

## معرفی شاخص جدید سنگدانه (AI) با استفاده از ویژگی‌های پتروگرافی و ژئومکانیکی

(مطالعه موردی: سنگ آهک‌های استان همدان)

غلامرضا خانلری<sup>۱\*</sup>، فاطمه ناصری<sup>۲</sup>، آوا عثمان پور<sup>۳</sup>

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۰ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۴/۰۲

### چکیده

سنگدانه‌ها مصالحی هستند که بطور وسیع در صنعت بتن و احداث سازه‌های بتنی، اساس و زیر اساس جاده و راه آهن بکار می‌روند. استان همدان دارای منابع وسیعی از سنگ آهک است که این امر ارزیابی ویژگی‌های آنها را بمنظور کاربرد در پروژه‌های عمرانی مختلف ضروری می‌سازد. در این پژوهش، با استفاده از پارامترهای سنگدانه (ارزش ضربه، ارزش سایش لس آنجلس و ارزش خردشوندگی) و بررسی پتروگرافی آنها، سنگ‌های آهکی استان را به لحاظ کاربری در پروژه‌های با حساسیت‌های مختلف تقسیم بندی نموده و این طبقه بندی را شاخص سنگدانه (AI) نامیدیم. سپس این پارامتر بر سرعت موج P تقسیم شده و به عنوان شاخص تعدیل شده سنگدانه (AAI) معرفی شده است. در نهایت پارامتر یاد شده با استفاده از رگرسیون‌های تک متغیره و چند متغیره به روش بهترین زیرمجموعه و بر اساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه تخمین زده شده است. در رگرسیون تک متغیره، تنها پارامتر عدد واجهش چکش اشمیت با ضریب تعیین کمتر از ۵۰ درصد برای تخمین این پارامتر مناسب نبوده، در حالیکه در روش رگرسیون چند متغیره با انتخاب بهترین پارامترها (سرعت موج P، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و دانسیته خشک) و حذف پارامترهای نامناسب، معادله‌ای با سطح معناداری ۹۹ درصد بدست آمده است که بیانگر قابل اطمینان بودن معادله ارائه شده است.

**کلید واژه‌ها:** سنگ آهک‌های استان همدان، پارامترهای سنگدانه، ویژگی‌های پتروگرافی، فیزیکی و مکانیکی، رگرسیون تک متغیره و چند متغیره.

۱. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان [Khanlari\\_reza@yahoo.com](mailto:Khanlari_reza@yahoo.com)

۲. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳. کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

البته تمامی آن‌ها نیاز به ابزار مخصوص و تهیه دقیق و زمان‌بر نمونه دارند. بنابراین می‌توان با انجام آزمون‌های مختلف از جمله مقاومت فشاری تک محوره، بارنقطه‌ای، چکش اشमित و تعیین خصوصیات فیزیکی و پتروگرافی که بیانگر ویژگی‌های کمی و کیفی سنگدانه‌ها هستند، مناسب بودن آن‌ها را برای استفاده در هر پروژه مهندسی تعیین نمود. بسیاری از محققین به بررسی ارتباط خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و پتروگرافی با پارامترهای سنگدانه (ارزش ضربه، ارزش لس آنجلس و ارزش خردشدگی) در سنگ‌های آهکی و تخمین این پارامترها پرداخته‌اند (Califford Teme, 1991; Ioannou et al., 2010; Ugur et al., 2010; Naeem et al., 2014).

در این پژوهش سنگ آهک‌های استان همدان در ۷ منطقه شامل آبشینه، علیصدر، همه کسی، ملایر، اکباتان، سراب گیان و سراب گاماسیاب مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. هدف از این مطالعه، طبقه‌بندی سنگدانه‌های آهکی استان بر اساس خصوصیات پتروگرافی و پارامترهای سنگدانه و ارائه یک شاخص جدید با استفاده از این پارامترها به منظور مناسب بودن آن‌ها برای انواع پروژه‌های مهندسی می‌باشد. همچنین شاخص ارائه شده با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های آهکی مقایسه شده و در نهایت با استفاده از رگرسیون چند متغیره و لحاظ نمودن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تخمین زده می‌شود.

## ۲. زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

مناطق مورد مطالعه بخشی از زون سندج - سیرجان یا زاگرس چین خورده هستند. این زون یکی از فعال‌ترین زون‌های ساختمانی در غرب کشور در دوران‌های مزوزوئیک و سنوزوئیک به شمار می‌آید که تا قبل از آغاز دوران سنوزوئیک فازهای دگرگونی و ماگماتیسیم مهمی را پشت سر گذاشته است. رسوبات پالئوزوئیک در این منطقه رخنمون ندارند (درویش‌زاده، ۱۳۷۱). قدیمیترین و فراوانترین سنگ‌های این زون عبارتند از اسلیت، فیلیت و شیست‌های اواخر تریاس - ژوراسیک، که بطور محلی همراه با سنگ‌های

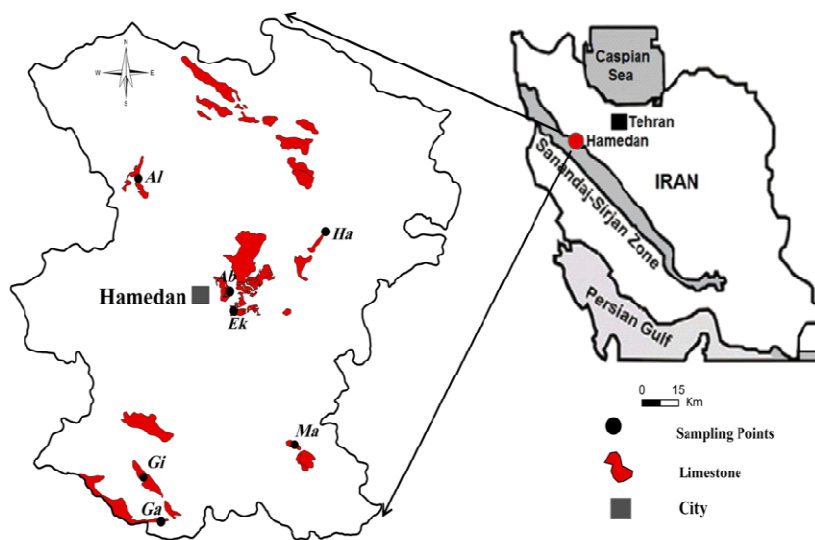
سنگدانه‌ها در بین دیگر مصالح مورد مصرف در پروژه‌های عمرانی جایگاه خاصی از دیدگاه اقتصادی و فنی احراز کرده‌اند، به نحویکه حجم وسیعی از مصالح بکار رفته در این پروژه‌ها را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند. این مسئله در مورد سنگدانه‌های آهکی به دلیل گسترش فراوان سنگ آهک‌ها در سطح زمین به ویژه در کشور ما از اهمیت بیشتری برخوردار است. این نوع سنگ‌ها به‌عنوان پوشش محافظ سدهای خاکی، بالاست راه‌آهن، منابع قرصه جهت تهیه ۷۵ تا ۸۵ درصد از سیمان پرتلند بتن، ۹۳ تا ۹۵ درصد ترکیب آسفالت و ۱۰۰ درصد ترکیب اساس جاده‌ها استفاده می‌شوند (Al-Harathi, 2001). احداث ساختمان‌ها، پل‌ها یا جاده‌ها با مصالح ساختمانی که از سنگ‌های ضعیف ساخته شده‌اند، یکی از عوامل ایجاد مخاطرات غیر طبیعی است. بنابراین بررسی کیفیت سنگدانه به منظور تعیین مناسب بودن آن‌ها با توجه به نوع پروژه مهندسی، بسیار حائز اهمیت است. کیفیت سنگدانه پارامتری است که مستقیماً با ویژگی‌های ذاتی سنگ منشأ در ارتباط است و مناسب بودن سنگدانه‌های آهکی برای کاربرد در هر نوع سازه با ارزیابی مصالح بر حسب ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی و ویژگی‌های پتروگرافی سنگ مادر تعیین می‌شود (Koukis, et al., 2007). محققین بسیاری به بیان اثر کنترل کننده، ویژگی‌های اصلی مصالح مانند، پتروگرافی مصالح سنگدانه‌ای، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مختلف سنگدانه‌ها و ارزیابی زمین‌شناسی مهندسی مصالح در نقاط مختلف جهان پرداخته‌اند (Al-Harathi, 2001; Akesson, et al., 2001; Pikriyl, 2001; Azimah, 2007; Eegesi and Akaha, 2012).

از مهمترین ویژگی‌های سنگدانه‌ها، سختی، دوام و مقاومت در برابر سایش و بارهای دینامیکی است. به منظور تعیین مستقیم ویژگی‌های مقاومتی و سایشی سنگدانه، نیاز به استفاده از تکنیک‌های آزمایشگاهی مشکل و پیچیده است. از جمله این آزمایش‌ها می‌توان به ارزش ضربه، ارزش لس آنجلس و ارزش خردشدگی اشاره نمود (Al-Harathi, 2001). این آزمایش‌ها برای تعیین ویژگی‌های نهایی سنگدانه طراحی شده‌اند، که

(علیصدر)، دارای سن تریاس بالایی است. رخساره این واحد شامل سنگ آهک متبلور و دولومیتی شده، همراه با دولومیت‌های ماسه‌ای می‌باشد که به صورت پراکنده حاوی نوارهای ناپیوسته از چرت سیاه‌رنگ و فاقد فسیل است (سازمان زمین شناسی کشور (نقشه کوهین)، ۱۳۷۹). سنگ آهک‌های ملایر و سراب گیان از سنگ‌های کرتاسه برداشت شده‌اند. سنگ آهک ملایر بصورت توده‌ای و همراه با میان لایه‌های نازک اسلیت است و دگرگونی خفیفی را متحمل شده است (سازمان زمین شناسی کشور (نقشه ملایر)، ۱۳۷۹). منطقه سراب گیان شامل سنگ‌های آهکی توده‌ای تا ضخیم لایه‌اند که بخشی از آن به صورت اوولیتی و همراه با خرده صدف‌های فسیلی است و قسمتی نیز تیره‌رنگ و به صورت آهک دولومیتی است. نمونه سنگ‌های مناطق سراب گاماسیاب و علیصدر خردشدگی تکتونیکی بسیاری را نشان می‌دهند، که این امر در تولید مصالح سنگدانه‌ای عاملی مفید بحساب می‌آید (ناصری، ۱۳۹۲). نمونه سنگ آهک اکباتان، سنگ پی سد اکباتان را تشکیل می‌دهد و از نوع آهک میکرایتی می‌باشد. این سنگ به شدت تحت تأثیر دگرشکلی دینامیکی قرار گرفته و در اثر آن شکستگی‌هایی در سنگ ایجاد شده است (خانلری و همکاران، ۱۳۸۹).

رسوبی و آذرین می‌باشند (Sepahi, 1999). گسترش واحدهای سنگ آهک در استان همدان بسیار زیاد بوده و توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند (احمدی، ۱۳۸۵؛ موسیوند، ۱۳۸۵؛ سلیمی، ۱۳۸۸؛ ناصری، ۱۳۹۲؛ عثمان پور، ۱۳۹۲؛ Heidari et al., 2012; Khanlari et al., 2012). در پژوهش حاضر ۷ نوع سنگ آهک واقع در شمال شرق، شمال غرب، مرکز، جنوب شرق و جنوب استان همدان مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به ترتیب مربوط به شهرستان قهاوند (معدن همه‌کسی - HK)، شهرستان کبودر آهنگ (منطقه علیصدر - AI)، شهرستان همدان (مناطق آبشینه - Ab و اکباتان - Ek)، شهرستان ملایر (منطقه ملایر - Ma)، شهرستان نهاوند (مناطق سراب گیان - Gi و سراب گاماسیاب - Ga) هستند (شکل ۱).

سنگ آهک‌های منطقه همه‌کسی، گاماسیاب و آبشینه با سن الیگومیوسن دارای فسیل فراوان هستند. منطقه همه‌کسی با سازند قم در ایران مرکزی قابل مقایسه می‌باشد (سازمان زمین شناسی کشور (نقشه همدان)، ۱۳۷۹). این سازند در شمال و شمال شرق استان گسترش یافته است که البته نمونه برداری صرفاً از شمال شرق استان همدان (منطقه همه‌کسی) انجام شده است. واحد سنگ آهکی منطقه کبودرآهنگ



شکل ۱. نقشه گسترش سنگ آهک‌های استان همدان و موقعیت نقاط نمونه برداری

(AI): علیصدر، Ha: همه‌کسی، Ab: آبشینه، Ek: اکباتان، Ma: ملایر، Gi: سراب گیان، Ga: سراب گاماسیاب)

### ۳. روش انجام آزمایش‌ها

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

در این پژوهش، به منظور نمونه برداری از مناطق مورد مطالعه سعی شده است که نمونه‌ها از معادن فعال استان انتخاب شده و رخنمون‌های عاری از هوازدگی مورد بررسی قرار گیرند. لازم به ذکر است که در بعضی از مناطق به علت عدم وجود معادن فعال، از ترانسه‌های حاشیه جاده نمونه برداری صورت گرفته است. تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی سینا، گروه زمین شناسی انجام شده‌اند. آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی سنگ‌های مورد مطالعه شامل چگالی خشک و اشباع ( $\gamma_d, \gamma_{sat}$ )، تخلخل کل (n)، شاخص جذب آب (QAI)، عدد واجهش چکش اشمیت (SHR) و سرعت موج (Vp) بر اساس استاندارد (ISRM (1981) انجام شده‌اند؛ همچنین آزمایش‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوره (UCS) و مدول الاستیسیته (E) بر اساس استاندارد (ISRM (1985)، مقاومت کششی ( $\sigma_t$ ) بر اساس استاندارد (ISRM (1978) و شاخص دوام و وارفتگی بر اساس نظر (Lee and De Freitas (1988 نیز صورت گرفته است. به منظور بررسی تغییرات کانی شناسی و پتروگرافی نمونه‌ها نیز از میکروسکوپ نوری استفاده شده و فراوانی کانی‌ها، فسیل‌ها، بافت و اشکال میکروسکوپی نیز بررسی شده‌اند.

#### ۳-۲. تعیین پارامترهای مقاومتی و سایشی سنگدانه

بعد از انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی یاد شده، نمونه‌ها را خرد کرده و آزمایش‌های ارزش ضربه سنگدانه (AIV)، ارزش خرد شدگی سنگدانه (ACV) و ارزش سایش لس آنجلس (LAAV) بر روی آن‌ها انجام شده است. انجام آزمایش ارزش سایش لس آنجلس (LAAV) برای مصالح مصرفی در راه‌سازی و بالاست راه‌آهن ضروری است، این آزمایش در صورت نیاز بر روی مصالح مصرفی در بتن نیز انجام می‌گیرد. آزمایش سایش به روش لس آنجلس جهت تعیین میزان مقاومت سنگدانه در مقابل سایش انجام می‌شود. این آزمایش نیز بر اساس استاندارد (ASTM C131) با دانه‌بندی برای قطعات بزرگتر از ۱۹ میلیمتر به روش B در ۵۰۰ دور به همراه ۱۲ گوی فولادی انجام شده است (جدول ۱). در نهایت افت سایشی توسط معادله ۱ اندازه‌گیری می‌شود.

$$K_{500} = \frac{G_0 - G_{500}}{G_0} * 100 \quad (1)$$

که در این معادله K500 افت سایشی بعد از ۵۰۰ چرخه،  $G_0$  وزن نمونه قبل از آزمایش بر حسب گرم و  $G_{500}$  وزن نمونه بعد از ۵۰۰ چرخه است (Ugur et al., 2010).

جدول ۱. انواع دانه‌بندی استاندارد سنگدانه‌ها (Ugur et al., 2010)

وزن بر حسب گرم در هر نوع دانه بندی				اندازه سرنده	
D	C	B	A	مانده روی سرنده	گذشته از سرنده
.....	.....	.....	۲۵±۱۲۵۰	۲۵	۳۷/۵
.....	.....	۱۰±۲۵۰۰	۲۵±۱۲۵۰	۱۹	۲۵
.....	.....	۱۰±۲۵۰۰	۱۰±۱۲۵۰	۱۲/۵	۱۹
.....	۱۰±۲۵۰۰	-----	۲۵±۱۲۵۰	۶/۳	۹/۵
.....	۱۰±۲۵۰۰	.....	.....	۴/۷۵	۶/۳
۱۰±۵۰۰۰	.....	.....	.....	۲/۳۶	۴/۷۵
۱۰±۵۰۰۰	۱۰±۵۰۰۰	۱۰±۵۰۰۰	۱۰±۵۰۰۰	جمع کل	

ناگهانی بار بر روی مصالحی که در سه لایه متراکم شده‌اند. تعیین این پارامتر در مورد مصالح بکار رفته در راه‌سازی که

پارامتر ارزش ضربه مصالح (AIV) عبارت است از درصد ریزدانه تولید شده کوچکتر از ۲/۸ میلی‌متر در اثر اعمال

آلیزارین قرمز به منظور تشخیص وجود دولومیت در آنها انجام گرفته است. بعلاوه، نمونه‌ها بر اساس طبقه بندی دانه‌ها (۱۹۶۲) و فولک (۱۹۶۲) نام گذاری شده‌اند (جدول ۲) (موسوی حرمی، ۱۳۷۷). شکل‌های ۲ (الف) تا (چ) تصاویری از مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهند. همانطور که پیش از این نیز بیان شد، نمونه‌های همه کسی، گاماسیاب و آبشینه دارای فسیل فراوان هستند. این نمونه‌ها به علت وجود فسیل، بافت‌های ضعیف‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان می‌دهند. همچنین از میان آنها، نمونه همه کسی با بافت بایوکلاست پکستون ضعیف‌ترین نوع بافت را نشان می‌دهد. علاوه بر سست بودن بافت‌های یاد شده، حذف فسیل‌ها در طی زمان سبب ایجاد تخلخل بیشتر در این نمونه‌ها شده است (شکل‌های ۲ ب، ت و ج). سنگ آهک‌های مناطق علیصدر و ملایر کاملاً متبلور شده و فاقد تخلخل و یا دارای تخلخل کمی هستند (شکل‌های ۲ پ و ث). همانطور که در جدول ۲ دیده می‌شود، نمونه سنگ آهک علیصدر دارای بیشترین میزان درصد دولومیت و آهک‌های ملایر و سراب گیان به میزان کمتر حاوی دولومیت می‌باشند.

#### ۴-۲. تحلیل نتایج آزمایش‌های فیزیکی - مکانیکی و پارامترهای سنگدانه

نتایج آزمایش‌های فیزیکی-مکانیکی در جدول ۳ ارائه شده است. در میان خصوصیات فیزیکی (تخلخل و درصد جذب آب) آهک‌های همه کسی و ملایر به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار میانگین این پارامترها را دارا هستند ( $Ma (QAI=0/09, n=0/28)$ ;  $Hk (QAI=13/31, n=21/71)$ ). این امر مربوط به بافت سست و ضعیف سنگ‌های منطقه همه کسی و بافت بلورین سنگ آهک ملایر می‌شود. البته مقادیر میانگین این پارامترها برای نمونه‌های ملایر، سراب گیان، علیصدر و اکباتان بسیار نزدیک می‌باشد. سایر خصوصیات فیزیکی مانند دانسیته، سرعت موج P و عدد واجهش چکش اشمیت برای سنگ آهک‌های همه کسی کمترین مقادیر و برای علیصدر بیشترین مقادیر را بخود اختصاص داده‌اند.

تحت بار دینامیکی قرار می‌گیرند، اطلاعات مناسبی از کارایی مصالح را بدست می‌دهد. به نحوی که سنگدانه‌های با مقدار AIV کمتر از ۱۰ درصد به عنوان مصالح مقاوم و سنگدانه‌های با مقدار AIV بیشتر از ۳۵ درصد به عنوان مصالح خیلی ضعیف و کم دوام در راه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. از نظر عددی، نتایج این آزمایش با آزمایش مقاومت در برابر خرد شدن نزدیک است (به جز در مورد مصالح دانه‌ریز سیلیسی که مقاومت کمتری نسبت به ضربه دارند) (سرائی پور، ۱۳۶۱، فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰).

ارزش خردشوندگی مصالح (ACV) نیز کاربردی مشابه AIV دارد. در این آزمایش، مصالح در سه لایه درون استوانه مخصوص ریخته می‌شود و هر لایه توسط ۲۵ ضربه با میله مخصوص متراکم می‌شود، مصالح متراکم شده تحت اعمال بار تدریجی ۴۰ کیلو نیوتن و در مدت زمان ۱۰ دقیقه قرار می‌گیرند. مقدار ریز دانه تولید شده بعد از اعمال فشار، ارزش خردشوندگی مصالح را نشان می‌دهد. هر چه مصالح ریز دانه کمتری تولید شود، نشان دهنده مقاومت بالای سنگدانه‌ها در مقابل خردشوندگی می‌باشد؛ به نحوی که مصالح با ارزش خردشوندگی بیشتر از ۳۰٪ به لحاظ استفاده در راه‌سازی مناسب نمی‌باشند (استاندارد ملی ایران، ۱۳۸۶). ارزش ضربه مصالح (AIV) و ارزش خردشوندگی مصالح (ACV) بر اساس استاندارد (BS 812) انجام می‌شوند (فاروق حسینی، ۱۳۷۹). به منظور تعیین میزان عدد خردشدگی از معادله ۲ استفاده می‌شود.

$$C = \frac{B}{A} * 100 \quad (2)$$

در این معادله C عدد خردشدگی بر حسب درصد، B وزن ذرات عبوری از الک ۲/۳۶ میلیمتر و A وزن اولیه بر حسب درصد می‌باشند.

#### ۱. بحث و نتیجه گیری

##### ۴-۱. مطالعات پتروگرافی

مطالعه کانی شناسی و بافت سنگ‌های آهکی مورد مطالعه با تهیه مقاطع نازک و رنگ آمیزی مقاطع مذکور توسط محلول

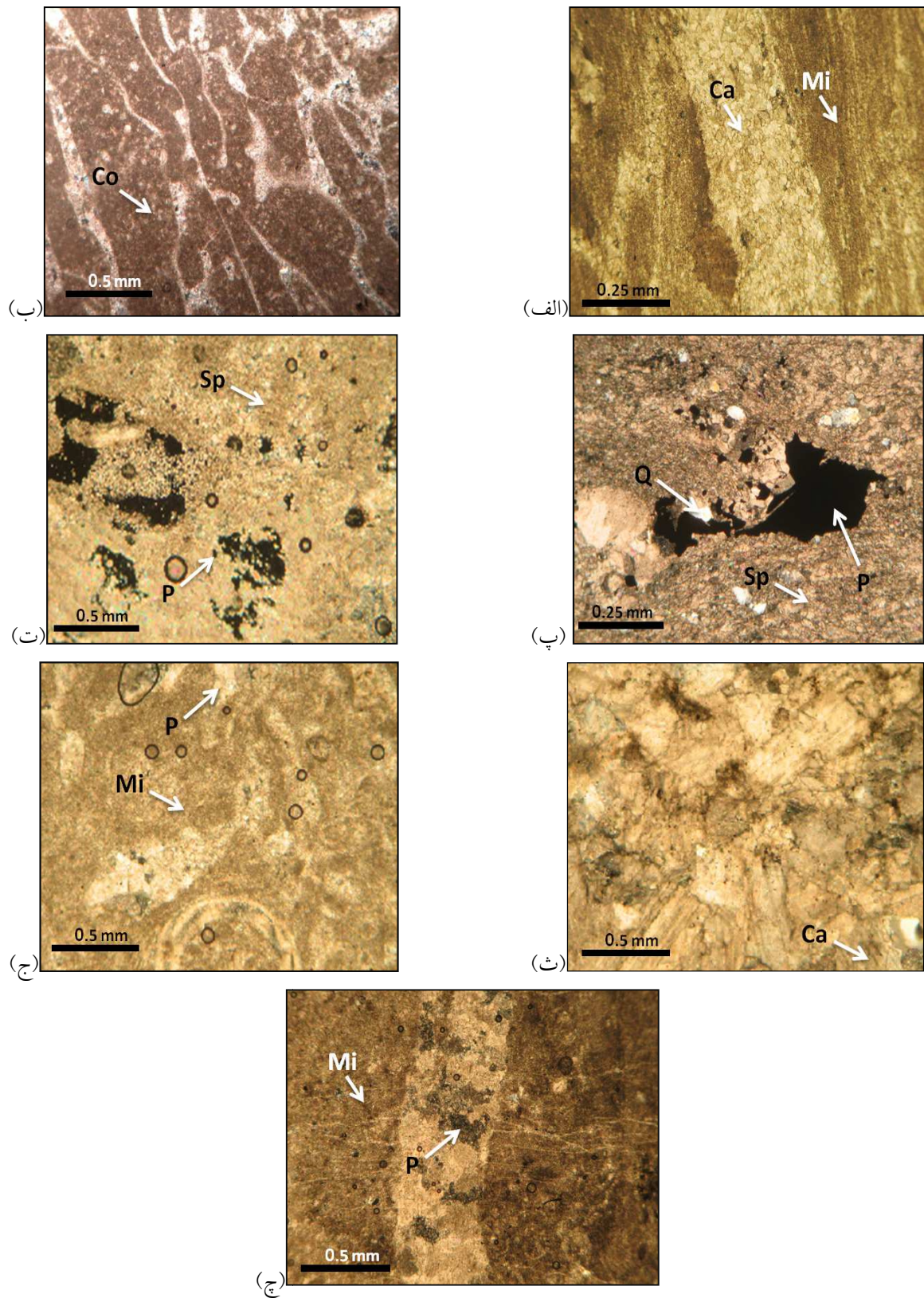
سنگ آهک‌های مقاوم (سراب گیان، اکباتان و ملایر) نشان می‌دهد.

در خصوص پارامترهای سایشی و مقاومتی سنگدانه‌ها از جمله LAAV، ACV و AIV سنگ آهک‌های سراب گیان، علیصدر، ملایر و اکباتان دارای کمترین مقادیر افت هستند (جدول ۳). همچنین سنگ آهک سراب گاماسیاب علیرغم مقادیر نزدیک در پارامترهای ACV و LAAV با نمونه‌های یاد شده، اما در پارامتر AIV با آنها تفاوت دارد و میزان مقاومت سنگ در برابر ضربه مکانیکی کاهش یافته است و درصد افت وزنی در این پارامتر افزایش یافته است ( $AIV=11/29$ ). سنگ آهک آبشینه، افزایش بیشتری در پارامترهای ACV و LAAV را نسبت به نمونه سراب گاماسیاب نشان می‌دهد. سنگ آهک همه کسی نیز دارای بیشترین مقادیر افت وزنی در هر ۳ پارامتر سنگدانه می‌باشد

علت افزایش این پارامترها در سنگ آهک علیصدر، دولومیتی شدن شدید این نوع سنگ است، که سبب افزایش دانسیته و به تبع سرعت موج P و عدد واجهش چکش اشمیت شده است. حضور کانی دولومیت در نمونه‌های ملایر و سراب گیان نیز در افزایش دانسیته آنها مؤثر بوده است ( $\gamma_d=2/72$ ). با توجه به جدول ۳ مقادیر مقاومت فشاری تک محوری، شاخص بارنقطه‌ای و مقاومت کششی در نمونه‌های سنگ آهک همه کسی حداقل و در نمونه‌های اکباتان، سراب گیان، علیصدر و ملایر حداکثر و همچنین در نمونه‌های سراب گاماسیاب و آبشینه متوسط می‌باشند. سنگ آهک علیصدر علیرغم دارا بودن مقادیر بالای دانسیته، عدد واجهش چکش اشمیت و مقاومت فشاری تک محوری، به سبب بافت بلورین در مقابل نیروهای کششی ضعیف‌تر عمل نموده و مقادیر مقاومت کششی و شاخص بارنقطه‌ای کمتری نسبت به سایر

## جدول ۲. نتایج بررسی‌های پتروگرافی

نام نمونه	مشخصات کانی شناسی	درصد و نوع تخلخل	نام سنگ	
			روش دانهام	روش فولک
Gi	آهک میکرایتی با مقدار کمی دولومیت و میکا. تبلور مجدد میکرایت‌ها و تبدیل آنها به بلورهای درشت اسپاری دروغین	۱-۳ درصد و از نوع حفره‌ای، شکستگی و بین بلوری	مادستون آهکی	میکرایت برشی
Ga	بلورهای میکرایت، میکروفسیل‌های فراوان (جلبک قرمز، استراکود و خارپوست) و درصد کمی دولومیت	۵ درصد و از نوع حفره‌ای و بین بلوری	ردستون	بایومیکرایت
Ma	آهک دگرگون شده (بلورهای کلسیت و اسپاریتی دارای جهت یافتگی)، حاوی بلورهای کوارتز، کوارتز پلی کریستالین، چرت و درصد کمی کانی‌های میکا، پلاژیوکلاز و دولومیت	۱-۲ درصد و از نوع حفره‌ای و بین بلوری	آهک بلورین	آهک بلورین
Hk	فسیل فراوان (نومولیت، بریوزوآ، قطعات مرجانی، کرینوئید، پلوئید، جلبک‌های آهکی و فرامینوفر) با سیمان اسپاری	< ۲۰ درصد از نوع حفره‌ای و درصد کمی از نوع بین بلوری	بایو کلست پکستون	بایو اسپاریت
Al	بلورهای درشت کلسیت و دولومیت و درصد کمی بلورهای پلی کریستالین کوارتز	فاقد تخلخل	دولستون	دولستون
Ab	قطعات مرجان، بریوزوآ، فرامینوفر، گاستروپود، جلبک قرمز، خرده‌های دوکفه‌ای و اکینودرم-گل میکرایتی و سیمان میکرایتی	۴-۷ درصد و از نوع حفره‌ای و بین بلوری	ردستون	بایومیکرایت
Ek	میکرایت حاوی شکستگی‌های فراوان که توسط سیمان کلسیتی پر شده‌اند.	۱۰ درصد از نوع حفره‌ای	میکرایت	کنگومرای آهکی



شکل ۲. تصاویر مقاطع نازک نمونه های مورد مطالعه: الف) سراب گیان، ب) سراب گاماسیاب، پ) ملایر، ت) همه کسی، ث) علیصدر، ج) آبشینه، چ) اکباتان (Ca: کلسیت، P: تخلخل، Co: جلبک، Q: کوارتز، Mi: میکرایت، Sp: اسپرایت)



جدول ۳. نتایج آزمایشات فیزیکی - مکانیکی و پارامترهای سنگدانه

LAHV (%)	AIV (%)	ACV (%)	Is (MPa)	UCS (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	Vp (m/s)	SHR	(gr/cm <sup>3</sup> )	QAI (%)	n (%)	نام نمونه
۳۰/۲۲	۸۸۳	۱۱/۷	۷/۹۵	۱۰۶/۳۷	۱۳/۰۵	۵۵۲۹	۵۱/۲۵	۲/۸۳	۰/۲۸	۰/۷۷	سراب گیان (Gi)
۲۵	۸۸۶	۱۶/۷۸	۹/۰۱	۷۹/۲۵	۲۱/۱۹	۶۱۱۳	۴۷/۴۵	۲/۸۴	۰/۳۵	۰/۹۶	
۲۷	۸۰۳	۱۲/۲	۸/۰۷	۹۸/۲۸	۱۷/۰۱	۶۶۹۷	۴۹/۳۵	۲/۸۲	۰/۲۷	۰/۷۴	
۲۸/۲	۸۷	۱۵/۸۷	۷/۶۲	۱۱۱/۳۱	۱۵/۰۲	۵۹۸۴	۵۰/۳	۲/۸۳	۰/۲۴	۰/۶۳	
۲۷/۷	۸۶۱	۱۰/۳۶	۷/۸۴	۹۱/۹۲	۱۲/۵۹	۶۲۳۱	۴۸/۴	۲/۶۳	۰/۲۸	۰/۸۷	
۲۹/۳	۸۹۲	۱۳/۳	۷/۰۹	۸۲/۲۸	۱۵/۰۹	۶۰۲۶	۴۷/۴۵	۲/۸۶	۰/۳۶	۰/۹۷	میانگین
۲۷/۹۰	۸۸۱	۱۳/۳۷	۷/۹۳	۹۴/۹۰	۱۵/۶۶	۶۰۶۹/۶۷	۴۹/۰۳	۲/۸۲	۰/۳	۰/۸۱	
۱۲/۸	۷/۸۹	۱۷/۲۳	۶/۵۶	۶۱/۹۳	۱۱/۵۴	۶۲۵۹	۳۸/۵۳	۲/۶۱	۰/۹	۱/۰۱	سراب گاماسیاب (Ga)
۱۲/۶۵	۱۱/۲۵	۱۴/۰۱	۴/۱۸	۷۸/۳۴	۱۲/۷۹	۶۸۴۲	۳۷/۹۸	۲/۷۱	۱/۰۷	۱/۱۳	
۱۵/۲	۱۴/۷۲	۱۲/۶۸	۴/۹۱	۶۳/۹۲	۱۴/۰۴	۷۴۲۵	۴۸/۸۶	۲/۶۹	۰/۸	۰/۹۱	میانگین
۱۳/۵۵	۱۱/۲۹	۱۴/۶۴	۵/۲۲	۶۷/۸۲	۱۲/۷۹	۵۵۰۸/۶۷	۴۱/۷۹	۲/۶۷	۰/۹۲	۱/۰۲	
۲۳/۶	۵/۹۸	۱۰/۳	۶/۴۷	۱۱۲/۸۱	۱۴/۳	۵۸۸۲	۴۴/۶	۲/۸۷	۰/۱	۰/۲۹	ملازیر (Ma)
۲۷	۸۰۳	۷/۸۹	۵/۹	۶۳/۷۴	۲۲/۶۲	۶۱۶۱	۴۹/۳۵	۲/۶۸	۰/۰۸	۰/۳۲	
۲۳	۷/۱۲	۱۲/۳	۶/۱۲	۷۷/۳۶	۸/۵۱	۶۴۴۰	۵۰/۳	۲/۸۲	۰/۱۲	۰/۲۶	
۲۳/۴	۶/۱۳	۸/۵	۹/۴۲	۹۰/۹۸	۱۸/۸۹	۵۷۸۱	۵۱/۲۵	۲/۶۹	۰/۰۹	۰/۲۸	
۲۵	۷/۰۱	۱۳/۵	۵/۸۵	۶۲/۱۸	۱۲/۱	۶۱۱۱	۴۹/۳۵	۲/۸۴	۰/۰۹	۰/۲۶	
۲۳/۶	۷/۸۹	۹/۳۶	۹/۳۲	۹۰/۲۲	۲۴/۵۹	۶۲۵۸	۵۳/۱۵	۲/۸۱	۰/۰۸	۰/۲۴	میانگین
۲۴/۲۷	۷/۰۳	۱۰/۳۱	۷/۱۸	۸۲/۸۸	۱۶/۸۴	۶۱۰۵/۵۰	۴۹/۶۷	۷/۸۲	۰/۰۹	۰/۲۸	
۴۵/۴	۲۰/۷۶	۳/۵۶	۱/۵۴	۱۶	۲/۸۹	۳۴۵۷	۴۶	۱/۹۴	۸/۲۸	۱۵/۷۵	همه کس (Hk)
۵۹/۹	۳۵/۷۹	۳۹/۹۲	۱/۷۱	۹	۳/۶۳	۳۰۳۲	۵۵	۱/۸	۱۴/۳۸	۲۶/۶۳	
۵۰/۹	۲۷/۵۶	۴۴/۶۶	۱/۵۴	۸/۹	۲/۶۱	۳۱۴۹	۳۵	۱/۸۸	۱۱/۵۵	۲۱/۶۵	
۷۲/۷	۲۰/۵۲	۴۸/۸۳	۱/۳۷	۹	۲/۹۷	۳۳۸۳	۳۹	۱/۸۵	۱۲/۷۶	۲۳/۴۲	
۴۶/۰۵	۲۳/۵	۵۰/۳۴	۲/۳۳	۱۰	۳/۲۵	۴۶۵۰	۵۲	۱/۹	۱۳/۴۷	۱۷/۹۹	
۵۲/۱	۲۳/۹۵	۴۷/۸۳	۱/۵۱	۱۷/۷	۴/۳۸	۳۳۱۰	۴۱	۱/۸۷	۱۹/۴۱	۲۴/۸۲	میانگین
۵۴/۵۱	۲۶/۱۸	۴۵/۰۱	۱/۶۷	۱۱/۸۷	۳/۲۹	۳۳۰/۱۷	۳۹/۶۷	۱/۸۷	۱۳/۳۱	۲۱/۸۱	
۱۷/۷۶	۶/۸۲	۱۵/۲۶	۵/۸۳	۵۱	۱۳/۷۳	۶۸۲۵	۵۳	۲/۸۶	۰/۲۳	۰/۶۳	علیصدر (Al)
۲۲/۰۴	۹/۶۹	۱۵/۶۹	۸/۲۳	۱۱۶	۱۶/۵۸	۶۲۷۲	۵۱	۲/۸۵	۰/۴۳	۱/۱۶	
۱۸/۶	۹/۸۲	۱۳/۸۷	۵/۱۴	۱۰۴	۱۰/۲۴	۶۹۳۲	۵۰	۲/۸۶	۰/۳۲	۰/۸۸	
۲۴/۷	۶/۵۳	۱۶/۵۱	۵/۸۳	۸۵	۱۲/۵۱	۶۰۳۷	۴۹	۲/۸۷	۰/۳۶	۱/۱۴	
۳۰/۹۵	۸/۴۱	۱۵/۷	۵/۳۲	۱۲۱/۲۹	۹/۱	۶۴۱۳	۴۵	۲/۸۶	۰/۲۸	۰/۹۸	
۱۹/۴۷	۸/۰۲	۱۴/۳۱	۳/۸۴	۷۹/۸	۱۴/۱۹	۶۱۱۶	۵۸	۲/۸۶	۰/۳۱	۰/۷۸	میانگین
۲۲/۲۵	۸/۲۰	۱۵/۲۲	۵/۸۰	۹۲/۸۵	۱۲/۷۷	۶۴۳۲/۵۰	۵۱	۲/۸۶	۰/۳۲	۰/۹۳	
۲۶/۲	۱۰/۶۳	۳۴/۶۱	۴/۰۷	۶۸	۷/۲۸	۲۸۸۵	۵۰	۲/۵۲	۰/۸۶	۰/۹۸	آبشینه (Ab)
۲۴/۱۷	۱۰/۳	۳۲/۸۵	۶/۲۹	۵۰/۴۳	۹/۶۷	۴۳۵۶	۵۲	۲/۶۱	۲/۱۳	۲/۳۴	
۲۴/۳	۱۱/۹۸	۳۰/۹۸	۶/۶۶	۸۷	۵/۱۴	۵۸۲۷	۵۷	۲/۵۸	۱/۲۳	۱/۵۳	
۳۴/۵	۱۳/۵۶	۳۲/۱۴	۵/۸۳	۴۰	۶/۷۴	۴۵۶۳	۴۴	۲/۶	۱/۹۷	۲/۲۷	
۲۳/۴	۱۲/۵	۲۹/۲۵	۶/۶۶	۷۷/۲۱	۸/۴۱	۴۸۲۱	۴۶	۲/۵۴	۱/۰۲	۱/۱۸	
۲۰/۷	۱۰/۸۴	۲۸/۶۳	۵/۸۸	۶۱/۳۵	۱۰/۵۶	۴۱۴۵	۳۹	۲/۶۱	۱/۶۵	۱/۷۹	میانگین
۲۵/۵۶	۱۱/۶۴	۳۱/۴۱	۵/۸۸	۶۳/۷۶	۷/۹۷	۴۴۳۲/۸۳	۴۹/۶۷	۲/۵۸	۱/۴۸	۱/۶۸	
۳۷/۵	۷/۹۴	۱۲/۸	۸/۶۱	۱۴۲/۰۸	۱۶/۲	۶۴۳۷	۴۸/۴	۲/۸۳	۰/۱۱	۰/۳۳	اکباتان (Ek)
۲۷/۷۶	۷/۷۴	۱۶/۰۱	۶/۱۱	۹۳/۰۹	۱۵/۶	۵۴۲۳	۵۳/۳	۲/۶۷	۰/۱۲	۰/۲۷	
۳۵	۷/۶۲	۹/۶۸	۵/۶۷	۹۸/۵۴	۱۵/۲	۶۴۱۰	۴۹/۳۵	۲/۶۸	۰/۱۴	۰/۴	
۳۴/۲	۷/۵۹	۱۳/۳۵	۸/۲۶	۱۰۳/۹۹	۱۳/۴	۶۴۳۸	۴۸/۴	۲/۶۹	۰/۰۹	۰/۳۴	
۲۸	۷/۶۵	۱۰/۸۹	۶/۴۴	۱۲۱/۲	۱۶/۷	۵۸۲۳	۴۹/۳	۲/۸۵	۰/۵۲	۱/۴۶	
۳۰	۷/۰۹	۱۲/۹۷	۱۳/۲۳	۸۹/۱	۱۸/۷	۶۷۱۹	۴۸/۴	۲/۸۱	۱/۱۴	۳	میانگین
۳۲/۰۸	۷/۶۱	۱۲/۶۰	۸/۰۵	۱۰۸/۰۰	۱۵/۹۷	۶۲۰۸/۳۳	۴۹/۰۳	۲/۸۱	۰/۳۵	۰/۹۷	



## ۳-۴. معرفی شاخص جدید سنگدانه (AI)

در پژوهش حاضر، با استفاده از پارامترهای مقاومتی و سایشی سنگدانه‌ها و خصوصیات پتروگرافی، طبقه بندی مهندسی برای سنگدانه‌های آهکی ارائه شده است. این طبقه بندی تحت عنوان شاخص سنگدانه (AI) معرفی شده است. در این طبقه بندی، سنگدانه‌ها به لحاظ کمی و امکان استفاده در کاربردهای مختلف در سه گروه عالی ( $AI_1$ )، متوسط ( $AI_2$ ) و ضعیف ( $AI_3$ ) طبقه‌بندی شده که البته رده دوم خود شامل دو زیر رده  $AI_{2a}$  و  $AI_{2b}$  است (جدول ۴). قابلیت کاربرد هر نوع سنگ آهک بر اساس پارامترهای سنگدانه و خصوصیات پتروگرافی سنگ آهک‌ها در هر رده در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور تعیین مقادیر پارامترهای مقاومتی و سایشی سنگدانه‌ها و مناسب بودن هر نمونه برای هر رده از استانداردها و نشریات راه، بتن و... استفاده شده است. سنگ آهک‌های نوع اول را می‌توان برای پروژه‌های حساس از لحاظ اجرایی که کاربرد مصالح با کیفیت بالا در آنها ضروری است، استفاده نمود. مقادیر پارامترهای  $AAV$ ،  $ACV$  و  $AIV$  و درصد جذب آب ( $w$ ) برای این رده باید به ترتیب  $AAV < 25$ ،  $ACV < 15$ ،  $AIV < 10$  و  $w < 0.8$  باشند (سرائی پور، ۱۳۶۱، مشخصات فنی راه، ۱۳۸۲، آیین‌نامه بتن ایران، ۱۳۸۸، Construction standard CS3, 2013). سنگ آهک‌های نوع دوم ( $AI_{2a}$ ) به علت ضعف بیشتر در برابر ضربه و گاهاً مقادیر افت وزنی بیشتر در شاخص‌های ارزش خردشدگی و لس آنجلس از نوع اول قابل تفکیک هستند و برای بتن‌های معمولی و جاده‌های کم ترافیک‌تر استفاده می‌شوند. مقادیر پارامترهای  $AAV$ ،  $ACV$  و  $AIV$  و درصد جذب آب ( $w$ ) برای این رده به ترتیب در محدوده‌های  $10 < AAV < 25$ ،  $10 < ACV < 15$ ،  $10 < AIV < 15$  و  $1 < w < 3$  قرار می‌گیرند. سنگ آهک‌های رده  $AI_{2b}$  در برابر خردشدگی و سایش لس آنجلس مقاومت کمتری نسبت به رده قبلی نشان می‌دهند، در حالیکه مقادیر ارزش ضربه در آنها تفاوت چندانی ندارد ( $AAV < 30$ ،  $10 < ACV < 35$ ،  $10 < AIV < 15$  و  $1 < w < 3$ ) (سرائی پور، ۱۳۶۱، فهمی فر و سروش، ۱۳۸۰،

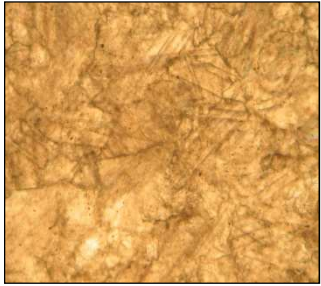
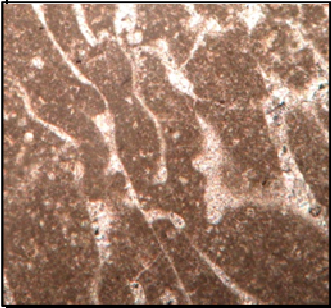
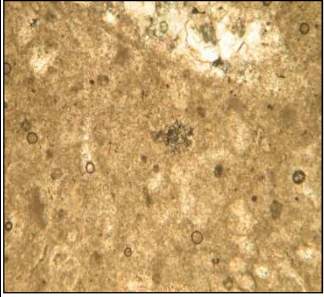
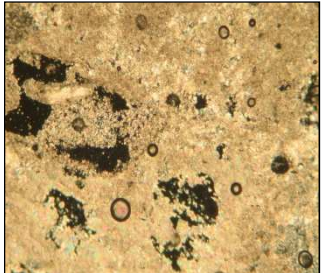
فاروق حسینی، ۱۳۷۹، مشخصات فنی راه، ۱۳۸۲، آیین‌نامه بتن ایران، ۱۳۸۸، آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۸۱). سنگ آهک‌های نوع سوم به علت افت وزنی، سایش و قابلیت خردشدگی بسیار زیاد، قابل استفاده بعنوان سنگدانه نمی‌باشند و از آنها برای اهداف دیگری همانند رنگرزی و سایر موارد دیگر استفاده می‌شود ( $AAV > 30$ ،  $ACV > 35$ ،  $AIV > 15$  و  $w > 3$ ) (سرائی پور، ۱۳۶۱، فاروق حسینی، ۱۳۷۹). همانطور که از نتایج بر می‌آید، از میان پارامترهای مقاومتی و سایشی سنگدانه، ارزش‌های خردشدگی و ضربه‌ای مناسب‌تر از ارزش سایش لس آنجلس به منظور تخمین رده سنگ می‌باشند. به منظور تعیین رده از میان هفت نوع سنگ آهک مورد مطالعه، چهار نوع سنگ آهک علیصدر، نهاوند، ملایر و اکباتان در رده عالی، سراب گاماسیاب و آبشینه در رده متوسط (به ترتیب در زیر رده های  $AI_{2a}$  و  $AI_{2b}$ ) و همه کسی در رده ضعیف قرار گرفته‌اند. لازم بذکر است که سنگ آهک‌های رده دوم و سوم دارای فسیل فراوان هستند که این امر یکی از عواملی است که آنها را از رده اول متمایز می‌کند. بعلاوه این دو گروه سنگدانه آهکی نسبت به گروه اول میزان کربنات کلسیم بیشتری داشته و فاقد دولومیت هستند.

۴-۴. بررسی ارتباط خصوصیات فیزیکی-مکانیکی و شاخص تعدیل شده سنگدانه ( $AAI$ )

بررسی اثر ویژگی‌های سنگ آهک بر مقادیر AI با استفاده از روش رگرسیون حداقل مربعات بررسی شده است. در این روش معادله بهترین خط و ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای هر رگرسیون تعیین می‌شود. بمنظور بدست آوردن روابط با معناداری بالاتر و ضریب تعیین قوی‌تر، مقدار شاخص سنگدانه با تقسیم بر سرعت موج تعدیل شده است (پیش از این Ugur et al. (2010) نیز از آن جهت تعدیل مقادیر ارزش لس آنجلس استفاده کرده‌اند). دلیل این تعدیل همبستگی قوی بین سرعت موج با ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و ساختاری سنگ و همچنین پارامترهای مقاومتی و سایشی سنگدانه‌ها و

نیز افزایش دامنه پراکندگی مورد استفاده به منظور رده بندی سنگها می باشد. در نهایت نسبت AI بر سرعت موج به عنوان شاخص تعدیل شده سنگدانه (AAI) معرفی شده است.

جدول ۴. طبقه بندی سنگهای آهکی بر اساس شاخص سنگدانه (AI)

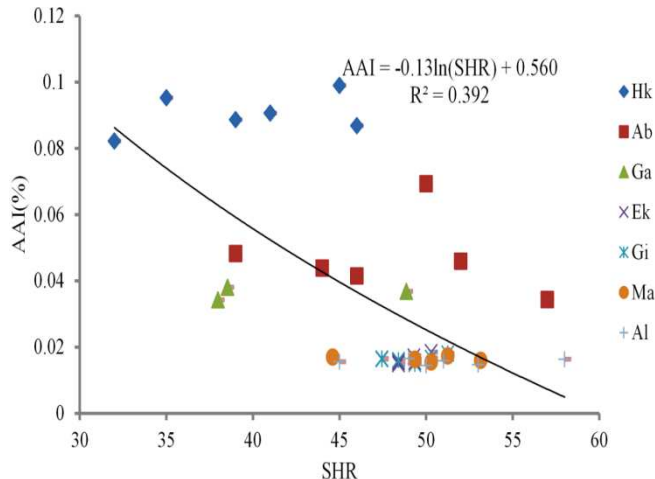
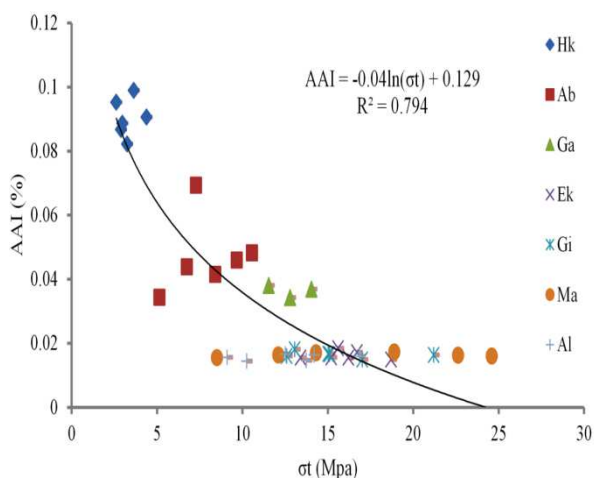
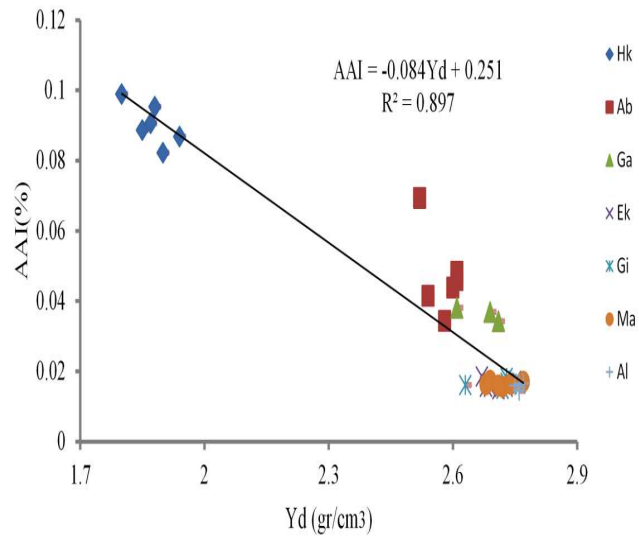
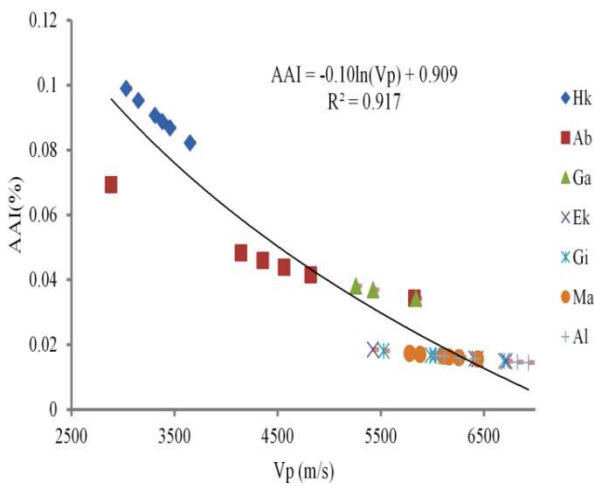
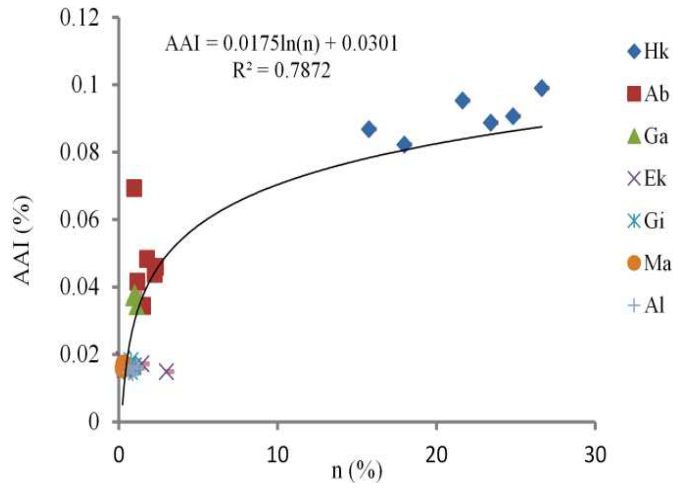
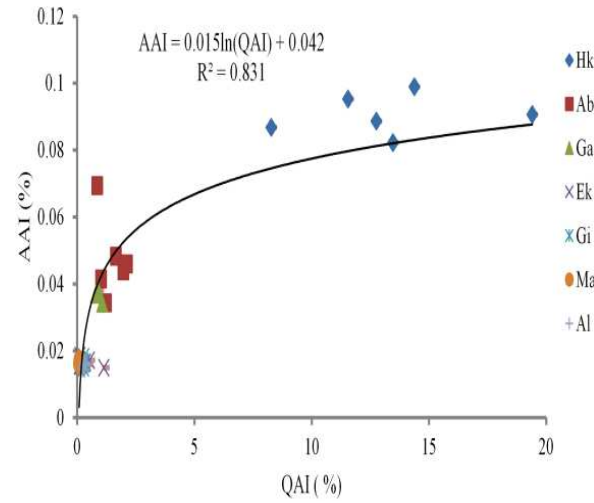
تصویر میکروسکوپی	توصیف پتروگرافی	کاربرد	پارامترهای موثر سنگدانه	رده بندی کیفی سنگدانه	شاخص رده بندی سنگدانه (AI)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>تخلخل <math>&gt; 5\%</math></li> <li>کلسیت نسبتاً بلوری</li> <li>مقدار کم تا متوسط دولومیت</li> <li>فسیل کم</li> <li>فاقد چرت و سیلیس فعال</li> </ul>	بتن، بتن مسلح، راه های درجه یک، بالاست راه آهن تمام سایت های دارای حساسیت بالای اجرایی	$AAV < 25$ $ACV < 15$ $AIV < 10$ $W < 0.8\%$	بالا	AI <sub>1</sub>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>تخلخل ۵٪ تا ۱۰٪</li> <li>درصد کمی دولومیت</li> <li>فاقد چرت و سیلیس فعال</li> <li>میکرو فسیل های زیاد</li> </ul>	بتن، به عنوان مصالح اساس و زیر اساس و آسفالت راه های با ترافیک متوسط	$10 < AAV < 25$ $10 < ACV < 15$ $10 < AIV < 15$ $0.8 < W\% < 3$	متوسط	AI <sub>2</sub> a
	<ul style="list-style-type: none"> <li>تخلخل ۵٪ تا ۱۵٪</li> <li>فاقد دولومیت</li> <li>فسیل فراوان (میکروفسیل و ماکروفسیل)</li> </ul>	اساس و آسفالت راه های با ترافیک سبک	$0.8 < W\% < 3$ $25 < AAV < 30$ $15 < ACV < 35$ $10 < AIV < 15$		AI <sub>2</sub> b
	<ul style="list-style-type: none"> <li>تخلخل <math>&lt; 15\%</math></li> <li>فاقد دولومیت</li> <li>فاقد چرت و سیلیس آزاد</li> <li>درصد کربنات کلسیم <math>&lt; 80\%</math></li> <li>فسیل فراوان (میکروفسیل و ماکروفسیل)</li> </ul>	نامناسب برای سنگدانه، کاربرد در رنگ سازی و .....	$w > 3\%$ $AAV > 30$ $ACV > 35$ $AIV > 15$	کم	AI <sub>3</sub>

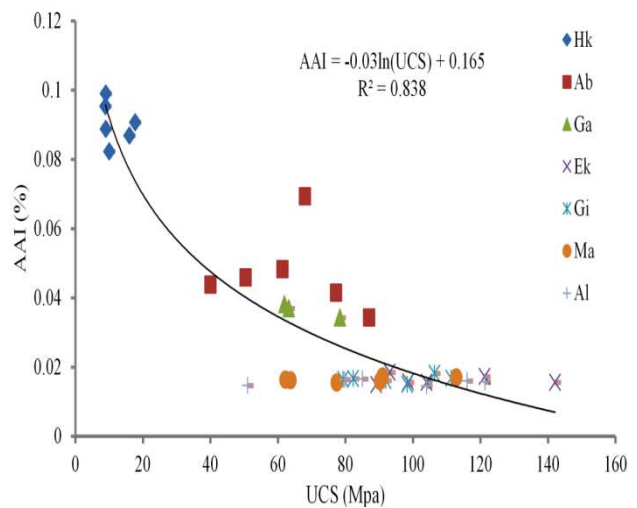
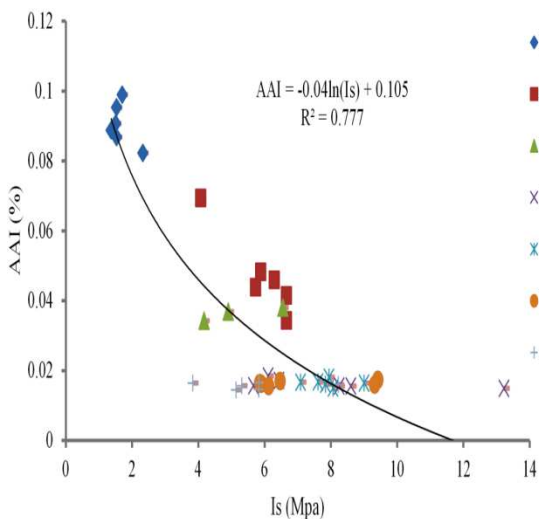
بهترین خط عبوری، معادله خط و ضریب تعیین، مشاهده می شود. در میان معادلات ارائه شده، معادله لگاریتمی از همه فراوان تر و معادله خطی بیشترین ضریب تعیین را نشان

هر چه این شاخص طبقه بندی مقدار کمتری داشته باشد، سنگدانه قابلیت کاربری بهتری را نشان می دهد. در شکل ۳ ارتباط AAI با ویژگی های فیزیکی- مکانیکی سنگ همراه با

اشمیت، کمترین همبستگی را با این شاخص داشته و برای تخمین آن مناسب نمی‌باشد ( $R^2=0/39$ ). در میان خصوصیات مکانیکی مقاومت فشاری تک محوری بیشترین همبستگی را با این شاخص نشان داده است ( $R^2=0/84$ ).

می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در میان خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، چگالی خشک سنگ‌های آهکی بیشترین همبستگی را با AAI دارد که البته این همبستگی بصورت خطی است. بعلاوه عدد واجهش چکش





شکل ۳. ارتباط بین پارامتر شاخص تعدیل شده سنگدانه (AAI) با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

آماره Mallows' Cp، روشی برای انتخاب مدل در رگرسیون است (معادله ۴). بعبارت دیگر آماره Cp معیاری است برای ارزیابی مدل بهینه زمانیکه مدل‌هایی با تعداد پارامترهای مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند (Kadane and Lazar, 2004).

$$C_p = \frac{RSS_p}{\sigma^2} + (2p - n) \quad (4)$$

در این معادله RSSp بیانگر باقیمانده مجموع مربعات برای مدلی با P متغیر است و  $\sigma$  تخمینی از خطای واریانس بر اساس کل مدل را نشان می‌دهد.

رگرسیون چند متغیره روشی انعطاف پذیر برای تحلیل داده‌هاست، که قادر است یک متغیر کمی (متغیر وابسته) را با هر پارامتری (متغیر مستقل) مرتبط نموده و تخمین بزند. در این پژوهش، از مدل رگرسیون خطی چند متغیره استفاده شده است. از نظر تئوری این مدل را می‌توان بصورت زیر بیان نمود (معادله ۵):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e \quad (5)$$

در این معادله Y متغیر وابسته است،  $X_i$  ( $i=1, \dots, k$ ) متغیرهای مستقل هستند،  $\beta_i$  سهم هر متغیر مستقل را تعیین

۵-۴. تخمین شاخص تعدیل شده سنگدانه (AAI) با رگرسیون چند متغیره

در بخش قبل با استفاده از رگرسیون تک متغیره و حداقل مربعات خطا، ارتباط خصوصیات سنگ با AAI بررسی شده است. در این بخش، رابطه AAI با هر یک از پارامتر فیزیکی-مکانیکی و همچنین بصورت مدل‌های ترکیبی با استفاده از یکی از روش‌های رگرسیون چند متغیره به نام بهترین زیرمجموعه مدلسازی صورت گرفته است. رگرسیون چند متغیره به روش بهترین زیرمجموعه می‌تواند مدل‌های رگرسیونی بهینه را شناسایی کرده و معادلات آنها را با استفاده از متغیرهای مستقل ایجاد نماید. در این پژوهش، بمنظور تخمین رگرسیون با بهترین زیرمجموعه از نرم افزار آماری Minitab استفاده شده است. مناسبترین معیارها برای بررسی صحت مدل رگرسیونی بهینه، آماره‌های Adjusted R<sup>2</sup> و Mallow's Cp می‌باشند. آماره Adjusted R<sup>2</sup> همان ضریب تعیین تعدیل شده است که در هر مدل با در نظر گرفتن تعداد متغیرها و تعداد نمونه تنظیم می‌شود (معادله ۳) (Kadane and Lazar, 2004).

$$Adjusted R^2 = 1 - \frac{(n-1)}{(n-p)}(1-R^2) \quad (3)$$

در این معادله n اندازه نمونه، p تعداد متغیرهای مستقل و R<sup>2</sup> ضریب تعیین است.

زیرمجموعه استفاده می‌شود. نتایج رگرسیون بهترین زیرمجموعه در جدول ۵ ارائه شده است. ورود پارامترها در هر مدل بر اساس مقادیر ضریب تعیین آن‌ها در رگرسیون تک متغیره است، به گونه‌ای که ابتدا پارامترهایی با ضریب تعیین بالاتر وارد شده و سپس پارامترهای با ضریب تعیین کمتر به مدل‌های بعدی وارد شده‌اند. بمنظور اطمینان از نتایج، هر مدل دوبار توسط نرم افزار تکرار شده است. بهترین مدل بالاترین مقدار Adjusted R<sup>2</sup> و کمترین مقدار Cp را خواهد داشت.

می‌کند و e خطای نرمال است که فرض می‌شود دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار باشد. بمنظور انتخاب متغیرهای مستقل مناسب برای ایجاد بهترین مدل آماری از روش رگرسیون با بهترین زیرمجموعه استفاده شده است. این روش رگرسیونی، بسیار مناسب برای شناسایی مدل‌هایی است که با کمترین تعداد متغیر مستقل، به هدف مورد نظر می‌رسند. در این روش رگرسیونی از آماره‌های Adjusted R<sup>2</sup> و Mallows' Cp برای انتخاب مناسب‌ترین

جدول ۵. نتایج رگرسیون با بهترین زیرمجموعه

Is(Mpa)	n(%)	St(Mpa)	Qai(%)	Ucs(Mpa)	Yd(g/cm <sup>3</sup> )	Vp(m/s)	Mallows' Cp	Adjusted R2	شماره مدل
						X	۱۳۰/۵	۸۹/۵	۱A
					X		۱۳۰/۹	۸۹/۵	۱B
					X	X	۷/۴	۹۷/۴	۲A
	X					X	۱۹	۹۶/۶	۲B
		X			X	X	۳/۵	۹۷/۷	۳A
X					X	X	۶	۹۷/۵	۳B
		X		X	X	X	۲/۸	۹۷/۸	۴A
X		X			X	X	۴/۸	۹۷/۷	۴B
	X	X		X	X	X	۴/۲	۹۷/۸	۵A
X		X		X	X	X	۴/۵	۹۷/۸	۵B
X	X	X		X	X	X	۶	۹۷/۷	۶A
	X	X	X	X	X	X	۶/۲	۹۷/۷	۶B
X	X	X	X	X	X		۸	۹۷/۷	۷

ضریب تعیین معادله ۶ برابر با ۰/۹۸ است که نشان می‌دهد این معادله قابل قبول و بسیار قابل اطمینان است. همچنین آنالیز واریانس برای اعتبار بخشیدن به معادله رگرسیونی انجام شده و نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. مدل پیشنهادی بر اساس ضرایب رگرسیونی و از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۹٪ (P value < ۰/۰۱) معنی دار است (جدول ۷). بنابراین مدل آماری توسعه یافته بخوبی می‌تواند شاخص تعدیل شده سنگدانه (AAI) را تخمین بزند.

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود بهترین مدل، مدل ۴ است که شامل پارامترهای سرعت موج P، مقاومت فشاری تک محوری، دانسیته خشک و مقاومت کششی می‌باشد. بسیاری از مدل‌ها دارای ضریب تعیین تعدیل شده بالا (Adjusted R<sup>2</sup>=۹۷/۸) هستند، در حالیکه فقط مدل ۴A دارای حداقل مقدار Cp (Cp=۲/۸) در بین تمامی مدل‌ها می‌باشد. نتایج آماری آنالیز رگرسیون در جدول ۶ ارائه شده است. براساس این نتایج معادله، خطی بصورت زیرحاصل شده است (معادله ۶).

$$AAI = 0.2 - 1 * 10^{-5} V_p - 0.0386 \gamma_d - 6.1 * 10^{-5} UCS - 4.42 * 10^{-4} \sigma_t \quad (6)$$

جدول ۶. نتایج تحلیل آماری رگرسیون چند متغیره

متغیرها	ضرایب	خطای استاندارد ضرایب (SE)	T	P
ثابت	۰/۱۹۹	۰/۰۰۸۶	۲۳/۲۵	۰
(m/s) $V_p$	-۱۰*۱۰ <sup>(-۵)</sup>	۱/۱*۱۰ <sup>(-۶)</sup>	-۹/۵۴	۰
(g/cm <sup>3</sup> ) $\gamma_d$	-۰/۰۳۸	۰/۰۰۴۸	-۸/۰۲	۰
(Mpa)UCS	-۶/۱*۱۰ <sup>(-۵)</sup>	۳/۵۴*۱۰ <sup>(-۵)</sup>	-۱/۷۳	۰/۰۹۳
(Mpa) $\sigma_t$	-۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۱۸	-۲/۴۳	۰/۰۲

جدول ۷. تحلیل واریانس مدل رگرسیونی برای AAI

مدل	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P
رگرسیون	۴	۰/۰۲۸	۰/۰۰۷۰	۴۲۵/۱	۰
باقیمانده	۳۴	۰/۰۰۰۵۶	۱/۶۶*۱۰ <sup>(-۵)</sup>	-	-
جمع	۳۸	۰/۰۲۹	-	-	-

## ۵. نتایج

پارامترهای سایشی و مقاومتی سنگدانه‌ها برای تعیین مناسب بودن سنگ‌های آهکی در پروژه‌های عمرانی بسیار حائز اهمیت هستند، اما تهیه نمونه و اندازه‌گیری آنها بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. بنابراین بطور جایگزین می‌توان از خصوصیات ذاتی سنگ‌ها و خصوصیات پتروگرافی آنها بهره برد. در پژوهش حاضر، سنگ‌های آهکی مورد مطالعه بر اساس پارامترهای سنگدانه و خصوصیات پتروگرافی و بمنظور کاربرد در پروژه‌های مختلف و متناسب با اهمیت پروژه طبقه بندی شده‌اند. در نهایت، این شاخص با استفاده از آنالیز آماری تک متغیره و چند متغیره و بر اساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک‌های مورد مطالعه تخمین زده شد.

۱. طبقه بندی ارائه شده برای سنگ آهک‌های استان همدان بوده و در صورت انطباق با نتایج سایر محققین و همچنین به علت تنوع کم در خصوصیات پتروگرافی سنگ‌های آهکی، قابل کاربرد برای نواحی دیگر نیز می‌باشد.

۲. بررسی ارتباط بین پارامترهای سنگدانه (AAI, LAIV و ACV) و خصوصیات پتروگرافی در طبقه بندی ارائه شده، نشان می‌دهد که وجود دولومیت در سنگ آهک‌ها سبب کاهش افت وزنی در این پارامترها شده است. از طرف دیگر، حضور بایوکلیست‌ها و تخلخل رابطه مستقیم با افزایش پارامترهای سنگدانه دارد.

۳. از میان پارامترهای سنگدانه، شاخص ارزش لس آنجلس به علت مقادیر تقریباً مشابه در رده اول و دوم برای طبقه بندی سنگ‌های آهکی مناسب نمی‌باشد.

۴. سنگ آهک‌های مورد مطالعه در این تحقیق را می‌توان در پروژه‌های بسیار حساس (سنگ آهک علیصدر) و یا در پروژه‌های با حساسیت کمتر مانند جاده‌های کم ترافیک (سنگ آهک آبشینه) استفاده نمود.

نتایج آنالیز تک متغیره نشان می‌دهد که از میان تمامی پارامترهای فیزیکی- مکانیکی، عدد واجهش چکش اشمیت برای تخمین AAI مناسب نمی‌باشد، این در حالی است که روش رگرسیون چند متغیره با حذف پارامترهای نامناسب، مدلی قوی و با سطح معناداری بالا ( $P \text{ value} < 0/01$ ) ایجاد کرده است.

## منابع

- آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، ۱۳۸۸. معاونت امور فنی دفتر امور تدوین معیارها. انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، نشریه شماره ۱۲۰، صفحه ۴۱۶.
- آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، ۱۳۸۱. دفتر امور فنی و تدوین معیارها. مرکز تحقیقات و آموزش، نشریه شماره ۲۳۴، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، وزارت راه و ترابری.
- احمدی، ۱۳۸۵، بررسی زمین شناسی مهندسی و تاثیر بافت سنگ‌های آهکی بر میزان خوردگی آنها (در محدوده استان همدان). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- استاندارد ملی ایران، ۱۳۸۶. سنگدانه‌های بتن، شماره ۹۱۴۸. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ اول.
- خانلری، غ.ر.، حیدری ترکمانی، ر.، مومنی، ع.ا.، ۱۳۸۹. مطالعات کارست و بررسی ویژگی‌های تزریق پذیری پی سنگ سد اکباتان (طرح افزایش ارتفاع). مجله پژوهش‌های چینه نگاری و رسوب شناسی، دوره ۴۱، شماره ۴، ص ۵۷-۷۲.
- درویش زاده، ع.، ۱۳۷۱. کتاب زمین شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر.
- سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۹. نقشه زمین شناسی همدان، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰. ۱.
- سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۹. نقشه زمین شناسی کوهین، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰. ۱.
- سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۷۹. نقشه زمین شناسی ملایر، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰. ۱.
- سلیمی، س.، ۱۳۸۸. بررسی زمین شناسی مهندسی سنگ آهک‌های جنوب و جنوب شرق استان همدان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- سرائی‌پور، محمد، ۱۳۶۱. آسفالت. انتشارات دهخدا، چاپ دوم.
- عثمان پور، آ.، ۱۳۹۲. مطالعه خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگ‌های آهکی شمال و شمال شرق همدان به عنوان مصالح سنگدانه‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- فاروق حسینی، م.، ۱۳۷۹. مترجم، درآمدی بر مکانیک سنگ. کاتسویاما، وتوکوری، وی، اس، نشر کتاب دانشگاهی.
- فهیمی فر، ا.، سروش، ۱۳۸۰. آزمایش‌های مکانیک سنگ: مبانی نظری و استانداردها. شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- مشخصات فنی عمومی راه، ۱۳۸۲. نشریه شماره ۱۰۱. معاونت امور فنی، دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی.
- موسیوند، م.ص.، ۱۳۸۵. بررسی زمین شناسی سد گرین نهاوند. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- موسوی حرمی، ر.، ۱۳۷۷. رسوب شناسی. انتشارات آستان قدس رضوی، چاپ پنجم.
- ناصری، ف.، ۱۳۹۲. بررسی خواص ژئومکانیکی سنگ‌های آهکی جنوب و جنوب شرق استان همدان به عنوان مصالح سنگدانه‌ای. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا همدان.
- Akesson, U., Lindqvist, J.E., Goransson, M., 2001. Relationship between texture and mechanical properties of granite, Central Sweden, by use of Image-Analysing Techniques. *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, 60: 277-284.
- Al-Harathi, A.A., 2001. A field index to determine the strength characteristic of crushed aggregate. *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, 60: 1-14.
- ASTM C 131, 2006. Test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. *Annual Book of ASTM Standards Concrete and Aggregates*, West Conshohocken, United States.
- Azimah, H., 2007. Mineralogy and geochemistry of rock aggregates and their relation to the interfacial transition zone (ITZ) in concrete. PhD thesis. University of Leeds.
- Califford Teme S., 1991. An evaluation of the engineering properties of some Nigerian limestones as construction materials for highway pavement. *Engineering geology*, 31: 315-326.



- Construction Standard CS3, 2013. Aggregates for Concrete, Technology, Ed., The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Hong Kong.
- Egeesi, N., Akaha C.T., 2012. Engineering-Geological Evaluation of Rock Materials from Bansara, Bamenda Massif Southeastern Nigeria, as Aggregates for Pavement Construction. *Geosciences*, 5: 107-111
- Heidari, M., Khanlari, G.R., Taleb Beydokhti, A.R., Momeni, A.A. 2011. The formation of cover collapse sinkholes in North of Hamedan, Iran. *Geomorphology*, 132 (3-4): 76-86.
- Ioannoui, I., Petroum, M.F., Fournari, R., Andreou, A., Hadjigeorgiou, C., Tsikouras, B., Hatzipanagiotou, K., 2010. Crushed limestone as an aggregate in concrete production: the Cyprus case. *Geological Society, London, Special Publications*, 331: 127-135
- ISRM, 1981. ISRM suggested methods: rock characterization. Testing and Monitoring: International Society of Rock Mechanics Suggested Methods. Pergamon Press, London.
- ISRM, 1985. Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomechanics Abstract*, 22 (2): 51-60.
- ISRM, 1978. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomechanics Abstract*, 15: 99-103.
- Kadane, J.B., Lazar, N.A., 2004. Methods and criteria for model selection. *Journal of the American Statistical Association*, 99: 279-290.
- Karimi, H., Taheri, K., 2010. Hazards and mechanism of sinkholes on Kabudar Ahang and Famenin plains of Hamadan, Iran. *Natural Hazards*, 55: 481-499.
- Khanlari, G.R., Ahmadi, L., Mohammadi, S.D., 2012. A Geotechnical Investigation of the Effect of Grain Size and Texture of Calcareous Rocks on Their Engineering Behavior, 7th EureGeo2012, Bologna, Italy.
- Koukis, G., Sabatakakis, N., Spyropoulos, A., 2007. Resistance variation of low-quality aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66:457-466
- Lee, S.G., De Freitas, M.H., 1988. Quantitative definition of highly weathered granite using the slake durability test. *Geotechnique*, 38: 635-640.
- Naeem, M., Khalid, P., M.Sanaullah, Z., 2014. Physio-mechanical and aggregate properties of limestones from Pakistan. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 49:369-380.
- Pikriyl, R., 2001. Some microstructure aspects of strength variation in rocks. *Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38: 671-682.
- Sepahi, A.A., 1999. Petrology of Alvand Plutonic Complex with Special Reference on Granitoids. Thesis (PhD). In Persian Tarbiat Moallem university of Tehran, Iran.
- Ugur, I., Demirdag, S., Yavuz, H., 2010. Effect of rock properties on the Los Angeles abrasion and impact test characteristics of the aggregates. *Materials characterization*, 61: 90 - 96.