بیشتری نسبت به ژپیس پورفیریتیک دارد. انحلال‌پذیری هر دو ژپیس با کاهش قلیائیت و افزایش اسیدیته آب، افزایش می‌یابد. افزایش درصد ژپیس در نمونه‌های مارن از دلایل اصلی کاهش کرنش تومی و فشار تومی بوده است. افزایش غلظت سولفات سدیم (ژپیس) در آب نیز باعث کاهش کرنش تومی و فشار تومی نمونه‌های مارن گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که تکنیک شناخته شده ANFIS برای مدل کردن مسائل پیچیده‌ای که ارتباط بین متغیرهای مدل ناشناخته است مناسب می‌باشد. مدل ANFIS ارائه شده قادر است که با استفاده از دیگر خصوصیات آزمایشگاهی، مقاومت سنگ را پیش‌بینی کند که بر اساس آن حداکثر مقاومت در بین واحدهای سنگی سازند گچساران، مربوط به ژپیس آلاباستر می‌باشد.

سازند گچساران جزء سازندهای مشکل‌آفرین محسوب می‌شود. مشکل‌آفرینی این سازند مربوط به انحلال‌پذیری ژپیس‌ها و قابلیت تورم واحدهای مارنی می‌باشد. به این دلیل شناخت شرایط چینه‌شناسی سازند به عنوان یک ضرورت مطرح است. مقطع تیپ سازند گچساران در میدان نفتی گچساران از هفت بخش تشکیل شده و هر بخش ویژگی‌های سنگ‌شناسی متفاوتی دارد. بخش یک بصورت هم شیب بر روی سازند آسماری قرار گرفته است و پوش سنگ مخازن نفتی جنوب غرب ایران می‌باشد که شامل انیدریت ضخیم لایه و لایه‌های نازک آهک می‌باشد. بخش دوم از لایه‌های ضخیم نمک، لایه‌های انیدریت و لایه‌های نازک آهک تشکیل شده است. بخش سوم شامل لایه‌های ضخیم انیدریت، لایه‌های نمک، لایه‌های نازک آهک و مارن می‌باشد. بخش چهارم از لایه‌های ضخیم نمک با میان لایه‌های مارن، آهک و انیدریت تشکیل شده است. بخش پنجم شامل انیدریت‌های مارنی، آهک و مارن می‌باشد. بخش ششم از انیدریت با طبقات متناوب مارن قرمز و آهک تشکیل شده است. بخش هفتم بصورت هم شیب در زیر سازند میشان قرار گرفته و شامل مارن‌های رنگی، انیدریت، ژپیس، آهک ماسه‌ای و نمک می‌باشد (James and Wynd, 1965). در مناطق جنوب و جنوب غرب ایران که سازند گچساران گسترش زیادی دارد مطالعه تفاوت در شرایط چینه‌شناسی قابل توجه است. ممکن است در ناحیه‌ای گسترش لایه‌های مارنی بیشتر بوده و اهمیت تورم-پذیری سازند در ارتباط با پروژه عمرانی مدنظر قرارگیرد. هم‌چنین امکان دارد که در محل یک پروژه واحدهای ژپسی سازند، بیشتر باشد که در این صورت مسئله انحلال‌پذیری از اهمیت زیادتری برخوردار خواهد بود. در منطقه مورد مطالعه، این سازند از ژپیس، مارن و آهک ماسه‌ای رس‌دار تشکیل شده است. این واحدهای سنگی در مقایسه با مقطع تیپ، معرف بخش هفتم سازند گچساران می‌باشند (محمدیان و همکاران ۱۳۸۹). رفتار متفاوت واحدهای سنگی، شرایط پیچیده‌ای را بر رفتار این سازند حاکم کرده است. به منظور شناخت این رفتار آگاهی از خصوصیات فیزیکی هر واحد سنگی ضروری است. واحدهای سنگی این سازند به دلیل تخلخل زیاد و داشتن کانی‌های رسی آب‌زادی جذب می‌کنند. آهک ماسه‌ای رس‌دار با ۲۰٪ رس و ۱۷/۴٪ تخلخل دارای بیشترین میزان جذب آب است. این موضوع در ارتباط با واحدهای مارنی نیز صادق است. در این پژوهش بیشترین میزان کرنش تومی و فشار تومی به ترتیب برابر با ۲۳/۶۴٪ و ۳۱۵/۷۶ کیلو پاسکال مربوط به واحد ۲ مارنی بود که دارای حدود ۳۵٪ کانی رسی است. واحدهای ۳ و ۴ مارنی، درصد کانی رسی بیشتری دارند اما کمترین مقدار کرنش تومی و فشار تومی را دارند. بررسی‌های کانی‌شناسی نشان داد که این سنگ‌ها به ترتیب دارای ۷٪ و ۸٪ ژپیس بوده که سبب کاهش پتانسیل تورم مارن‌ها شدند. باید توجه داشت خصوصیات آبی که خاک یا سنگ را اشباع می‌کند بر مقدار تورم و فشار آن مؤثر است (Waddah et al., 1999). چنانکه گفته شد سازند گچساران حدود دو سوم از مخزن سد جره در شمال رامهرمز را در بر می‌گیرد. انحلال ژپیس‌های سازند گچساران می‌تواند سبب سولفاته شدن آب دریاچه سد شود از طرفی تماس آب با مارن‌های این سازند بعد از آگیری ممکن است سبب تورم آنها شده و مشکلاتی مثل وقوع زمین‌لغزش را باعث شود لذا نیازمند بررسی بیشتر می‌باشد. علت اصلی فرایند تورم تبادل یونی است که بین مولکول‌های آب و یون‌هایی مثل سدیم و پتاسیم موجود در سطح رس رخ می‌دهد. در نتیجه انحلال ژپیس یون‌های سولفات و کلسیم آزاد می‌شوند. تمرکز زیاد  $Ca^{+2}$  و  $SO_4$  بطور معمول فشار اسمزی زیاد بین آب موجود در نمونه و آب موجود بین لایه‌های ظریف رس را کاهش می‌دهد در نتیجه از تمایل رس به جذب آب می‌کاهد (معماریان، ۱۳۸۴). اضافه کردن سولفات سدیم آبدار (ژپیس) به آب مورد

## قدردانی

از همکاری مسئولین سد جره جهت بازدید از تأسیسات و برداشت اطلاعات و همچنین از زحمات بی دریغ مهندس موسوی و رسولی جهت انجام این پژوهش قدردانی شود.

## منابع

- آدابی، م. ح.، مترجم، ۱۳۶۶، سنگ های رسوبی شیمیایی-بیوشیمیایی، انتشارات آستان قدس رضوی
- باغداردخت، ز.، ۱۳۸۴، مطالعه انحلال پذیری سازند های کارستیک در ساختگاه سد تنگ شمیران ایلام، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بو علی سینا همدان
- برجسته، الف. و برقی، ف.، ۱۳۸۸، "بررسی ویژگی های زمین شناسی مهندسی سد مخزنی جره بعنوان نخستین سد خاکی بدون پرده تزریق یا دیوار آب بند در کشور"، ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- پرهیزگار، م. ر.، ۱۳۸۶، بررسی مخاطرات زمین شناسی در محدوده سد تنگ سرخ شیراز، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
- ترابی، م.، ۱۳۸۹، مطالعه انحلال پذیری ژئوسیت های سازند گچساران در محل سد چم شیر، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بو علی سینا همدان
- خانلری، غ.، (۱۳۸۹) "اصول مکانیک سنگ"، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا همدان
- خامه چیان، م.، ۱۳۶۹، بررسی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سنگهای مارنی-رسی، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
- رضایی، ح.، ۱۳۷۹، خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگهای مارنی ساختگاه سد دوستی، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
- کاپله ی، م.، ۱۳۸۷، مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی سازند قم در شمال و شمال شرق همدان، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بو علی سینا همدان
- کیا، س. م.، ۱۳۸۹، محاسبات نرم در MATLAB، انتشارات کیان رایانه سبز
- شرکت ملی نفت ایران، "نقشه زمین شناسی هفتگل"، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰.
- معماریان، ح.، ۱۳۸۴، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم
- 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 زمین شناسی-دانشگاه ارومیه
- موسوی، س. س.، ۱۳۸۵، مطالعه دوام سنگها و انحلال پذیری ژئوسیت به منظور آب بندی محل سد خیرآباد در شرق بهبهان، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بو علی سینا همدان

- Anonymous (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1. Rock and soil materials. Bull Int Assoc Eng Geol 19:355-371
- Amrani N., Lamas F., Irigaray C., Chacon J., 1998, Engineering geological characterization of Neogene marls in the Southeastern Granada Basin, Spain, En. Geol. 50, pp:165-175
- Bell F., 1994, A survey of the engineering properties of some anhydrite and gypsum from the north and midlands of England, Eng. Geo.38, pp:1-23
- Brown ET (1981) Rock characterization, testing and monitoring (ISRM suggested methods). Pergamon, London, pp 211
- Cabalar A. F., Cevik A., Gokceoglu C., 2012, Some applications of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) in geotechnical engineering, Computers and Geotechnics 40, pp: 14-33
- Deere DU, Miller RP (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
- Franklin JA, Chandra A (1972) The slake durability test. Int J Rock Mech Min Sci 9:325-341
- Gill W.D and Ala M.A., 1972, sedimentology of Gachsaran Formation, southwest Iran, AAPG Bull, v59(10), p1965-1974
- Goodman RE (1982) Introduction to rock mechanics. Wiley, New York, pp 478
- James G.A. and J.G. Wynd, 1965, stratigraphic nomenclature of the Iranian oil Consortium agreement area, AAPG Bull, V49(12), P2182-2245
- Loanna I., Dimitrios R., Theodora P., Paris T., 2009, Geotechnical and mineralogical properties of weak rocks from central Greece, Cent. Eur. J. Geosci. 1(4), pp:431-442
- Tony W., Fred B., Martin C., 2005, Sinkholes and Subsidence, springer publication
- Yilmaz I., 2007, Differences in the geotechnical properties of two types of gypsum: alabastrine and porphyritic, Bull Eng Geol Env 66, pp:187-195
- Sadrekarami J., Zekri A., Majidpour H., 2006, Geotechnical features of Tabriz Marl, International Association for Engineering geology and the environment (IAEG), N.: 335
- Waddah S., Khalid A., Mohammed S., 1999, Influence of pore water chemistry on the swelling behaviour of compacted clays, Applied Clay Science 15, pp: 447-462