

ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های ساختمانی کربناته جنوب غرب یزد

طیبه میرجلیلی^۱، ماشاله خامه‌چیان*^۲، محمدرضا نیکودل^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۴

چکیده

شناخت ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های ساختمانی تزئینی حائز اهمیت ویژه‌ای است. در این ارتباط ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و امتیازبندی سنگ‌های کربناته معادن جنوب غرب یزد در این تحقیق انجام شد. پس از شناسایی معادن مربوط به سنگ‌های کربناته در جنوب غرب یزد، نمونه برداری در محل معدن انجام شده و پس از بسته‌بندی به آزمایشگاه انتقال یافته است. از سه محل به سن کواترنر (تراورتن و انیکس)، از سه محل به سن الیگومیوسن (انواع مرمریت ابرکوه) و از سه محل به سن کرتاسه (سنگ چینی، مرمر کریستال و سنگ آهک سیاه) از هر نقطه ۳ عدد بلوک سنگی با ابعاد تقریبی ۲۰×۳۰×۲۰ سانتی‌متری تهیه شد. به منظور بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فیزیکی، مقاومت و ارزیابی دوام سنگ‌های مورد مطالعه، آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلفی انجام شد. و سپس با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، سنگ‌ها بر اساس ویژگی‌های مهندسی سنگ براساس درجه اهمیت امتیازبندی شدند. از نظر بیشترین امتیاز به ترتیب سنگ‌چینی (۹۰٪)، سنگ آهک سیاه (۸۵٪)، مرمریت ابرکوه (۷۸٪)، انیکس (۶۹٪)، تراورتن حجت آباد (۵۳٪)، تراورتن توران پشت (۵۳٪) و در نهایت مرمر کریستال (۵۲٪) کمترین امتیاز را به خود اختصاص داد.

کلمات کلیدی: سنگ‌های ساختمانی کربناته، ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی، جنوب غرب یزد.

۱. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران t.mirjalili@modares.ac.ir

۲. استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران khamechm@modares.ac.ir

۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران nikudelm@modares.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

سنگ‌های ساختمانی از جمله مصالح سنگی به شمار می‌روند که با توجه به ویژگی‌های مطلوب زیادی که دارند کاربرد بسیار گسترده‌ای در معماری و نمای ساختمان‌ها در مناطق شهری دارند (Siegesmund and Sneath, 2011). سنگ ساختمانی یک اصطلاح کلی و جامع برای سنگ‌های مختلف طبیعی است که برای اهداف ساخت و ساز یا تزئینی و به صورت‌های گوناگون در ساختمان‌ها و سازه‌های مختلف به کار می‌رود، به عبارت دیگر در یک تعریف ساده، سنگ ساختمانی سنگی است طبیعی، که پس از استخراج از معدن در اندازه و ابعاد مختلف بریده شده و پس از فرآوری، در قسمت‌های مختلف ساختمان به کار گرفته می‌شود (موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۹۰). سنگ‌های تزئینی براساس زیبایی، قیمت، دوام، مقاومت و سادگی انتخاب می‌شوند. معمولاً طرح مورد نظر و سلیقه انتخاب کننده است که رنگ، بافت، کیفیت، عمر سنگ و سایر مشخصات ظاهری را تعیین می‌کند. بعضی از سنگ‌ها دارای بافت و طرح ساده هستند که به مرور زمان گیرایی خود را از دست می‌دهند بدون اینکه از زیبایی و دوام آن‌ها کاسته شود (فضلیان، ۱۳۸۳).

سنگ کربناته به سنگی اطلاق می‌شود که بیش از ۵۰ درصد آن را کانی‌های کربناته تشکیل داده باشد (Bell, 2000). در میان کربنات‌ها، کلسیت (کربنات کلسیم) و دولومیت (کربنات مضاعف کلسیم و منیزیم) از سایر کربنات‌ها اهمیت بیشتری دارند. واژه سنگ آهک به سنگ‌های کربناته‌ای اختصاص دارد که کربنات‌های تشکیل دهنده‌ی آنها عمدتاً کلسیت (تری‌گونال) و آراگونیت می‌باشد. آراگونیت (یکی از پلی‌مورف‌ها یا ترکیبات ایزومری کربنات کلسیم است که در سیستم اورتورمبیک متبلور می‌شود) نسبت به کلسیت از ثبات و پایداری شیمیایی بسیار کمتری برخوردار است به همین دلیل به زودی بعد از رسوب کردن در آب‌های کمی اسیدی، حل و به کلسیت تبدیل می‌شود. بنابراین آراگونیت فقط در رسوبات جدید و عهد حاضر وجود دارد. (سحابی، ۱۳۸۵). از دیدگاه سنگ‌شناسی، مرمریت‌ها (مرمرها) سنگ‌های کربناته دگرگونی

هستند که بیش از ۵۰ درصد حجمی آن را کلسیت و یا دولومیت تشکیل شده باشد. در حالی که در صنعت به تمام سنگ‌های آهکی و یا دولومیتی که قابلیت صیقل داشته باشند مرمریت گفته می‌شود هر چند که آنها اصلاً دگرگونی نشده باشند (کارگریان و همکاران، ۱۳۹۰).

طبقه‌بندی Dunham (۱۹۶۲) سنگ‌های آهکی را بر اساس بافت به گرینستون (دانه بدون ماتریکس، نظیر بایو یا اسپارایت)، پکستون (دانه‌ها در تماس با هم و با ماتریکس، نظیر بایومیکرایت)، وکستون (دانه‌های درشت شناور در ماتریکس مجدداً نظیر بایومیکرایت) و گل‌سنگ (میکرایت با تعداد کمی دانه) تقسیم می‌کند (موسوی حرمی و محبوبی، ۱۳۸۵). مرمر (مرمریت) با تبلور مجدد ناشی از دگرگونی سنگ آهک یا دولومیت ایجاد می‌شود. به طور معمول می‌توان سطوحی با صیقل بسیار مناسب در مرمر ایجاد کرد. تنوع رنگ‌های موجود در مرمرها (مرمریتها) به علت وجود اکسیدهای آهن، سیلیس، میکا، گرافیت، سرپانتین و مواد آهکی در بین دانه‌ها و رگه‌های موجود در آن است. بافت بلوری مرمر به رنگ آن درخشندگی خاصی می‌بخشد زیرا نور فاصله بسیار کوتاهی را در عمق سنگ طی می‌کند و توسط بلورهای زیرین منعکس می‌شود. این ویژگی را می‌توان تحت عنوان انعکاس داخلی تعریف نمود که وجه تمایز مناسبی برای گروه بندی مرمر (مرمریت) و آهک است. سنگ‌های مرمر (مرمریت) عموماً به دلیل انعکاس نور در عمق سنگ و خواص زیبایی شناختی منحصر به فردی که دارند بسیار مشتری پسند بوده و تزئینات داخلی ساختمان کاربرد بیشتری دارد (زادسر و فضلیان، ۱۳۸۵).

تراورتن نوعی سنگ رسوبی آهکی است که در خلال تغییرات در میزان اولیه CO_2 و از یک منبع آب زیرزمینی که دارای کربنات کلسیم فوق اشباع است صورت می‌گیرد (قبادی و همکاران، ۱۳۹۰). به طور کلی در طی فرآیند تشکیل ذخایر تراورتن، آب‌های گرم از بین طبقات سنگ‌های کربناتی به ویژه سنگ آهک عبور می‌کنند و به دلیل اسیدی بودن، کربنات موجود در این سنگ‌ها را حل کرده و به صورت محلول‌های کربناتی و بی‌کربناتی با خود به سطح زمین منتقل می‌کنند و در

اشباع برابر با نسبت حجم آب جذب شده به حجم کل تخلخل (سنگ) بزرگتر باشد دوام سنگ کمتر خواهد بود. در آب و هوای گرم و خشک تقریباً هر سنگی قابل استفاده است. دوام سنگ-های آهک و مرمر (مرمریت) به طور چشمگیری بر اساس سختی و تخلخل آنها تغییر می کند (زادسر و فضلیان، ۱۳۸۵). سنگ های کربناته در مقابل عوامل شیمیایی، استعداد خوردگی و انحلال پذیری زیادی دارند لذا مطالعه سنگ های کربناته و ارزیابی کیفیت و دوام مصالح سنگی کربناته امری لازم است. محققان متعددی به بررسی کیفیت منابع قرضه آهکی پرداخته اند به عنوان مثال ناصحی (۱۳۷۶)، تلخابلو (۱۳۸۶) و نیکودل (۱۳۶۹) تلاش نموده اند تا معیارهایی مناسب برای شناخت زوال پذیری سنگ ارائه نمایند. صادقی (۱۴۰۰) دوام مصالح تولیدی از سنگ های کربناتی زون البرز مرکزی و کاربرد آنها در مخلوط های آسفالتی را مورد مطالعه قرارداد. کرمی (۱۴۰۰) اثر شرایط محیط رسوبی بر خصوصیات زمین شناسی مهندسی سازند لار در البرز مرکزی را مورد بررسی قرار داد. (1991) Sims به بررسی کیفیت و دوام سنگ ها برای کاربرد در ساخت سازه ها پرداخته است. (Benavenete et al., 2004) میزان دوام سنگ را با ساختار حفرات، قطر حفرات، قطر گلوگاه های ارتباط دهنده حفرات و مقاومت دیواره حفرات مرتبط می داند توزیع اندازه حفرات نیز بر دوام سنگ موثر می باشد.

برای ارزیابی ویژگی مهندسی مصالح سنگی، آزمایش هایی به کار می رود و بر اساس نتایج آنها ویژگی های فیزیکی، مقاومتی و دوام سنگ تعیین می گردد. معمولاً این آزمایش ها نتایج متفاوت و بسیار پراکنده ای را بدست می دهند. مضافاً اینکه اگر در سنگ نوعی هوازدگی یا دگرسانی حاصل شده باشد. میزان پراکندگی داده ها بیشتر می گردد. محققین مختلف تلاش نموده اند تا روابطی بین این ویژگی ها ارائه نموده و کاربرد روابط پیشنهادی خود را مورد بحث قرار داده اند (کرمی، ۱۴۰۰؛ صادقی، ۱۴۰۰؛ Hadi, 2018; Ajalloeian and Kamani, 2019; Kamani, M., Ajalloeian, 2017; Liu et al., 2019). با مطالعه ویژگی های سنگ شناسی علاوه بر شناخت ترکیب کانی شناسی و نامگذاری نمونه ها، خصوصیات فیزیکی مانند

سطح زمین به دلیل افت فشار، کاهش حرارت، آزاد شدن دی اکسید کربن و همچنین تبخیر، بلورهای کلسیت تشکیل شده و به صورت لایه های نازک بر روی یکدیگر رسوب می کنند و تراورتن را تشکیل می دهند (Chafetz and Folk, 1984). ساختار متخلخل و گاه لایه ای، که از ته نشین شدن کربنات کلسیم در چشمه ها، یا آب های گرم کربناتی، تشکیل می شود. این حفره ها حاصل فرآیند طبیعی تشکیل تراورتن است، عیب آن محسوب نمی شود. تراورتن در بعضی مواقع در صورتی که صیقل پذیر باشد، در گروه مرمرها (انیکس) قرار می گیرد (وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۹). انیکس به طور کلی کلسیت نیمه شفاف لایه ای، نهان بلور با ته رنگ های به ویژه زرد یا قهوه ای و سبز می باشد. مرمر انیکس (مرمر رنگارنگ) از ته نشست آهسته در محلول های کربناتی شده (اشباع از دی-اکسید کربن) آب تشکیل شده که در ایران به نام مرمر شناخته می شود (موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۰).

سنگ های متخلخل با سختی کم، قابلیت جذب آب بیشتری داشته و در یخبندان های شدید نسبت به عوامل تخریب مقاومت کمتری دارند لذا برای آب و هوای سرد و مرطوب مناسب نیستند. برای کف، مقاومت سایشی سنگ نیز باید در نظر گرفته شود و اگر از دو یا تعداد بیشتری از سنگ ها استفاده شود، مقاومت سایشی آنها باید تقریباً برابر باشد، در غیر این صورت میزان سایش متفاوت خواهد بود و بعد از مرور زمان منظره ای نازیب ایجاد خواهد شد. سنگ هایی که بیشتر به عنوان نما و تزئینی به صورت قطعات نازک استفاده می شوند، در این حالت نیروهای فشاری عموماً پایین هستند و سنگ های ساختمانی متداول آنقدر مقاومت دارند که سازه بدون عیب و نقص بماند (فضلیان، ۱۳۸۳). از نظر اقتصادی در دراز مدت، دوام مهمترین عامل برای انتخاب سنگ های ساختمانی است. انتخاب سنگ مناسب، نه تنها مشخصات آن بلکه به موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی نیز بستگی دارد.

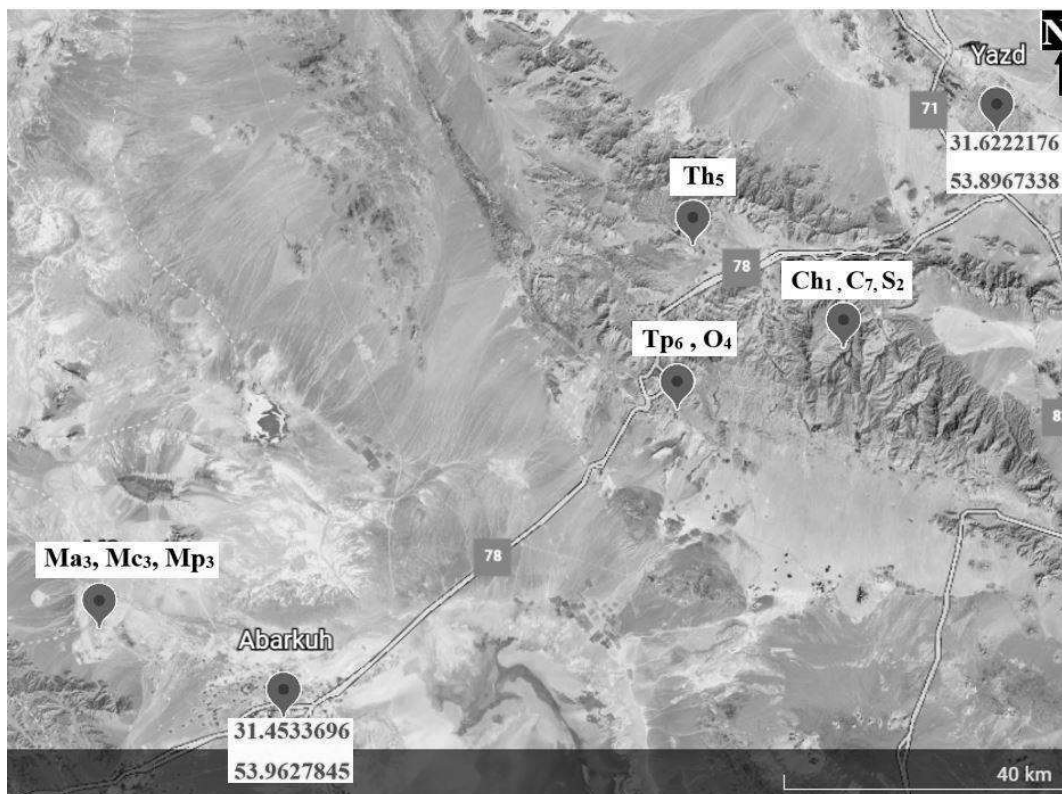
یخبندان مهمترین عامل تخریب سنگ است. سنگ های با ضریب اشباع بزرگتر از ۰/۸ نسبت به یخبندان حساس اند (نقل از Ross and Butlin, 1990). هر چه ضریب اشباع (ضریب

ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها براساس درجه اهمیت برای کاربردهای مهندسی امتیازبندی گردید.

۲. نمونه‌برداری و زمین‌شناسی منطقه

در این تحقیق پس از شناسایی معادن مربوط به سنگ‌های کربناته در جنوب غرب یزد، نمونه برداری در محل معدن انجام شده و پس از بسته‌بندی به آزمایشگاه انتقال یافته است. موقعیت جغرافیایی محل برداشت نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. از سه محل به سن کواترنر (Th₅، Tp₆ و O₄)، از سه محل به سن الیگومیوسن (Ma₃، Mc₃، Mp₃) و از سه محل به سن کرتاسه (Ch₁، C₇، S₂) مطابق شکل ۱ و از هر نقطه ۳ عدد بلوک سنگی با ابعاد تقریبی ۲۰×۳۰×۲۰ سانتی‌متری تهیه شد در شکل ۱ و ۲ محل‌های نمونه‌برداری و جدول ۱ نام معادن و مشخصات سنگ‌های مورد مطالعه ذکر شده است.

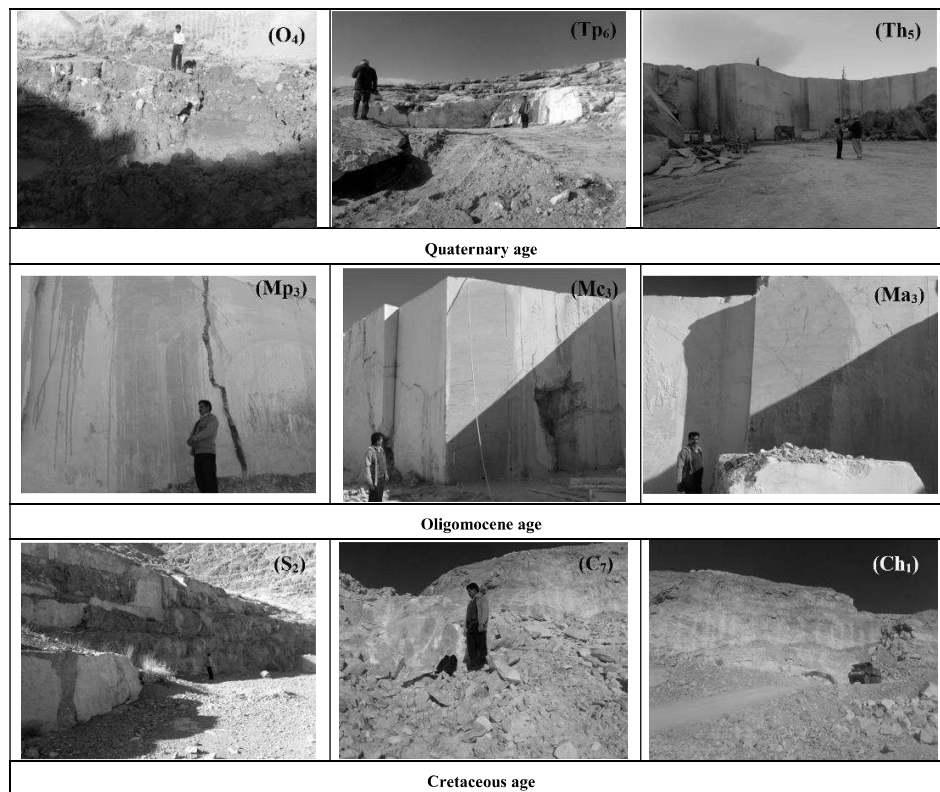
تخلخل تعیین می‌گردد (Bell, 1998)، عموماً تخلخل تعیین شده در مقاطع نازک سنگ با تخلخل محاسبه شده از طریق آزمایش‌های مکانیک سنگ انطباق خوبی نشان می‌دهد (قبادی و همکاران، ۱۳۸۸) و همچنین ویژگی‌های سنگ‌شناسی با خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها مانند مقاومت ارتباط مشخصی دارد (Moshaski and Parabouchev, 1981). در این تحقیق ۵ معدن در مناطق مختلف جنوب غرب یزد که شامل سنگ‌های ساختمانی کربناته از رخنمون‌هایی به سن کواترنر، الیگومیوسن و کرتاسه می‌باشد نمونه برداری و ویژگی‌های سنگ‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی، سرعت موج، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت کششی، مقاومت فشاری، ارزش ضربه‌ای، ارزش فشاری، شاخص دوام و وارفتگی در محلول اسید سولفوریک و اسید کربنیک، شاخص دوام در سلامت سنگ و آزمایش انجماد - آب شدن تعیین و مقایسه گردید و سپس نتایج حاصل از



شکل ۱: موقعیت معادن مورد مطالعه در جنوب غرب یزد (معدن ده‌بالا شامل: سنگ‌چینی Ch₁، مرمر کریستال C₇، سنگ آهک سیاه آشنایی S₂، معدن تراورتن حجت آباد Th₅، معدن توران پشت شامل: انیکس O₄، تراورتن Tp₆، معدن مرمریت ابرکوه شامل مرمریت به رنگ آب‌اناری Ma₃، کرم Mc₃ و پرکاهویی Mp₃).

جدول ۱: معادن و مشخصات نمونه سنگ های مورد بررسی در جنوب غرب یزد.

Name of mine	Name of brand	Age, Stone category and Mineralogical composition
Dehbala mine	Sangchini (Ch1)	Cretaceous age -Metamorphosis Calcium carbonate
	crystal marble (C7)	Cretaceous age -Metamorphosis Calcium carbonate
Ashnaei mine	black limestone (S2) has two types of deigns included: simple and fossilized	Cretaceous age -Sediment Calcium carbonate
Abarkooh marble mine	Marble has 3 types of colors included marble - (Mp3) marble Parkahoei : Abanary marble(Ma3) – kerm (Mc3)	Oligomocene age - Sediment ^l Calcium carbonate
Hojjatabad mine	Hojjatabad travertine (Th5)	Quaternary age- Sediment - Calcium carbonate
Turan Posht mine	Turan Posht travertine (Tp6)	Quaternary age- Sediment - Calcium carbonate
	Turan Posht Enix (O4)	Quaternary age- Sediment - Calcium carbonate



شکل ۲: تصاویری از معادن مورد بررسی در جنوب غرب یزد. (معادن تراورتن حجت آباد Th₅، معدن توران پشت شامل: انیکس O₄، تراورتن Tp₆، معدن مرمریت ابرکوه (آباناری Ma₃، کرم Mc₃ و پرکاهویی Mp₃)، معدن دهبالا شامل: سنگ چینی Ch₁، مرمر کریستال C₇، سنگ آهک سیاه آشنایی S₂).

۲-۱. سنگ ساختمانی تراورتن

محل و موقعیت جغرافیایی معدن تراورتن کرم حجت آباد در ۵۶ کیلومتری جنوب غربی یزد و معدن توران پشت در ۷۰ کیلومتری جنوب غربی یزد واقع شده‌اند. از معدن توران پشت، تراورتن چوب درختی و انیکس نمونه برداری شد با توجه به اینکه سنگ تراورتن مربوط به دوران چهارم (کواترن) می‌باشد هیچ‌گونه واحد سنگی دیگری بر روی آن وجود ندارد. در شکل‌های ۳ و ۴ موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی این دو معدن نشان داده شده است.

۲-۲. سنگ آهک ساختمانی

سنگ آهک سیاه به عنوان سنگ ساختمانی (عمدتا در راه پله) کاربرد دارد. محل و موقعیت جغرافیایی معدن این سنگ ساختمانی در ۴۲ کیلومتری جنوب غرب یزد واقع شده است. این معدن دارای لایه‌هایی به ضخامت متوسط ۲ متر از سنگ سیاه بوده که تعدادی از لایه‌ها از نوع سنگ سیاه ساده و تعدادی از سنگ سیاه فسیل دار می‌باشد که عموماً ارتفاعات را تشکیل داده و متعلق به کرتاسه می‌باشد. در شکل ۵ موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی معدن سنگ آهک سیاه ده‌بالا نشان داده شده است.

۲-۳. سنگ ساختمانی مرمریت

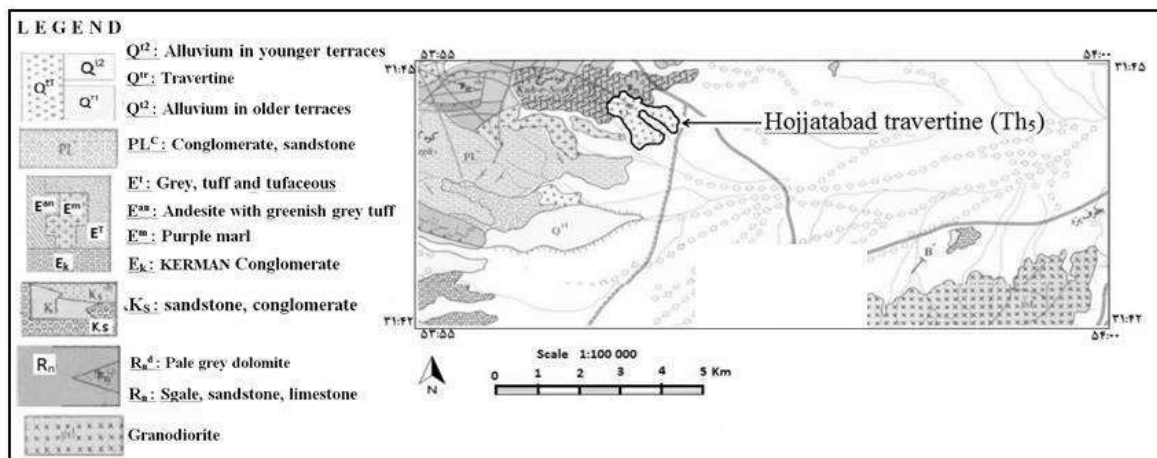
مرمر (مرمریت) سنگ کربناتی دگرگونی می‌باشد که در ایران سنگ‌های این گروه بسته به درشتی بلورهایشان، چینی (ریزبلور)، کریستال (دارای بلورهای درشت)، مرمریت (بدون

قابلیت تشخیص بلورها) می‌نامند (وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۹). در این تحقیق از این سه سنگ ساختمانی سنگ چینی، مرمر کریستال و مرمریت استفاده شده است.

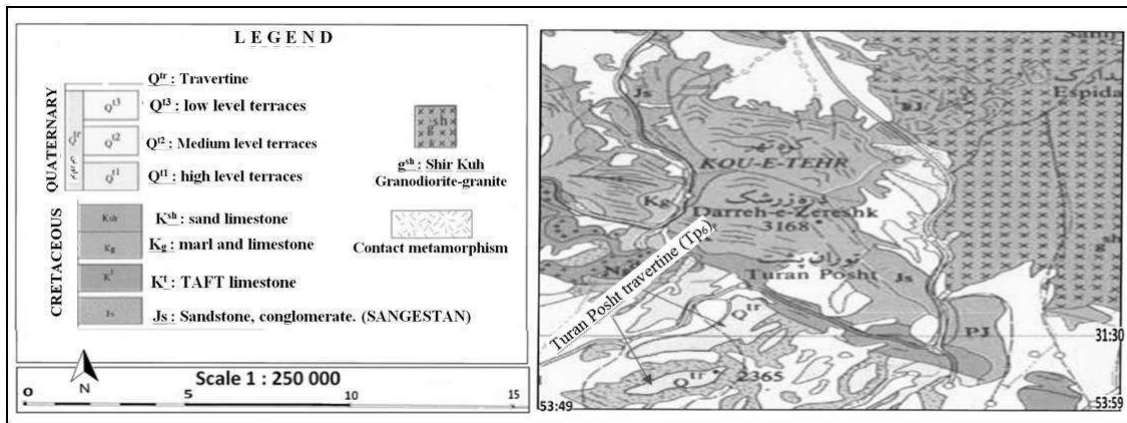
۱-۳-۲. سنگ چینی و مرمر کریستال

محل و موقعیت جغرافیایی معدن این دو نمونه در ۴۰ کیلومتری جنوب غرب یزد واقع شده است. معدن سنگ چینی ده‌بالا از جمله معدن استان یزد می‌باشد که دارای سنگ‌های ساختمانی از نوع سنگ چینی و کریستال است. ساختار و ژنز ویژه سنگ‌های این معدن و نیز دخالت عوامل زمین شناسی باعث شده تا کیفیت آن‌ها تنزل یابد لذا کوپ‌دهی معدن نیز کاهش یافته است. از نظر لیتولوژی این معدن عمدتاً شامل آهک‌هایی به سن کرتاسه زیرین می‌باشند و بخشی از سازند نفت به حساب می‌آیند. آهک‌های مذکور در امتداد گسل طزرجان نفت با نفوذ توده‌های ماگمایی گابرو و مونزوگابرو دگرگون شده‌اند که درجات دگرگونی آن متفاوت می‌باشد که موجب بوجود آمدن سنگ آهک دگرگون شده گردیده و اصطلاحاً سنگ‌های چینی و کریستال را به وجود آورده است.

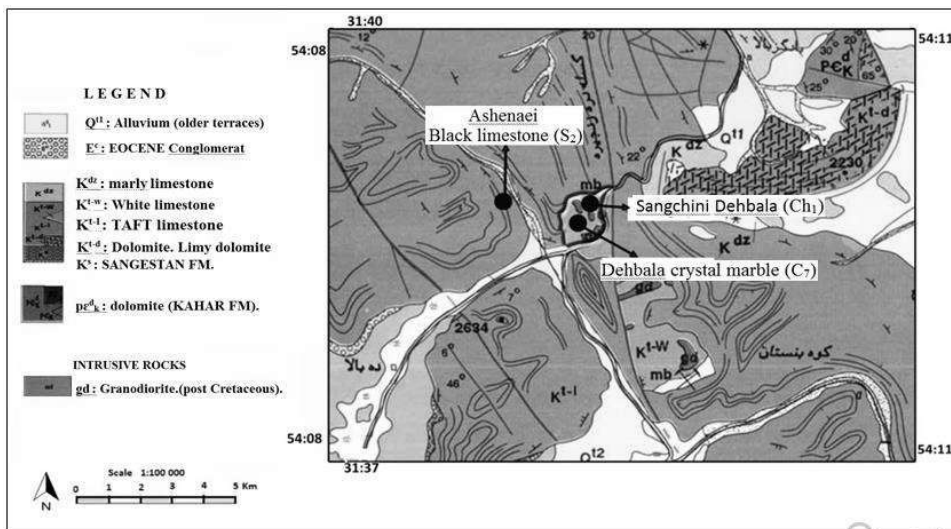
آهک‌های دگرگون شده به صورت ریزبلور به رنگ سفید (سنگ چینی) و درشت بلور به رنگ ابری روشن تا تیره (کریستال) می‌باشند که این امر در اثر سرد شدن تدریجی و گاهی سریع محقق گردیده است. در شکل ۵ موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی معدن سنگ چینی و مرمر کریستال ده‌بالا نشان داده شده است.



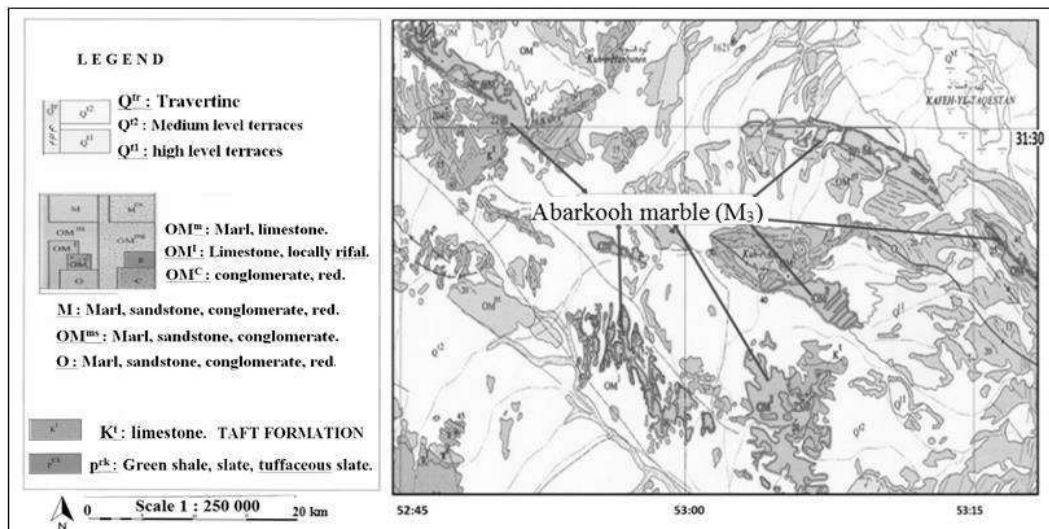
شکل ۳: موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی معدن تراورتن حجت آباد (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۱).



شکل ۴: موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی معدن تراورتن توران پشت (سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۶۱).



شکل ۵: موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی معدن سنگ چینی، مرمر (کریستال) و معدن سنگ آهک سیاه ده بالا (سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹).



شکل ۶: موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی معدن مرمریت البگومیوسن ابرکوه (سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۶۱).

۲-۳-۲. مرمریت ابرکوه

محل و موقعیت جغرافیایی معدن مرمریت ابرکوه در ۱۸۰ کیلومتری جنوب غرب یزد واقع شده است. ماده معدنی مورد نظر سنگ مرمریت به سن الیگومیوسن و دارای رنگ کرم، پراکوهی (زیتونی) و صورتی می باشد که با وسعت خوبی و به صورت توده‌ای - لایه‌ای قرار گرفته است. این مرمریت دارای رگه‌ها، استیلولیت و فسیل‌هایی است که زیبایی خاصی به این سنگ می‌بخشد. در شکل ۶ موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی معدن مرمریت ابرکوه نشان داده شده است.

۳. مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه شناخت ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های کربناته به عنوان سنگ‌های ساختمانی تزئینی حائز اهمیت ویژه‌ای است به منظور بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فیزیکی، مقاومتی و ارزیابی دوام سنگ‌های مورد مطالعه، آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلفی انجام شد. در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های مورد نیاز

جهت انجام آزمایش‌ها، جمعا ۲۷ عدد بلوک سنگی با ابعاد تقریبی ۲۰×۳۰×۲۰ cm از ۵ معدن جنوب غربی یزد جمع‌آوری شد. نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها به دو گروه نمونه‌های نامنظم و نمونه‌های استوانه‌ای تقسیم می‌شوند. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۴۷ mm با استفاده از دستگاه مغزه-گیر آزمایشگاهی تهیه و برای برش و ساب دو سر نمونه‌ها از یک دستگاه برش اره‌ای و ماشین ساب آزمایشگاه استفاده گردید. در جدول ۲ به تعداد آزمایش‌ها، تعداد نمونه‌ها و استانداردها مربوط به هر آزمایش اشاره شده است.

۱-۳. ویژگی‌های سنگ‌شناسی

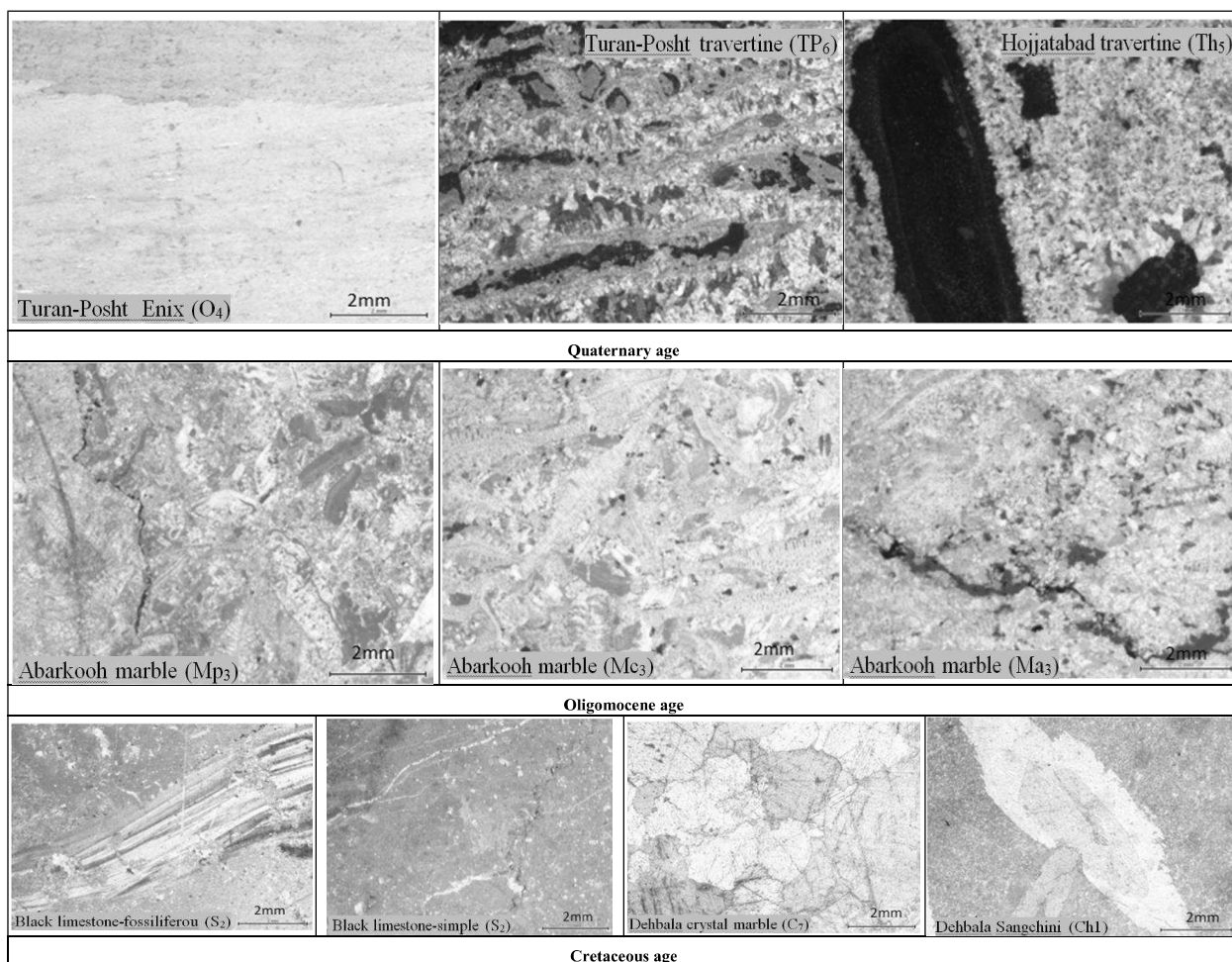
جهت مطالعه بافت و ویژگی سنگ‌شناسی، از نمونه‌ها مقطع نازک تهیه و مطالعات میکروسکوپی انجام گردید و نام‌گذاری نمونه‌ها به روش دانهام صورت گرفت (Dunham, 1962). شکل ۷ تصاویری از نمونه سنگ‌ها و جدول ۳ سنگ‌شناسی سنگ‌ها را در زیر میکروسکوپ نشان می‌دهد.

جدول ۲: تعداد آزمایش‌ها، تعداد نمونه‌ها و استانداردها مربوط به هر آزمایش.

Test	Sample shape	Number of samples tested	Test standard
Physical properties	Irregular	Each sample - 5 pieces	ASTM D5446 – 08
compressional Wave test	Cylindrical	Each sample - 3 tests	ASTM D2845-00
point load index	Cylindrical	Each sample -4 tests	ASTM D5731-ISRMS
Uniaxial compressive strength	Cylindrical	Each sample - 3 tests	ASTM D2938 – ISRM
Brazilian strength	Disc	Each sample - 3 tests	ASTM D3967
the Slake durability index of the solution in sulfuric acid in 15 cycles with pH=5.25	Irregular shape	Each sample - 10 pieces	ASTM D4644 – 08 – ISRM
the Slake durability index of the solution in carbonic acid in 15 cycles with pH=5.25	Irregular shape	Each sample - 10 pieces	ASTM D4644 – 08 – ISRM
Impact value	Irregular shape	Each sample - 1 test	IS 2386
Crushing strength	Irregular shape	Each sample - 1 test	ISRM – ASTM D2938
Micropetrographic description	Thin sections	Each sample – 1section	-
rock soundness test with sodium sulfate in 15 cycles	Irregular shape	Each sample - 10 pieces	ASTM C88
freezing- thaw test in 90 cycles	Irregular shape	Each sample - 4 pieces	-

جدول ۳: توصیف ویژگی های سنگ شناسی نمونه های مورد مطالعه.

name Commercial	Stone category Mineralogical composition	Texture	Stone name and characteristics
Sangchini Dehbala (Ch1)	Metamorphic Calcium carbonate	Metamorphic Texture Crystal marble (medium grain crystals)	Echinoderm fossils are about 5 to 7% and the rest of the medium-grained crystal text (about 100 to 200 microns) is composed of spar calcite.
Ashenaei Black limestone (s2)	Sediment Calcium carbonate	Chemical and biochemical Texture In marine environment conditions Name of Vexton Bioclast Rock (Biomicrite)	In black limestone, a number of layers are simple black stone and a number of other fossilized (flowered) black stone, each of which is described separately: Plain black limestone: Skeletal fragments (fossils) are scattered on a background of fine-grained calcite (micrite). In the sample of acetylolite, it can be seen that iron oxides and organic matter have accumulated along the surfaces of acetylolite. This stone sample has a non-destructive texture.
		Chemical and biochemical Texture In marine environment conditions The name of the Paxton rock	Flowering black limestone (fossilized): The rock has fossil fragments and intraclasts that float in a background of micrite.
		Chemical and biochemical In marine environment conditions Name of Greenstone bioclast (limestone with Plenty of fossils)	Abarkooh Parkahoei marble (Mp3): The main components of the stone include fossil fragments of foraminifera and algae. Due to the physical and chemical density, most of the grains interfere with each other and the grain boundaries (fossils) are damaged and are surrounded by spar cement.
Abarkooh marble Mc3 (Ma3 and Mp3)	Sediment Calcium carbonate	Biochemical Conditions for the formation of the marine environment Name of Greenstone rock bioclast (limestone with Plenty of fossils)	Abarkooh Cream Marble (Mc3): The main components of the rock are fossil fragments including foraminifera and algae that are scattered in a text of calcite crystals. It has overlapped due to the high density of grains. 100% of the rock is composed of calcium carbonate. A small amount of veins and stylolytic joints are observed in the rock, which reduces the strength of the rock.
		Biochemical Conditions for the formation of the marine environment Name of Bioclastic Paxton Rock (Limestone with Fossil)	Abarkooh Abanary Marble (Ma3): The main components of the rock are skeletal fragments including fossil grains of Framinfer type, red algae and intraclast. The mentioned components are scattered in the text of fine-grained limestone (micrite) and the main composition of the rock is chemically calcium carbonate (calcite).
Turan Posht Enix (O4)	Sediment Calcium carbonate	Chemical and layered texture Spring formation environmentHot water	The rock sample is composed of aragonite needle-shaped crystals that are observed as a layer and repeating in the rock. The name of travertine (a type of onyx) with a transparent appearance (crystallized lime) has no porosity.
Hojjatabad travertine (Th5)	Sediment Calcium carbonate	Chemical and porous Texture of pore type Spring formation environmentHot water	The calcite mineral forms a strip of rock text. (Repeated thin layers with calcite crystals that have a mosaic texture) Micritic layers (fine-grained calcites) are observed in parts of the rock. Crystals have grown in some parts of the specimen in the form of a fan.
Turan Posht travertine (Tp6)	Sediment Calcium carbonate	Chemical Texture, Porous and laminate The environment of formation of hot springs	Algae laminae (stromatulin algae) give the text of a rock in conjunction with sparse calcite crystals that have a fan-like fabric. The crystals in the rock are calcium carbonate (aragonite and calcite). There is a lot of porosity in the rock text along the surface of the laminae and between the laminae.
Dehbala crystal marble (C7)	Metamorphosis Calcium carbonate	Metamorphic Texture Crystal marble (coarse grain crystals)	This sample is composed entirely of coarse crystals (about 2 to 5 mm) of calcite. The grain boundaries in the rock are jagged.



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپی از مقاطع سنگ‌های کربناته

از آماده‌سازی مغزه‌ها، آزمایش‌های مقاومت در شرایط خشک بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است. آزمایش‌های مقاومت سنگ انجام شده شامل: آزمایش مقاومت تراکمی تک‌محوری، آزمایش مقاومت کششی برزیلین، بارگذاری نقطه‌ای، ارزش ضربه‌ای و ارزش فشاری می‌باشد. آزمایش ارزش ضربه‌ای با استاندارد IS 2386 برای تعیین مقاومت نسبی سنگ‌دانه‌ها در برابر شوک و ضربه‌های ناگهانی تعریف شده است. آزمایش ارزش فشاری با استاندارد ASTM D2938 سنجشی برای تعیین ویژگی خرد شدن مجموعه سنگ-ها یا به عبارتی مقاومت آن‌ها در برابر پودر شدن می‌باشد. معیار حاصل از این آزمایش را ارزش خرد شدن نامیده و بر حسب درصد بیان می‌شود.

۳-۲. آزمایش‌های انجام شده

در این تحقیق برای ارزیابی ویژگی‌های مهندسی مصالح سنگی آزمایش‌هایی انجام شد که از آن‌ها ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی و دوام سنگ تعیین گردید.

۳-۱-۲. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها که شامل وزن واحد حجم خشک (γ_d)، و اشباع (γ_{sat})، درصد تخلخل (n)، شاخص پوکی (e) یا درصد جذب آب (I_v) می‌باشد از روش استاندارد (ISRM, 1981) استفاده شده است.

برای تعیین مقاومت سنگ اولیه مغزه‌هایی به قطر ۴۷ میلی‌متر با استاندارد ASTM D4543 تهیه گردید که در جدول ۲ و شکل ۱۰ به تعداد آزمایش‌ها و نمونه‌های مربوط اشاره شده است. پس

اکسیدهای گوگرد و نیتروژن، منواکسید کربن و دی اکسید کربن و واکنش آن‌ها با سنگ‌ها، باعث انحلال و زوال‌پذیری سنگ‌ها می‌شود. به منظور بررسی انحلال و زوال‌پذیری نمونه‌ها و همچنین مقایسه اثر انحلالی محلول‌های اسید سولفوریک و اسید کربنیک، آزمایش دوام وارفتگی (شکل ۱۴)، براساس استاندارد ASTM D4644 - 08 تا ۱۵ چرخه در هر یک از این محلول‌ها با $PH=5.25$ انجام شده است.

آزمایش انجماد - آب شدن: از مهم‌ترین عوامل محیطی که باعث تغییر در ویژگی‌های مهندسی، مقاومت و طول دوام سنگ‌ها می‌شود. چرخه‌های انجماد - آب شدن است. آبی که در داخل حفرات و ریزترک‌های سنگ وجود دارد بعد از انجماد حدود ۹ درصد افزایش حجم خواهد داشت که باعث اعمال فشار به حفرات و ریزترک‌ها می‌شود (Bell, 2000). افزایش چرخه‌های انجماد - آب شدن باعث بزرگتر شدن و توسعه حفرات و ریزترک‌ها و در نتیجه سنگ ضعیف و سست تر و موجب کاهش دوام آن می‌شود. آزمایش انجماد - آب شدن تا ۹۰ چرخه در دمای -30 درجه سانتی‌گراد روی ۹ نمونه سنگ کربناته انجام شد.

۳-۳. نتایج و بحث

برای ارزیابی ویژگی‌های مهندسی مصالح سنگی آزمایش‌هایی انجام شد از نتایج آن‌ها ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی و دوام نمونه سنگ‌ها تعیین گردید. در جدول ۴ وزن واحد حجم خشک (γ_d)، اشباع (γ_{sat})، درصد جذب آب (I_v)، تخلخل (n) و سرعت موج (V_p) و در جدول ۵ نتایج مقاومت نمونه‌ها شامل شاخص بار نقطه‌ای (I_{s50})، مقاومت کششی (σ_t)، مقاومت فشاری (UCS)، ارزش ضربه‌ای، ارزش فشاری و در جدول ۶ شاخص دوام در آزمایش دوام وارفتگی در محلول اسید سولفوریک و اسید کربنیک در ۱۵ چرخه با PH یکسان، آزمایش سلامت سنگ با سولفات سدیم در ۱۵ چرخه و آزمایش انجماد - آب شدن در ۹۰ چرخه ارائه گردیده است.

نتایج میانگین مقادیر به دست آمده از آزمایش ویژگی‌های فیزیکی در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، تفاوت بین وزن واحد حجم خشک و اشباع نمونه‌ها، به استثنای نمونه‌های تراورتن خیلی کم است که این

در نتایج این دو آزمایش هرچه سنگ‌دانه‌ها، درصد بزرگتری را نشان دهند، به معنی این است که مقاومت کمتری در برابر ضربه و خرد شدن خواهد داشت.

برای تعیین سرعت صوت با استاندارد ASTM D2845-00، از دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج فشاری کمک گرفته شد روش کار این آزمایش ارسال امواج فشاری به داخل نمونه و اندازه‌گیری سرعت آن می‌باشد. به طور کلی یک ارتباط معکوس بین میزان تخلخل و سرعت موج وجود دارد. طبق کارهای فورمن تراکس (۱۹۷۵) ارتباطی خطی بین تخلخل و سرعت عبور موج در سنگ‌ها برای تخلخل‌های کمتر از ۳۵ درصد وجود دارد (نقل از Barton, 2007).

۳-۲-۲. آزمایش‌های شبیه‌سازی

در واقع هدف از انجام این آزمایش‌ها، شبیه‌سازی آزمایشگاهی شرایط محیطی حاکم بر مصالح سنگی به نحوی است که تا حد امکان نتایج حاصل منطبق بر واقعیت و قابل اطمینان باشند. آزمایش دوام شکستگی همچنین آزمایش سلامت سنگ و آزمایش انجماد - آب شدن از جمله آزمایش‌های شبیه‌سازی هستند که در روند انجام این تحقیق از آن‌ها استفاده شده است. *آزمایش سلامت سنگ:* واکنش‌های شیمیایی پس از به کارگیری سنگ در ساختمان، باعث پوکی و خرد شدن سنگ می‌گردد لذا افت وزنی کم در واکنش با سولفات‌ها نشان دهنده مقاومت آنها در برابر عوامل شیمیایی است. آزمایش سلامت سنگ در ۱۵ سیکل با سولفات سدیم با استاندارد ASTM C88 انجام گرفت. تغییرات وزن نمونه در چرخه تبلور نمک نشان دهنده پر شدن حفرات توسط نمک است که باعث افزایش وزن و در مرحله بعد فشار تبلور نمک باعث تخریب و کاهش وزن سنگ می‌شود (Angeli et al., 2007).

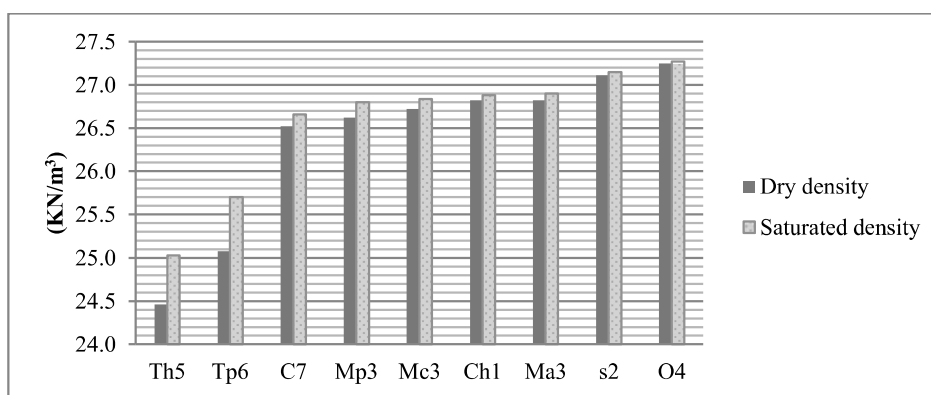
آزمایش شاخص دوام وارفتگی: شاخص دوام وارفتگی یک ویژگی مهندسی مهم در ارزیابی زوال‌پذیری سنگ‌ها در برابر عوامل هوازدگی شیمیایی و فیزیکی است که ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های کانی‌شناسی و مکانیکی سنگ‌ها دارد (Gupta and Ahmed, 2007). هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، میزان فرسایش، انحلال و خرد شدن سنگ در برابر هوازدگی کمتر است. در شهرهای بزرگ صنعتی، وجود آلاینده‌هایی مانند

وزن واحد حجم خشک و کمترین آن نیز مربوط به نمونه (Th₅) می‌باشد. در شکل ۹ مشاهده می‌شود نمونه (Tp₆) بیشترین و نمونه (O₄) کمترین مقدار درصد تخلخل و درصد جذب آب را دارا می‌باشند.

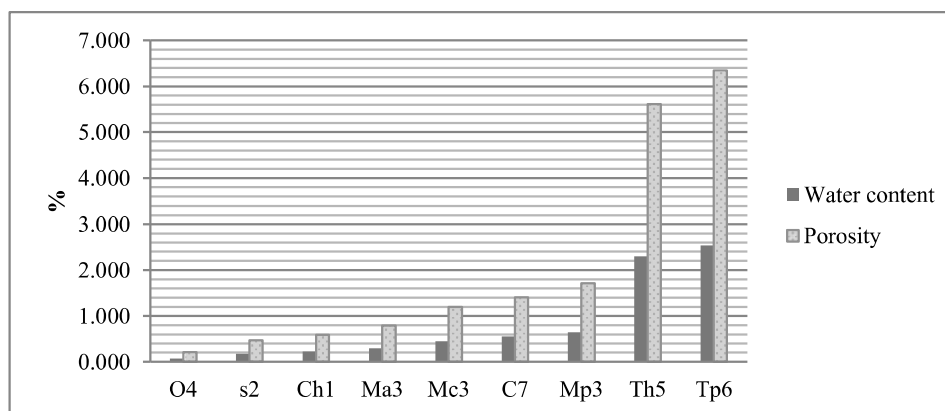
موضوع به دلیل تخلخل پایین نمونه‌هاست. وزن مخصوص نمونه‌ها متأثر از ترکیب کانی‌شناسی است که وزن مخصوص به نوبه خود روی وزن واحد حجم تاثیر می‌گذارد. با توجه به این موضوع در شکل ۸ دیده می‌شود که نمونه (O₄) که ۱۰۰٪ از بلورهای سوزنی شکل آراگونیت شکل گرفته دارای بیشترین

جدول ۴: میانگین نتایج ویژگی‌های فیزیکی و سرعت موج نمونه‌های مورد مطالعه.

The name of the stone	Sample number	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	I _v (%)	n (%)	V _p km/S
Sangchini Dehbala	Ch ₁	26.82	26.88	0.22	0.58	6.5
Ashenaei Black limestone	S ₂	27.11	27.15	0.17	0.47	6.8
Abarkooh marble (Abanary)	Mc ₃	26.72	26.84	0.45	1.20	6.1
Abarkooh marble (Cream)	Ma ₃	26.82	26.90	0.30	0.80	6.4
Abarkooh marble (Parkahoei)	Mp ₃	26.62	26.80	0.65	1.71	6.2
Turan Posht Enix	O ₄	27.25	27.27	0.077	0.21	6.3
Hojjatabad travertine	Th ₅	24.46	25.03	2.30	5.62	5.9
Turan Posht travertine	Tp ₆	25.08	25.71	2.54	6.35	5.4
Dehbala crystal marble	C ₇	26.52	26.66	0.55	1.41	5.8



شکل ۸: نمودار ستونی وزن واحد حجم خشک، اشباع نمونه‌ها.



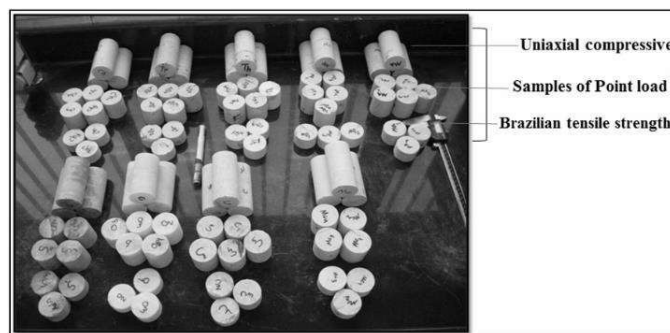
شکل ۹: نمودار ستونی درصد تخلخل و درصد جذب رطوبت نمونه‌ها.

آباد دارای ساختار تخلخل حفره ای و تراورتن توران پشت دارای تخلخل زیاد در متن سنگ در امتداد سطوح لامینه ها و بین لامینه ها) و در آخر مرمر کریستال (C7) (سنگ دگرگونی دارای بلورهای درشت کلسیت در حدود ۲ تا ۵ میلیمتر و ساختار سطح رخ در سه جهت) کمترین مقاومت را نشان می دهدند. حضور تخلخل، درزه های استیلولیت، رگچه ها و سطوح رخ، در سنگ های کربناته باعث پراکندگی نتایج شده است به عبارت دیگر می توان گفت که حضور ویژگی های فیزیکی (حفرات، خلل و فرج و ساختار)، ویژگی های مکانیکی سنگ ها را کنترل می کنند.

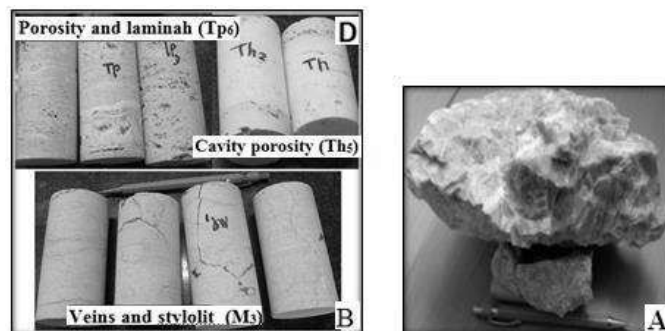
نتایج به دست آمده از آزمایش های مقاومتی (شامل مقاوت فشاری، مقاومت کششی، ارزش ضربه ای و ارزش فشاری) و شکل ۱۱ نشان می دهند از نظر مقاومت، سنگ های کربناته این تحقیق به ترتیب سنگ چینی (Ch₁) (سنگ دگرگونی دارای بلورهای متوسط کلسیت و بدون ساختار)، آهک سیاه (S₂) (دارای آثار استیلولیتی که در امتداد سطوح استیلولیت ها اکسیدهای آهن و مواد آلی تجمع یافته است) و سپس مرمریت (M₃) (به میزان کمی رگچه ها و درزه های استیلولیتی) بیشترین مقاومت و سنگ های دیگر مانند انیکس (O₄) (نوعی تراورتن فاقد تخلخل)، تراورتن (Th₅ و Tp₆) (تراورتن حجت

جدول ۵: میانگین نتایج ویژگی های مکانیکی نمونه های مورد مطالعه.

Sample number	IS50 (MPa)	σ_t (MPa)	UCS (MPa)	Compressive value %	Impact value %
Ch ₁	4.01	15.8	106	21.78	6.19
S ₂	3.48	11.02	59.95	29.67	10.92
Mc ₃	3.21	10.3	40.2	24.81	9.34
Ma ₃	2.89	10.66	30.6	26.87	8.49
Mp ₃	2.62	11.18	60.2	24.52	7.96
O ₄	2.08	7.42	43.07	37.82	17.07
Th ₅	2.01	8.75	34.68	36.52	13.04
Tp ₆	1.74	5.68	31.2	32.41	14.02
C ₇	1.40	5.52	28.45	50.32	33.03



شکل ۱۰: نمونه های آماده شده برای انجام آزمایش های مقاومت.



شکل ۱۱: نقاط ضعف در سنگ کربناته (شکل الف: وجود ۳ سطح رخ و سستی بلورهای درشت کلسیت در مرمر، شکل ب: وجود رگچه ها و استیلولیت در مرمریت و شکل د: خلل و فرج و لامینه در تراورتن.

نسبت ارتفاع به قطر ۲ الی ۲/۵ استفاده شده است. با توجه به طبقه‌بندی دیر و میلر (۱۹۶۶) سنگ‌ها بر اساس مقاومت تک‌محوری (جدول ۵) نمونه‌های Th_5 و TP_6 (۳۱/۲ Mpa) و Ma_3 (۳۰/۶ Mpa)، Mc_3 (۴۰/۲ Mpa)، نمونه‌های O_4 (۴۳ Mpa) و C_7 (۲۸/۵ Mpa) در رده سنگ‌هایی با مقاومت پایین (۲۸-۵۶ Mpa) و نمونه‌های Ch_1 (۱۰۶ Mpa)، S_2 (۵۹/۹ Mpa) و MP_3 (۶۰/۲ Mpa) در رده‌ی سنگ‌های با مقاومت متوسط (۵۶-۱۱۲ Mpa) قرار می‌گیرند. در نمونه C_7 (۲۸/۵ Mpa) به علت بلورهای درشت سست و سه جهت سطح رخ، کمترین مقاومت فشارشی و نمونه (MPa) Ch_1 (۱۰۶) به علت ریز بلور بودن و عدم وجود درزه، بیشترین مقاومت فشارشی را دارد.

با توجه به نتایج آزمایش ارزش ضربه‌ای و ارزش فشاری نشان داده شده در شکل ۱۲، بهترین عملکرد را Ch_1 و M_3 به خود اختصاص داده‌اند و سپس به ترتیب S_2 ، TP_6 ، Th_5 ، O_4 و در نهایت C_7 ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داده است.

نتایج آزمایش تعیین سرعت صوت در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش تخلخل سرعت موج کاهش یافته است که این روند در تمام نمونه‌ها به جز نمونه C_7 و O_4 مشاهده شده است، نمونه‌های Th_5 و TP_6 ، به علت تخلخل بیشتر سرعت موج کمتری داشته‌اند. در نمونه TP_6 به علت تخلخل زیاد در متن سنگ در امتداد سطوح لامینه‌ها و بین لامینه‌ها، سرعت موج کمتری نسبت به بقیه نمونه‌ها دارد. پایین بودن سرعت موج می‌تواند در نمونه O_4 به علت وجود بلورهای سوزنی شکل آراگونیت که به صورت لایه‌ای و تکرار شونده در سنگ قرار دارند و در نمونه C_7 به علت بلورهای درشت سست دارای ۳ جهت رخ باشد.

سنگ‌های کربناته در مقابل عوامل شیمیایی، استعداد خوردگی و انحلال‌پذیری زیادی دارند. واکنش‌های شیمیایی پس از به کارگیری سنگ در ساختمان، باعث پوکی و خورد شدن سنگ می‌گردد سنگ‌های که تخلخل کمتری دارند دارای دوام بهتری می‌باشند. لذا افت وزنی کم در واکنش‌های شیمیایی، نشان دهنده مقاومت آنها در برابر عوامل شیمیایی است. با توجه به

معدن مرمریت ابرکوه دارای مرمریت رنگ کرم، آب‌اناری و پرکاهویی می‌باشد که در مرمریت پرکاهویی (MP_3) اجزای اصلی سنگ توسط سیمان اسپاری در برگرفته شده‌اند و مقاومت فشاری بیشتری (۶۰/۲ Mpa) نسبت به مرمریت کرم (MC_3) (اجزای اصلی متشکل از خرده‌های فسیل در متنی از بلورهای کلسیت، ۴۰/۲ Mpa) و مرمریت آب‌اناری (Ma_3) (اجزای اصلی در متن گل‌آهگی دانه ریز (میکرایت) ۳۰/۶ Mpa) دارند. (در مرمریت‌ها به علت وجود میزان کمی رگچه‌ها و درزهای استیلولیتی باعث کاهش استحکام سنگ شده است).

آزمایش بارگذاری نقطه‌ای به صورت قطری با استاندارد ASTM D5731 انجام گرفت. نتایج بدست آمده در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به تقسیم‌بندی سنگ‌ها Broch and Franklin (1972) و بر مبنای شاخص مقاومت بار نقطه‌ای نمونه‌های Ch_1 (۴ Mpa)، Mc_3 (۳/۲ Mpa) و S_2 (۳/۵ Mpa) دارای مقاومت خیلی بالا (۱۰-۳ Mpa) و بقیه نمونه‌ها در رده سنگ‌های با مقاومت بالا (۱-۳ Mpa) می‌باشند.

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی برزیلین با استاندارد ASTM D3967 در جدول ۵ نشان داده شده است. نمونه‌های مرمر (C_7) و سنگ‌چینی (Ch_1) از نوع سنگ‌های دگرگونی هستند که نمونه C_7 (۵/۵ Mpa) به علت بلورهای درشت سست و سه جهت سطح رخ، کمترین مقاومت کششی و نمونه (MPa) Ch_1 (۱۵/۸) به علت ریز و متوسط بلور بودن و عدم وجود درزه و استیلولیت، بیشترین مقاومت کششی را دارد. نمونه (S_2) (۱۱ Mpa)، مرمریت‌ها (Ma_3 ، Th_5 ، O_4 ، TP_6) (۱۰/۳ و M_3)، از نوع سنگ‌های دگرگونی درجه پایین و دارای رگه‌ها و استیلولیت می‌باشند که باعث کاهش استحکام شده و در نتیجه مقاومت کششی پایین‌تری نسبت به سنگ‌چینی (Ch_1) دارند. تراورتن‌ها ($Th_5=8/7$ Mpa، $O_4=7/4$ ، $TP_6=5/7$)، نوعی سنگ آهک رسوبی حاصل از چشمه‌های کربناته با ساختار متخلخل (به غیر از انیکس (O_4)) می‌باشند که دارای مقاومت کششی کمتری نسبت به مرمریت‌ها و سنگ‌چینی هستند.

برای انجام آزمایش مقاومت تک محوری طبق روش پیشنهادی (۱۹۷۹) ISRM، از نمونه‌هایی به شکل استوانه‌ای با

تماس با اسید بیشتر شده در نتیجه مقدار انحلال افزایش می یابد.

شاخص دوام مرمر (شاخص دوام در اسید سولفوریک $C_7=92/8\%$ و شاخص دوام در اسید کربنیک $C_7=93/4\%$) نسبت به نمونه های دیگر کاهش بیشتری نشان می دهد این موضوع به دلیل، داشتن بلورهای درشت کلسیت دارای سه سطح رخ باعث سستی نمونه در اثر برخورد فیزیکی می باشد، پایین تر بودن شاخص دوام اکثر نمونه های کربناتی در اسید سولفوریک نسبت به اسید کربنیک با PH یکسان، نشان می دهد که اثر انحلال اسید سولفوریک کمی بیشتر از اسید کربنیک بوده است. با توجه به نتایج آزمایش دوام در محلول های اسید سولفوریک و اسید کربنیک، سنگ چینی ده بالا و مرمریت ها نسبت به مرمر و تراورتن ها مناسب ترین سنگ برای استفاده در مناطق با اتمسفرهای آلوده هستند.

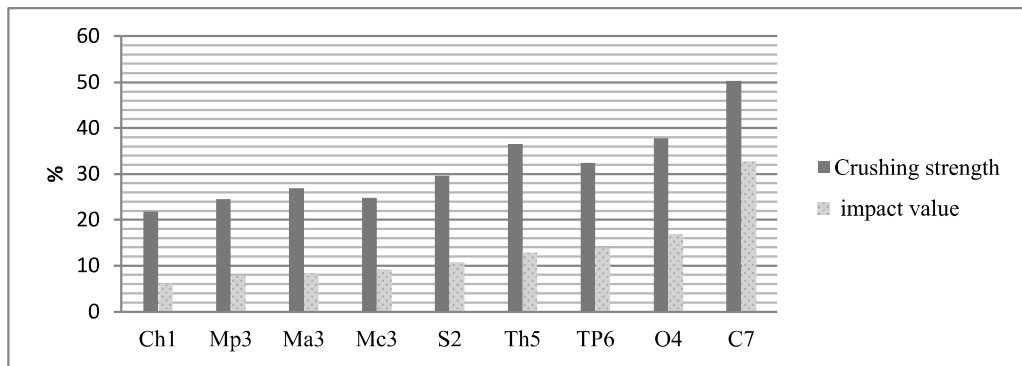
نتایج آزمایش انجماد و آب شدن نشان می دهد با افزایش چرخه ها، افت وزنی کاهش پیدا کرده است. همچنین نتایج نشان می دهد تخلخل موثر نقش مهمی در آزمایش انجماد - آب شدن داشته است. همان طور که در جدول ۶ مشاهده می شود بیشترین افت وزنی در نمونه TP_6 ($98/56\%$) به علت تخلخل زیاد در متن سنگ در امتداد سطوح لامینه ها و بین لامینه ها بوده است. Mc_3 ، Mp_3 و S_2 ($99/97\%$) ، بیشترین مقاومت را در برابر انجماد - آب شدن نشان می دهند. در این آزمایش دو نوع افت وزنی در شکل ۱۵ مشاهده می شود که افت تدریجی از چرخه ۱ تا ۹۰ در نمونه های O_4 و C_7 مشاهده می شود که به علت تخلخل حفره ای و لامینه ها در تراورتن، بلورهای درشت سست دارای سه سطح رخ در مرمر بوده و افت وزنی ناگهانی از چرخه ۱۰ به بعد در نمونه Mp_3 از چرخه ۶۰ به بعد در نمونه های Ch_1 و Ma_3 به صورت شکستگی سطحی (پولکی) مشاهده شده است.

نتایج آزمایش شبیه سازی (دوام شکستگی، انجماد - آب شدن و سلامت سنگ) نمونه های تراورتن و مرمر کریستال آسیب پذیرترین و نمونه های سنگ چینی، آهک سیاه و مرمریت مقاوم ترین سنگ های آهکی در برابر چرخه های دوام به حساب می آیند.

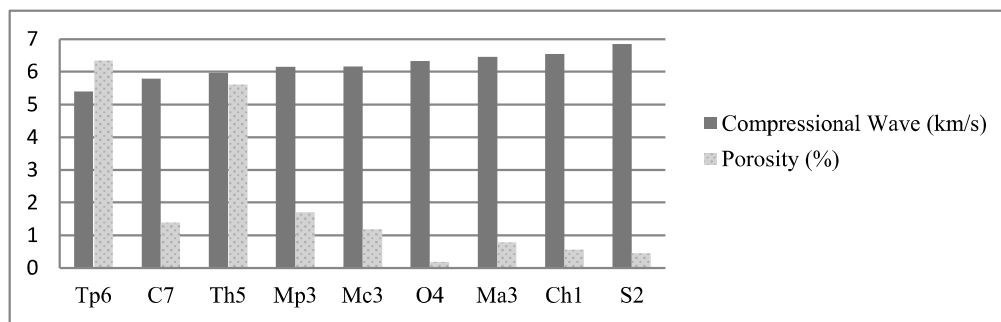
در جدول ۶ نتایج حاصل از دوام شکستگی با محلول اسید سولفوریک و اسید کربنیک، آزمایش سلامت سنگ با سولفات سدیم در ۱۵ چرخه و آزمایش انجماد - آب شدن در ۹۰ چرخه ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمایش شبیه سازی (دوام شکستگی، سلامت سنگ و انجماد - آب شدن) نمونه های TP_6 و Th_5 ، (به علت ساختار لامینه ای و متخلخل) و نمونه C_7 (به علت بلورهای درشت سست در ۳ سطح رخ باعث سستی نمونه در اثر برخورد فیزیکی می شود) آسیب پذیرترین و نمونه های Ch_1 ، S_2 و M_3 مقاوم ترین سنگ های آهکی در برابر چرخه های دوام به حساب می آیند.

نتایج آزمایش سلامت سنگ نشان می دهد در تراورتن ها ($TP_6=94/7\%$ ، $Th_5=94/9\%$) به علت تخلخل بیشترین تخریب و مرمر ($C_7=99/2\%$) به علت بلورهای درشت سست در سه جهت رخ می تواند عامل کاهش شاخص دوام در سولفات سدیم باشد.

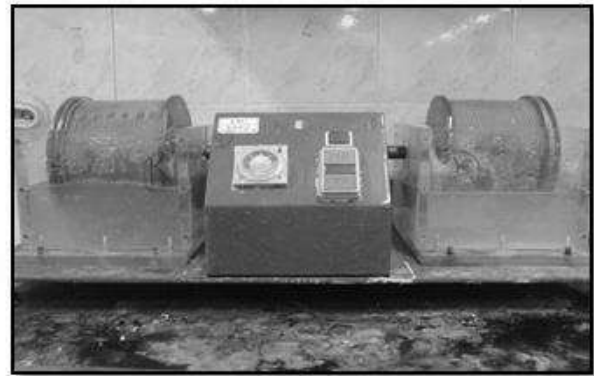
نتایج به دست آمده از محاسبه شاخص دوام وارفتگی (Id_{15}) در جدول ۶ آورده شده است. شاخص دوام وارفتگی نمونه سنگ چینی (Ch_1) (شاخص دوام در اسید کربنیک $Ch_1=99\%$ و شاخص دوام در اسید سولفوریک $Ch_1=98/8\%$) در محلول های اسیدی مقاوم تر است از طرف دیگر، شاخص دوام وارفتگی نمونه های مرمر و تراورتن (شاخص دوام در اسید کربنیک $Th_5=96/13\%$ ، $TP_6=95/98\%$ و شاخص دوام در اسید سولفوریک $Th_5=96/79\%$ ، $TP_6=95/88\%$) در محلول های اسیدی مقاوم کم تر و دچار انحلال بیشتری شده است. در تراورتن ها هر چه مقدار درصد تخلخل بیشتر باشد سطح



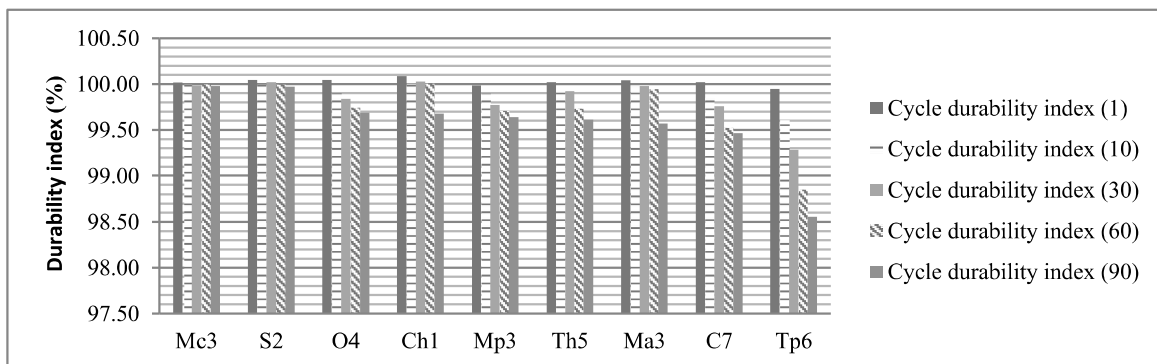
شکل ۱۲: نتایج آزمایش ارزش ضربه‌ای و فشاری سنگ‌دانه‌های سنگ ساختمانی.



شکل ۱۳: شکل مقایسه سرعت امواج فشاری برحسب km/s و درصد تخلخل در نمونه‌های سنگ ساختمانی.



شکل ۱۴: دستگاه تعیین شاخص دوام وارفتگی و نمونه‌های تهیه شده برای آزمایش.



شکل ۱۵: نمودار ستونی مقایسه نتایج بدست آمده از آزمایش انجماد - آب شدن از چرخه ۱ تا ۹۰.

جدول ۶: میانگین نتایج آزمایش های دوام وارفنگی، سلامت سنگ و انجماد - آب شدن.

The name of the stone	Durability index in acidic solution (Id ₁₅) %		Durability index in rock soundness testing with sodium sulfate (Id ₁₅) %	Durability index in freezing-thaw test (Id ₉₀) %
	sulfuric acid PH=5.25	Carbonic acid PH=5.25		
Cycle number	Cycle 15	Cycle 15	Cycle 15	Cycle 90
Ch ₁	98.79	99.02	99.68	99.68
S ₂	98.74	98.14	99.91	99.97
Mc ₃	98.33	98.15	99.99	99.98
Ma ₃	98.18	98.12	99.51	99.57
Mp ₃	97.86	97.98	99.96	99.64
O ₄	97.06	96.94	99.70	99.69
Th ₅	96.79	96.13	94.91	99.61
Tp ₆	95.88	95.98	94.75	98.56
C ₇	92.80	93.37	99.16	99.47

۴. امتیازبندی سنگ های کربناته جنوب غرب یزد

در این تحقیق آزمایش های زیادی در زمینه ویژگی های فیزیکی، مقاومت، مکانیکی و دوام انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت برای امتیازبندی سنگ از آزمایش هایی که تاثیر زیادی در امتیازبندی سنگ و اثر دیگر آزمایش ها را در خود نشان می دهند، مورد استفاده قرار گرفت.

برای ویژگی های فیزیکی سنگ درصد جذب آب مورد استفاده قرار گرفته است. درصد جذب آب رابط مستقیم با درصد تخلخل دارد که به نوبه خود روی دیگر آزمایش ها مثل مشخصات فیزیکی، سرعت موج و دوام تاثیر می گذارد با افزایش تخلخل سرعت موج کاهش می یابد که این روند در تمام نمونه ها به جز مرمر و انیکس (به علت ساختار میکروسکوپی سنگ) مشاهده شده است. پایین بودن سرعت موج می تواند در انیکس به علت وجود بلورهای سوزنی شکل آراگونیت که به صورت لایه ای و تکرار شونده در سنگ قرار دارند و در مرمر کریستال به علت بلورهای درشت سست دارای ۳ جهت رخ باشد. برای آزمایش های مقاومت و مکانیکی سنگ به علت عدم تکرار و همخوانی نتایج آزمایش ارزش ضربه ای و ارزش فشاری با سایر آزمایش های مقاومت (آزمایش تک محوری و مقاومت کششی) از آن دو آزمایش برای امتیازبندی استفاده نشده است.

برای آزمایش دوام سنگ از آزمایش دوام شکستگی در محلول اسیدی، آزمایش سلامت سنگ و آزمایش انجماد - آب شدن در این تحقیق استفاده شده، با توجه به این که کربنات کلسیم کانی اصلی تشکیل دهنده نمونه های کربناتی مورد مطالعه می - باشد و سنگ های کربناته در مقابل عوامل شیمیایی، استعداد خوردگی و انحلال پذیری زیادی دارند، از آزمایش دوام شکستگی که بیشترین افت شاخص دوام را نشان می دهد برای امتیاز بندی دوام سنگ های کربناته مورد استفاده شده است.

آزمایش های ارزش ضربه ای، شاخص دوام و افت وزنی در سولفات با معیارهای پیشنهادی وزارت راه و مسکن و شهرسازی (۱۳۸۸) برای سنگ های آهکی و هم چنین با معیار پیشنهادی امینی (۱۳۸۵) برای مصالح سنگی، مورد بررسی قرار گرفت که با نتایج امتیازبندی سنگ ها در این تحقیق همخوانی دارد. برای افت وزنی سولفات سدیم اکثریت سنگ ها در محدوده بسیار قوی (کمتر از ۰.۵٪)، به جز نمونه Th₅ = ۹۴/۷ و Tp₆ = ۹۴/۹ در محدوده خوب (بین ۰.۸ تا ۱.۸٪)، قرار می گیرند. برای شاخص دوام، همه سنگ ها در محدوده بسیار قوی (بالای ۹۵٪)، به جز نمونه C₇ = ۹۳٪ در محدوده خوب (بین ۹۵ تا ۹۰٪)، قرار می گیرند. برای آزمایش ارزش ضربه ای نمونه Ch₁ و M₃ در محدوده بسیار قوی (کمتر از ۱۰٪) و نمونه های S₂, O₄, Th₅, TP₆ در محدوده خوب

بیشتر از وزن واحد حجم است هر چه درصد جذب آب افزایش یابد دوام در زمان مشابه کاهش می یابد بنابراین سنگ‌های با جذب آب کمتر از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. در این تحقیق ویژگی‌های مهندسی سنگ را بر اساس درجه اهمیت در جدول ۷ و ۸ امتیازبندی و سپس نتایج امتیاز هر سنگ در جدول ۹ تعیین گردید.

بین ۱۰ تا ۲۰٪) و فقط نمونه $C7=7.33$ در محدوده متوسط (بین ۲۰ تا ۳۵٪) قرار دارد. مبنای امتیازدهی براساس آئین نامه انتخاب سنگ برای موج شکن‌ها و سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد، اما جدول ۷ پیشنهاد این تحقیق است. اثر وزن واحد حجم خودش را در دوام نشان می دهد برای سنگ‌های ساختمانی اهمیت دوام و مقاومت،

جدول ۷: امتیازبندی سنگ براساس ویژگی‌های مهندسی (میرجلیلی، ۱۳۹۳).

Engineering Characteristics	Description	Excellent	Good	Medium	Weak
Water content (%)	Range	0-2	2-3	3-5	More than 5
	Score	25	20	15	10
Unit weight volume (kN/m ³)	Range	More than 24	22-24	18-22	Less than 18
	Score	15	10	5	3
Compressive strenght (MPa)	Range	More than 50	40-50	30-40	Less than 30
	Score	20	15	10	4
Tensile strength (MPa)	Range	More than 20	15-20	10-15	Less than 10
	Score	20	15	10	4
Durability (%)	Range	Less than 1%	1%-2%	3%-2%	More than 3%
	Score	20	15	10	4

جدول ۸: رده بندی سنگ بر اساس جمع امتیازات از جدول ۷.

Total score	75-100	50-75	25-50	0-25
Description	Excellent	Good	Medium	Weak

جدول ۹: نتایج امتیازبندی سنگ‌های کربناته جنوب غرب یزد.

Stone number and symbol	The name of the stone	Water content (%)	Unit weight volume (kN/m ³)	Compressive strenght (MPa)	Tensile strength (MPa)	Durability (%)	Total score	Description
Ch ₁	Sangchini Dehbala	25	15	20	15	15	90	Excellent
S ₂	Ashenaei Black limestone	25	15	20	10	15	85	Excellent
Ma ₃	Abarkooh marble (Abanary)	25	15	10	10	15	75	Good
Mc ₃	Abarkooh marble (cream)	25	15	15	10	15	80	Excellent
Mp ₃	Abarkooh marble (Parkahoei)	25	15	20	10	10	80	Excellent
O ₄	Turan Posht Enix	25	15	15	4	10	69	Good
Th ₅	Hojjatabad travertine	20	15	10	4	4	53	Good
Tp ₆	Turan Posht travertine	20	15	10	4	4	53	Good
C ₇	Dehbala crystal marble	25	15	4	4	4	52	Good

سپس نمونه های استوانه ای به قطر ۴۷ میلی متر با استفاده از دستگاه مغزه گیر آزمایشگاهی تهیه گردید برای ارزیابی ویژگی های مهندسی مصالح سنگی آزمایش های متعددی انجام شد که از آن ها ویژگی های فیزیکی، مقاومتی و دوام سنگ تعیین گردید. این آزمایش ها شامل: تعیین ویژگی های فیزیکی (هر نمونه ۵ قطعه نامنظم)، سرعت موج (هر نمونه ۳ آزمایش)، مقاومت بارنقطه ای (هر نمونه ۴ عدد)، مقاومت تراکمی تک محوری (هر نمونه ۳ آزمایش)، مقاومت کششی برزیلین (هر نمونه ۳ آزمایش)، شاخص دوام شکستگی در محلول اسید سولفوریک و اسید کربنیک در ۱۵ چرخه با PH یکسان (هر نمونه ۱۰ قطعه)، ارزش ضربه ای (هر نمونه ۱ آزمایش)، ارزش فشاری (هر نمونه ۱ آزمایش)، بررسی مقاطع میکروسکوپی (هر نمونه ۱ مقطع)، سلامت سنگ با سولفات سدیم در ۱۵ چرخه (هر نمونه ۱۰ قطعه) و آزمایش ذوب و انجماد در ۹۰ چرخه (هر نمونه ۴ قطعه) می باشد. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از آزمایش ها، سنگ ها بر اساس ویژگی های مهندسی سنگ بر اساس درجه اهمیت امتیازبندی گردید.

- بر اساس مطالعات سنگ شناسی سنگ های کربناته معادن جنوب غرب یزد نشان می دهد که سنگ چینی ده بالا (به سن کرتاسه) دارای بلورهای متوسط کلسیت و مرمر کریستال ده بالا (به سن کرتاسه) دارای بلورهای درشت در حدود ۲ تا ۵ میلی متر، که هر دو از نوع بافت آهک کریستالین و دگرگونی می باشند. آهک سیاه ده بالا (به سن کرتاسه) و مرمریت ابرکوه (به سن الیگومیوسن) از بافت شیمیایی و بیوشیمیایی در شرایط دریایی تشکیل یافته اند و دارای درزه های استیلولیت می باشند و همچنین ۳ نوع سنگ آهک رسوبی (به سن کواترنر) دارای بافت شیمیایی شامل تراورتن حجت آباد و تراورتن توران پشت دارای بلورهای کلسیت و تخلخل زیاد ولی انیکس توران پشت دارای بلورهای سوزنی شکل آراگونیت و فاقد تخلخل می باشند. دو نمونه تراورتن نسبت به نمونه های دیگر دارای تخلخل زیاد و با توجه به اندازه حفرات و اتصال آن ها به هم دارای

بر اساس نتایج ذکر شده در جدول ۹ با توجه به امتیاز کل هر سنگ و امتیاز آن برای هر ویژگی جهت کاربرد در پروژه های مهندسی و ساختمانی می توان تصمیم گیری نمود. با توجه به نتایج امتیازبندی ویژگی های مهندسی سنگ ها (جدول ۹) سنگ چینی و سنگ آهک سیاه از لحاظ ویژگی های مهندسی به غیر از مقاومت کششی دارای بیشترین امتیاز هستند. انیکس و مرمریت ها از لحاظ درصد جذب آب و وزن واحد حجم دارای بیشترین امتیاز ولی از نظر مقاومت و دوام دارای امتیاز کمتری هستند. انیکس توران پشت از لحاظ ویژگی های مهندسی شبیه مرمریت ها هست ولی دارای دوام و مقاومت کششی کمتری نسبت به مرمریت می باشد. زاد سر و فضلیان (۱۳۸۵) خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ مرمر سبز (انیکس) توران پشت را بررسی و با استاندارد ASTM C503-89 مقایسه نمودند نتایج نشان داد مدول گسیختگی و مقاومت خمشی کمتر از مقدار معین شده در استاندارد دارد ولی دارای مقاومت فشاری، جذب آب و وزن مخصوص مناسب بوده و از این نظر از حد استاندارد تجاوز نمی کند. تراورتن ها از لحاظ وزن واحد حجم دارای بیشترین امتیاز ولی از لحاظ درصد جذب آب، مقاومت و دوام دارای امتیاز کمتری هستند. مرمر کریستال از لحاظ وزن واحد حجم و درصد جذب آب دارای بیشترین امتیاز ولی از لحاظ مقاومت و دوام دارای کمترین امتیاز است و این موضوع به علت بلورهای کلسیت سست و دارای ۳ سطح رخ می باشد که بیشترین تاثیر را در مقاومت و دوام سنگ داشته است.

۵. نتیجه گیری

- بررسی ویژگی های زمین شناسی مهندسی و امتیازبندی سنگ های کربناته معادن جنوب غرب یزد نوآوری این تحقیق است. در این تحقیق از ۵ معدن جنوب غرب یزد، ۷ نوع سنگ کربناته از رخنمون هایی به سن کواترنر، الیگومیوسن و کرتاسه انتخاب گردید. برای تهیه نمونه های مورد نیاز جهت انجام آزمایش ها، جمعا ۲۷ عدد بلوک سنگی با ابعاد تقریبی ۲۰×۳۰×۲۰ cm جمع آوری شد

تخلخل که تشکیل شده از بلورهای سوزنی شکل آراگونیت به صورت لایه‌ای و تکرار شونده و دارای ساختار لایه‌ای (M₃=۷۸٪) (نوعی سنگ دگرگونی بدون قابلیت تشخیص بلور و اجزای اصلی سنگ، خرده‌های فسیلی به علت تراکم زیاد دانه‌ها در یکدیگر تداخل نموده است، لازم به ذکر هست وجود رگه‌ها، استیلولیت و فسیل‌ها است که زیبایی خاصی به این سنگ‌ها می‌بخشد)، سنگ آهک سیاه (S₂=۸۵٪) (دارای آثار استیلولیت که در امتداد سطوح استیلولیت‌ها اکسید آهن و مواد آلی تجمع یافته) و در نهایت سنگ چینی (Ch₁=۹۰٪) (سنگ دگرگونی متوسط بلور در اثر سرد شدن سریع و عدم ساختار سنگ) می‌باشند. لازم به ذکر هست ساختار و ژنز ویژه سنگ‌های معدن سنگ چینی دهبالا و نیز دخالت عوامل زمین‌شناسی باعث شده تا کیفیت آن‌ها کاهش یافته و در نتیجه کوپ‌دهی معدن نیز کاهش یافته است.

۶. تشکر و قدردانی

در پایان از دکتر محسن رنجبران گرامی از دانشگاه تهران به خاطر تفسیر مقاطع میکروسکوپی تشکر و قدردانی می‌گردد.

جذب آب بسیار زیاد نیز می‌باشند که با مشاهدات میکروسکوپی مقاطع نازک سنگ متناسب است.

- با توجه به این که کربنات کلسیم کانی اصلی تشکیل دهنده نمونه‌های کربناتی مورد مطالعه می‌باشد در آزمایش دوام شکستگی، نمونه‌ها تحت تاثیر محلول اسیدی قرار گرفته و بیشترین افت شاخص دوام را نسبت به آزمایش‌های انجماد - آب شدن و سلامت سنگ، نشان می‌دهند و نتایج نشان داد سنگ‌چینی، آهک سیاه و مرمریت‌های ابرکوه نسبت به مرمر کریستال و تراورتن‌ها مناسب‌ترین سنگ‌ها برای استفاده در مناطق با اتمسفر آلوده هستند.
- نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت سنگ نشان می‌دهند به ترتیب سنگ‌چینی (Ch₁)، آهک سیاه (S₂) و سپس مرمریت (M₃) بهترین عملکرد و سنگ‌های دیگر مانند انیکس (O₄)، تراورتن (Th₅ و Tp₆) و در آخر مرمر کریستال (C₇) ضعیف‌ترین عملکرد را در آزمایش‌های مقاومت سنگ نشان می‌دهند. حضور تخلخل، درزه‌های استیلولیت، رگچه‌ها و سطوح رخ، در سنگ‌های کربناته باعث پراکندگی نتایج شده است به عبارت دیگر می‌توان گفت که حضور ویژگی‌های فیزیکی (حفرات، خلل و فرج و ساختار)، ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌ها را کنترل می‌کنند.

- مقایسه امتیازبندی سنگ بر اساس ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های کربناته (جدول ۹) نشان می‌دهد که سنگ‌ها بر اساس امتیازبندی به ترتیب شامل: مرمر کریستال (C₇=۵۲٪) (سنگ دگرگونی دارای بلورهای درشت سست در حدود ۲ تا ۵ میلیمتر در ۳ سطح رخ، در اثر سرد شدن تدریجی باعث کاهش مقاومت و دوام سنگ شده است در معدن با پودر کردن مرمر کریستال، پودر سنگ تهیه می‌شود) و سپس تراورتن توران-پشت (Tp₆=۵۳٪) (به علت تخلخل زیاد در متن سنگ و در امتداد سطوح لامینه‌ها)، تراورتن حجت آباد (Th₅=۵۳٪) (به علت ساختار تخلخل حفره‌ای)، انیکس (O₄=۶۹٪) (نوعی تراورتن با ظاهر شفاف و فاقد

منابع

- امینی، م، ۱۳۸۵. ارزیابی عملکرد سنگ در موج شکن های توده سنگی سواحل شمالی خلیج فارس، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- تلخابلو، م.، . ارائه معیار مناسب برای انتخاب سنگ های مناسب جهت احداث موج شکن های جنوب ایران. رساله دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- زادسره، ه.، فضلیان، ع.، ۱۳۸۵. بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ های مرمر ایران و مقایسه آن با استاندارد ASTM. دومین همایش منطقه ای مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سوادکوه.
- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۶۱. نقشه زمین شناسی آباده. مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰.
- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۱. نقشه زمین شناسی خضرآباد. مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰.
- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۹. نقشه زمین شناسی یزد. مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰.
- سحابی، ف.، ۱۳۸۵. سنگ شناسی رسوبی. انتشارات دانشگاه تهران.
- صادقی، ع.، ۱۴۰۰. ارزیابی دوام مصالح تولیدی از سنگ های کربناتی زون البرز مرکزی و کاربرد آن ها در مخلوط های آسفالتی. رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس
- فضلیان، ع.، ۱۳۸۳. تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ های تزئینی نرم و رقابت پذیری در ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس. قبادی، م.ح.، خانلری، غ.، ر.، محسنی، م.، کارگریان، س.، ۱۳۹۰. مطالعه خواص مهندسی تراورتن ها (مطالعه موردی). هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه شاهرود.
- قبادی، م.ح.، محسنی، ح.، رسولی فرج، م. ح.، ۱۳۸۸. مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگ آهک سازند آسماری در شمال شرق مسجد سلیمان. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد دوم، شماره ۱ و ۲، صفحات ۱ تا ۱۸.
- کارگریان، س.، قبادی، م.ح.، محسنی، م.، ۱۳۹۰. مطالعه خواص مهندسی مرمرها (مطالعه موردی). هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه شاهرود.
- کریمی، ز.، ۱۴۰۰. بررسی اثر شرایط محیط رسوبی بر خصوصیات زمین شناسی مهندسی سازند لار در البرز مرکزی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس
- موسوی حرمی، س.، ر.، محبوبی، ا. (مترجمین)، ۱۳۸۵. موریس ای تاگر: سنگ شناسی رسوبی. جهاد دانشگاهی مشهد.
- موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۰. سنگ های ساختمانی - مرمریت - ویژگی ها، تجدیدنظر اول. استاندارد ملی شماره ۵۶۹۶.
- موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۹۰. واژه نامه سنگ ساختمانی، تجدیدنظر اول. استاندارد ملی شماره ۸۲۲۸.
- میرجلیلی، ط.، ۱۳۹۳. بررسی تاثیر ویژگی های زمین شناسی مهندسی سنگ دانه های آهکی روی خصوصیات سنگ های مصنوعی. پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ناصری، ع.، ۱۳۷۶. تعیین معیارهای مناسب برای کاربرد سنگ در احداث سازه های دریایی - جنوب شرق ایران (چابهار). پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- نیکودل، م.، ر.، ۱۳۶۹. مطالعه معیارهای شناخت زوال پذیری سنگ. پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۸. آئین نامه کاربرد سنگ در موج شکن ها و سازه های حفاظت، مرکز نشر پژوهشکده حمل و نقل، تهران.
- وزارت مسکن و شهرسازی معاونت امور مسکن و ساختمان، ۱۳۸۹، مصالح و فرآورده های ساختمانی، مقررات ملی ساختمان، نشر توسعه ایران.

Ajalloeian, R., Kamani, M. 2019. An investigation of the relationship between Los Angeles abrasion loss and rock texture for carbonate aggregates. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78: 1555-1563.

- Angeli. M., Bigas. J., Benavente. D., Menendez. B., Hebert. R., David. C., 2007. Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage. *Environmental Geology*, 52: 205-213.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), C503-89., 1990. Standard specification for marble dimension stone. Philadelphia, Vol:08.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), C88-90., 1997. Standard test method for soundness of aggregate by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. *Annual Book ASTM Standards*, 4: 37-42.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), D2845-00., 2000. Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock, designation.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), D3967-95a., 2001. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, Designation,
- ASTM (American Society for Testing and Materials), D2938., 2002. Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), D4644., 1998. Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), D5731-95., 2001. Standard test method for determination of the point load strength index of rock, Designation.
- Barton, N., 2007. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. Taylor & Francis/Balkema.
- Bell, F.G., 1998. A survey of the physical properties of some carbonate rocks. *Bulletin of International Association Engineering Geology*, 24: 105-110.
- Bell, F.G., 2000. *Engineering Properties of Soils and Rocks*. Blackwell Science, 482 p.
- Benavente, D., Garcia del curba, M.A., Fort, R., Ordonez. S., 2004. Durability estimation of porous building stones from pore and strength, *Engineering Geology*, 74: 113- 127.
- Broch, E., Franklin, J.A., 1972. The point load test strength test. *International journal of Rock mechanics and Mineral Science*, 9: 669-697.
- Chafetz, H.S., Folk, R.L., 1984. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed Constituents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54(1): 289-316.
- Deere, D.U., Miller, R., 1966. Engineering classification and index properties for intact rock. DTIC Document, P 327.
- Dunham, R.G., 1962. Classification of carbonate rocks according to deposition texture. In W.E. Ham(Ed.): *Classification of Carbonate Rocks*, A A P G Mem. 1:108- 121.
- Gupta, V., Ahmed, I., 2007. The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India. *Engineering Geology*, 95(3): 79-87.
- Hadi, F., 2018. Geomechanical characterizations and correlations to reduce uncertainties of carbonate reservoir analysis. *Doctoral Dissertations*. 2674.
- ISRM, Commission on Standartization of Laboratory and Field Tests., 1979. Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 16: 135-140.
- ISRM, Rock characterization., 1981. In: Brown ET (Ed.): *Testing and Monitoring - ISRM suggested methods*. Oxford, UK: Pergamon Press. 211p.
- Kamani, M., Ajalloeian, R. 2019. Evaluation of the mechanical degradation of carbonate aggregate by rock strength tests, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11, 121-134.
- Liu, Q., Zhao, Y., Zhang. X. 2019. Case study: Using the point load test to estimate rock strength of tunnels constructed by a tunnel boring machine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 78, 1727-1734.
- Moshanski, V.A., Parabouchev, I.A., 1981. The nature of strength and deformability of weak carbonaceous rocks, *Proceedings of the International Symposium on Weak Rocks*, Vol:1, pp. 326-333.
- Ross, D., Butlin, R., 1990. *Durability Tests for Building Stone*, BR141, Gaston, UK, BRE report.
- Siegesmund, S., Sneathlge, R., 2011. *Stone in Architecture*. Fourth Edition, Springer-Verlag, 561p.
- Sims, I., 1991. Quality and durability of stone for construction, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24: 67-73.