

## بررسی کارایی روش عدد پتروگرافی در تعیین کیفیت برخی از مصالح سنگی کشور جهت استفاده در سازه های حفاظت دریایی

مجتبی کمانی<sup>۱</sup>، رسول اجل لوئیان<sup>۲\*</sup>

پذیرش مقاله: ۹۷/۰۶/۳۱

دریافت مقاله: ۹۶/۱۰/۲۴

### چکیده

آیین نامه های مختلفی برای ارزیابی منابع سنگی به ویژه سنگ های آهکی جهت استفاده در سازه های آبی ارائه شده است. اگرچه تفاوت هایی بین این آیین نامه ها وجود دارد ولی برای ارزیابی مصالح سنگی طبق این آیین نامه ها، آزمایشات متعددی مورد نیاز است که اغلب وقت گیر، هزینه بر و بعضاً به لحاظ اجرایی مشکل خواهد بود. روش عدد پتروگرافی، یکی از روش های سریع، آسان و کم هزینه در این زمینه است که پیشنهاداتی برای بیان کیفیت مصالح سنگ آهکی دارد. در روش عدد پتروگرافی درصد مولفه های پتروگرافی سنگ شامل نوع آلومک، تخلخل، سیمان و ماتریس، کانی های کربناته و غیرکربناته بدست آمده و با روش جمع عددی تبدیل به یک عدد به نام عدد پتروگرافی می شود. در این مقاله به بررسی این روش پرداخته شده است. بدین منظور تعداد ۳۳ نمونه از سنگ آهک مورد استفاده در سازه های حفاظت دریایی در سواحل جنوب و سدهای داخل کشور جمع آوری شده است. آزمایشات وزن واحد حجم، درصد جذب آب، ارزش ضربه ای، شاخص بار نقطه ای، مقاومت تراکمی تک محوره، سلامت سنگ در سولفات، شاخص دوام و سایش لس آنجلس بر روی نمونه ها انجام گرفته است. همچنین به منظور تعیین عدد پتروگرافی، از همان نمونه ها مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه و عدد پتروگرافی برای آنها محاسبه شده است. سپس به بررسی همبستگی و سطح معناداری بین عدد پتروگرافی با نتایج آزمایشات پرداخته شده است. همچنین نتایج طبقه بندی حاصل از آیین نامه های مختلف با طبقه بندی حاصل از عدد پتروگرافی سنجیده شده است. به طور کلی، نتایج حاکی از وجود ارتباط مناسب بین عدد پتروگرافی با نتایج آزمایشات و آیین نامه ها دارد. ضریب همبستگی (R) بین عدد پتروگرافی با سایر نتایج آزمایشات به جزء سلامت سنگ در سولفات و مقاومت تراکمی تک محوره، بزرگتر از ۰/۷۹ است. همچنین رابطه ی بین عدد پتروگرافی با مجموع امتیازات معیار وزارت راه ضریب همبستگی برابر  $R^2=0/86$  نشان می دهد.

**کلید واژه ها:** روش عدد پتروگرافی، کیفیت مصالح آهک، سازه های حفاظت دریایی، معیارهای انتخاب مصالح سنگی.

۱. دانشجوی دکترای زمین شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان

۲. استاد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

ایران با داشتن بیش از ۱۶۰۰ کیلومتر ساحل و همچنین نیاز به استفاده از این خط ساحلی جهت توسعه صنعت، تجارت، حمل و نقل، گردشگری و همچنین احداث پایگاه‌های دفاعی نیازمند ساخت سازه‌های مختلف دریایی و ساحلی می‌باشد. از طرف دیگر ساخت سدهای بزرگ و کوچک در داخل کشور هم نیازمند استفاده از مصالح سنگی می‌باشد. توصیه‌ها و آیین‌نامه‌های مختلفی برای ارزیابی منابع سنگی جهت استفاده در سازه‌های حفاظت دریایی و هیدرولیکی در داخل و خارج از کشور ارائه شده است (جدول ۱). اگرچه تفاوت‌هایی بین این آیین‌نامه‌ها از نظر تعداد و نوع آزمایشات وجود دارد ولی برای ارزیابی مصالح سنگی طبق این آیین‌نامه‌ها، آزمایشات متعددی مورد نیاز است که اغلب وقت‌گیر، هزینه‌بر و به لحاظ اجرایی بعضاً دشوار است. از نقطه نظر زمین‌شناسی مهندسی، خصوصیات مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی سنگ بکر مرتبط با ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی سنگ است و همین عوامل بر روی رفتار مهندسی سنگ در شرایط گوناگون اثر گذار است (Shakoor and Bonelli, 1991; Ulusay et al., 1994; Tamrakar et al., 2007; Tandon and Gupta, 2013; Ajalloeian and Kamani, 2017). به هر حال وجود ناهمسانی در سنگ‌های با ویژگی‌های بافتی و پتروگرافی متفاوت باعث شده است که محققین روش‌ها و متغیرهای مختلفی برای بیان ویژگی‌های پتروگرافی و بافتی ارائه دهند (Howarth and Rowlands, 1987; Nishiyama et al., 2002; Ündül, 2016; Kamani and Ajalloeian, 2018). یکی از روش‌های سریع، آسان و کم هزینه، در این زمینه استفاده از عدد پتروگرافی (Petrographic Number, PN) است که با توجه به بررسی‌های مقاطع نازک میکروسکوپی انجام می‌گیرد (McClellan et al., 2002). در روش عدد پتروگرافی، اعتقاد بر آن است که خصوصیات دوام و استحکام سنگ ناشی از ویژگی‌های درونی و ذاتی سنگ است و استفاده از این روش می‌تواند در مراحل ابتدایی پروژه با صرف هزینه و زمان کم برآورد اولیه و مناسبی از کیفیت منابع سنگی در اختیار قرار

دهد. این روش ابتدا توسط Rogers (1940) مطرح شد. در ۱۹۷۳ به تأیید انجمن استاندارد کانادا رسید و در ۱۹۸۵ به عنوان روش وزارت راه اتاریو برای دستیابی سریع و ارزیابی کیفیت منابع قرضه سنگدانه پذیرفته شده است Rogers (1990) و (Bayne and Brownridge, 1955) از عدد پتروگرافی جهت ارزیابی سنگدانه‌های بتن استفاده نمودند. Oyen و همکاران (1998) این روش را برای بررسی کاربرد سنگدانه‌های آهکی توصیه نمودند. McClellan و همکاران (۲۰۰۲) از این روش برای ارزیابی منابع مصالح سنگی در سازه‌های حفاظت دریایی ایالت فلوریدا استفاده نموده است. در این پژوهش با توجه به گسترش زیاد مصالح سنگ آهک در جنوب و مرکز ایران و استفاده زیاد از آنها در پروژه‌های عمرانی، به بررسی کارایی روش عدد پتروگرافی، در تعیین کیفیت برخی از منابع سنگ آهک مورد استفاده در پروژه‌های کشور پرداخته شده است.

## ۲. مواد و روش

تعداد ۳۳ نمونه از سنگ آهک مورد استفاده در پروژه‌های عمرانی کشور مانند موج شکن و سنگ لاشه از معدن حسن-آباد، سرشو و همچنین منابع سنگ آهک مورد مطالعه برای سدها مانند سد بهشت‌آباد گردآوری شده است. نمونه‌های مورد آزمایش از گروه سنگ آهک طبق تقسیم‌بندی دانه‌ام (۱۹۶۲) می‌باشد و شامل سه نمونه سنگ آهک بلورین، چهار نمونه گریستون، یازده نمونه وکستون، چهار نمونه پکستون، هفت نمونه گل‌سنگ (Mudstone)، دو نمونه دورگه (mixed carbonate)، یک نمونه بافلستون و یک نمونه دولومیت است. آزمایشات رایج برای بررسی کیفیت منابع مصالح سنگی بر روی این نمونه‌ها انجام گرفته است. این آزمایشات شامل آزمایش ارزش ضربه‌ای طبق استاندارد BS-8812، مقاومت بار نقطه‌ای طبق ASTM D5731، مقاومت تراکمی تک محوره طبق ASTM D2938، شاخص دوام شکستگی طبق ASTM D4644، سایش لوس‌آنجلس طبق ASTM C131-C535، سلامت سنگ طبق ASTM C88، وزن واحد حجم و جذب آب طبق ASTM D2216-10 انجام گرفته است. این

آزمایشات طبق استانداردهای جهانی (ASTM, B.S. (1989) و (2013) و (1978) ISRM انجام گرفته است. همچنین از هر نمونه، مقطع نازک میکروسکوپی تهیه و مطالعات پتروگرافی

#### جدول ۱. تعدادی از مطالعات و معیارهای ارائه شده توسط محققین داخلی و خارجی

نام محقق / سال	کشور	توضیحات
وزارت راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۸۸)	ایران	سنگهای مورد استفاده در سازه های ساحلی و دریایی کشور را در سه گروه سنگهای آهکی - ماسه سنگی، لوماشل و سنگهای آذرین طبقه بندی نموده و برای هر گروه بطور مجزا معیار و نحوه امتیازدهی به پارامترها را ارائه نموده است.
تلخابلو (۱۳۸۶)	ایران	معیارهای انتخاب سنگ برای سه گروه سنگهای آهکی، آذرین و لوماشل را به صورت مجزا پیشنهاد نموده است.
امینی (۱۳۸۵)	ایران	معیاری را جهت جهت انتخاب مصالح سنگی در سواحل جنوبی ایران ارائه داده است.
نیکودل (۱۳۶۹)	ایران	معیاری را به صورت سیستم امتیازدهی برای ارزیابی کیفیت سنگهای آذرین، به منظور استفاده از آن در در موج شکن ها ارائه نموده است.
جلالی (۱۳۶۹)	ایران	معیار استفاده از سنگهای آذرین گنبد نمکی گچین ارائه نموده است.
OCDI (2002)	ژاپن	محدوده خواص فیزیکی و مکانیکی قابل قبول سنگها ارائه شده است.
McClellan et al. (2002) (ASTM STP 1061)	آمریکا (فلوریدا)	روش عدد پتروگرافی را در ارزیابی سنگدانه ها و سنگچین های فلوریدا بررسی و توصیه نموده اند.
BS (2000)	بریتانیا	برای انتخاب سنگ مناسب جهت کاربرد در لایه حفاظ موج شکن ارائه شده است.
CUR (2000)	عمومی	معیاری عمومی جهت ارزیابی سنگ برای استفاده در سازه های دریایی است که سنگ ها را بر اساس مقادیر هر یک از پارامترهای فیزیکی، مقاومتی و شیمیایی به چهار گروه عالی، خوب، متوسط و ضعیف تقسیم می کند.
Mather (1985)	استرالیا	خصوصیاتی از سنگها را که برای استفاده به عنوان لایه حفاظ در موج شکن های توده سنگی مورد نیاز می باشد، مورد بحث و بررسی قرار داده اند.

نوع سیمان یا ماتریس و کانی های غیر کربناته است. در این روش برای هر کدام از این مولفه های اصلی، یک فاکتور وزنی وجود دارد که برای استفاده در امتیازدهی عددی استفاده می شود. در نهایت این فاکتورهای وزنی در مقادیر درصد هر مولفه ضرب شده و از جمع آنها مقادیر عدد پتروگرافی محاسبه می گردد. مقادیر فاکتورهای وزنی مرتبط با مقاومت و پایداری در برابر عوامل فیزیکی و شیمیایی است (Oyen et al., 1998). مقادیر فاکتور وزنی برابر با یک برای دانه هایی با دوام ایده آل است و مقادیر بزرگتر از یک به ترتیب مرتبط به موادی با کیفیت ضعیف تر است. بنابراین به مقاوم ترین عناصری که در بافت سنگ وجود دارد، فاکتور وزنی برابر با یک (۱/۰) اختصاص داده شده است. در روش پیشنهاد شده توسط Oyen et al., 1998 (ASTM STP 1061) به دانه های

#### ۱-۲. روش عدد پتروگرافی

روش های بررسی پتروگرافی منابع سنگدانه و طبقه بندی توصیفی آنها از دهه ۱۹۴۰ آغاز گردید. در این روش ها با بررسی پتروگرافی نمونه های سنگ به صورت نمونه دستی و یا میکروسکوپی به طبقه بندی منابع سنگدانه برای اهداف مختلف مهندسی پرداخته می شود. یکی از روش های مطرح در این زمینه روش عدد پتروگرافی است. در روش عدد پتروگرافی که بر پایه مطالعات میکروسکوپی مقطع نازک نمونه سنگ استوار است، سعی شده به درصد و نوع ترکیب کانی شناسی، تخلخل، سیمان، ماتریس و بافت سنگ، همزمان توجه شود و با استفاده از امتیازدهی عددی، ویژگی های پتروگرافی سنگ را کمی نماید. مولفه های مورد استفاده در روش عدد پتروگرافی شامل: نوع آلومک یا دانه، نوع تخلخل،

است. برای حفرات قالبی (Moldic) که بر اثر انحلال یا حذف دانه‌های فسیل (معمولاً آراگونیتی) حفرات بزرگی ایجاد می‌شوند، فاکتور وزنی ۳/۰ در نظر گرفته می‌شود. به تخلخل بین دانه‌ای که بین آلوک‌ها در اثر آرایش دانه‌ها و در هنگام رسوبگذاری معمولاً حفرات بزرگ ایجاد می‌کند، فاکتور وزنی ۳/۰ اختصاص داده شده است. به تخلخل درون دانه‌ای و درون بلوری که اندازه‌های کوچکتری دارند، فاکتور وزنی ۲/۰ اختصاص داده شده است. در این روش تاثیر دانه‌های غیرکربناته هم در نظر گرفته شده است. چرت، کوارتز، کانی‌های اپک و کانی‌های رسی از جمله کانی‌های غیرکربناته در سنگ‌های آهکی هستند. به جزء چرت و کوارتز، به دانه‌های غیرکربناته فاکتور وزنی ۶/۰ اختصاص داده شده است. این فاکتور وزنی زیاد به دلیل تاثیر مخرب آنها در دوام و استحکام مصالح سنگی است. کانی‌های اپک به شدت هوازده و اکسید شده و باعث تخریب و زوال بافت سنگ می‌شود. کانی‌های رسی دارای مقاومت ذاتی کمی هستند و با جذب رطوبت متورم شده و بافت سنگ را تخریب می‌کند (McClellan et al., 2002).

طبق مطالب بیان شده، می‌توان عدد پتروگرافی را از رابطه (۱) بدست آورد. درصد هر مولفه را می‌توان با استفاده از روش نقطه شمار در زیر میکروسکوپ که روشی معمول در کارهای پتروگرافی است، محاسبه نمود. سپس امتیاز آن مولفه در درصد آن ضرب شده و از مجموع آنها، عدد پتروگرافی مربوط به نمونه بدست می‌آید.

$$PN=1.3S_{FG}+S_{NF}+3S_{HP}+2S_{SP}+1.5S_M+S_S+1.5S_D+S_Q+6S_O+6S_C \quad (1)$$

در این رابطه، PN عدد پتروگرافی و S درصد هر مولفه شامل: FG دانه‌های فسیل، NF دانه‌های غیر فسیل، HP تخلخل و حفرات بزرگ (غاری، قالبی، بین‌دانه‌ای)، SP تخلخل و حفرات ریز (درون دانه‌ای و درون بلوری)، M میکرایت، S اسپارایت، D دانه‌ها و سیمان دولومیتی، Q کوارتز و چرت، O کانی‌های اپک و C کانی‌های رسی است.

### ۳. نتایج

غیر فسیلی مانند پلوئید، ایید، ایتراکلاست و دانه‌های اگریگات فاکتور وزنی یک، به دلیل ماهیت متراکم، فشرده و پتانسیل مقاومت زیادتر آنها اختصاص داده شده است. در این روش، فاکتور وزنی ۱/۳ برای دانه‌های فسیلی در نظر گرفته شده زیرا اکثر فسیل‌هایی که در اینگونه سنگ‌ها وجود دارد از آراگونیت تشکیل شده است که یک فاز ناپایدار از کربنات کلسیم است و به شدت مستعد هوازدهی و تغییر شکل به فازهای پایدارتر است. به هر حال فسیل‌ها معمولاً دارای دیواره نازک‌تر هستند و مقاومت و پایداری کمتری دارند. وزن ماتریس و سیمان در سنگ‌های کربناته با توجه به واکنش پذیری و اندازه ذراتشان اختصاص می‌یابد. به میکرایت (ذرات کوچکتر از چهار میکرون)، فاکتور وزنی ۱/۵ اختصاص داده شده است زیرا معمولاً میکرایت از تجمع واریزه‌های کربناته زیستی با مرزهای آزاد تشکیل می‌گردد. این موضوع باعث شده که به راحتی در معرض واکنش‌های مختلف شیمیایی و فیزیکی قرار گیرد. برعکس، اسپارایت از بلورهای کلسیت بزرگتر نسبت به میکرایت تشکیل شده است و در نتیجه پتانسیل واکنش‌پذیری کمتری به دلیل کاهش مساحت ویژه دارد. همچنین اسپارایت از رسوب و ته‌نشست مستقیم از محلول تشکیل شده و مرزهای بلوری محکم به هم متصل شده دارد. در نتیجه فاکتور وزنی ۱/۰ به اسپارایت و میکرواسپارایت تخصیص یافته است.

تخلخل یک عامل مهم در دوام و پایداری مصالح سنگی است. با توجه به روش پیشنهادی Choquette and Pray, 1970 پنج نوع تخلخل اصلی در سنگ‌های آهکی تشخیص داده شده که در روش عدد پتروگرافی بر اساس اندازه حفرات آنها به هر کدام یک فاکتور وزنی اختصاص داده شده است. این فاکتورهای وزنی طوری است که برای حفرات با اندازه بزرگتر، عدد بزرگتری در نظر گرفته شده است زیرا هرچه حفرات بزرگتر باشد، دوام و پایداری سنگ کمتر خواهد شد. برای مثال، برای حفرات غاری (Vuggy) که معمولاً بر اثر فرآیندهای بزرگ انحلال ایجاد شده و اندازه حفره‌ای بزرگتر از ۱/۵ میلی‌متر دارند، فاکتور وزنی ۳/۰ اختصاص داده شده

مگاپاسکال را در بر می گیرد. ۱۸/۲ درصد از نمونه ها دارای مقاومت زیر ده مگاپاسکال هستند که همگی آنها عدد پتروگرافی بزرگتر از ۱۷۶ دارند.

آزمایشات درصد افت وزنی در سولفات سدیم، شاخص دوام شکستگی و درصد افت سایش لوس آنجلس انجام گرفته است. اگرچه این آزمایش ها تا حدی شرایط محیطی را شبیه سازی می کنند اما هرکدام به تنهایی نمی توانند نمایانگر تمام شرایط محل باشند و قسمتی از آن را شبیه سازی می کنند (Fookes et al., 1988). نتایج آزمایش درصد افت وزنی در سولفات در محدوده ای بین ۰/۱ تا ۵۸/۰ قرار می گیرد. شاخص دوام محدوده ای بین ۵۵/۲۵ تا ۹۸/۱۵ دارد. حدود ۱۸/۲ درصد از نمونه ها دارای شاخص دوام کمتر از ۷۰ درصد هستند که همه ای آنها عدد پتروگرافی بزرگتر از ۱۶۹/۸ دارند. ۲۴/۳ درصد نمونه ها دارای بیش از ۵۲ درصد افت وزنی در آزمایش سایش لوس آنجلس هستند که همگی آنها دارای عدد پتروگرافی بزرگتر از ۱۶۹ هستند. ۴-۱ ارزیابی روش عدد پتروگرافی بر اساس روش های آماری

برای آنکه دریابیم که آیا ارتباط معناداری بین عدد پتروگرافی به عنوان نماینده ای از ویژگی های پتروگرافی با نتایج آزمایشات وجود دارد یا نه، به بررسی همبستگی و سطح معناداری (مقادیر P) بین عدد پتروگرافی با سایر نتایج آزمایشات پرداخته شده است (جدول ۴). بررسی های آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد در نرم افزار SPSS 21 انجام شده است. این روش رایج برای بررسی های آماری و ارتباط بین پارامترهای مختلف است (Tiryaki and Dikmen 2006; Kamani and Ajalloeian, 2017). با بررسی نتایج ضریب همبستگی (R) و مقادیر P، مشخص می شود که ارتباط معناداری بین عدد پتروگرافی با برخی از خصوصیات مهندسی سنگ برقرار است (جدول ۴). ضریب  $R^2$  تغییرات دوسری داده توسط معادله رگرسیونی را بیان می کند و هر چه به یک نزدیکتر باشد، ارتباط بین متغیرها کاملتر و شدیدتر است.

نتایج آزمایشات انجام شده به همراه پارامترهای آماری آن در جدول (۲) ارائه شده است. در این تحقیق بررسی های سنگ-شناسی در قالب تعیین عدد پتروگرافی انجام شده است. از بین ۳۳ نمونه مورد بررسی، عدد پتروگرافی در محدوده ای بین ۱۱۴/۵ تا ۱۹۸/۸ قرار دارد (جدول ۲).

با افزایش عدد پتروگرافی، کیفیت و کارایی نمونه ها کاهش می یابد به طوری که به اعتقاد (ASTM STP Rogers, 1990) 1061 منابع سنگی دارای عدد پتروگرافی کمتر از ۱۴۰، خوب و بین ۱۴۰ تا ۱۶۰ نسبتاً خوب تا ضعیف و بیش از ۱۶۰ معمولاً ناکارآمد هستند (McClellan et al., 2002). رده بندی نمونه ها با توجه به عدد پتروگرافی در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به این رده بندی در حدود ۳۶ درصد نمونه ها برای استفاده در سازه های حفاظت دریایی ناکارآمد و نامناسب هستند.

#### ۴. بحث و بررسی

درصد جذب آب مربوط به نمونه ها محدوده بین ۰/۱۵ تا ۲۱/۲۰ دارد. ۱۸/۲ درصد از نمونه ها دارای بیش از ۱۵ درصد جذب آب هستند که عدد پتروگرافی این نمونه ها بزرگتر از ۱۷۶ است. آزمایشات مکانیکی شامل: تعیین درصد افت وزنی در آزمایش ارزش ضربه ای، شاخص مقاومت بار نقطه ای و مقاومت تراکمی تک محوره است. در حدود ۳۳ درصد نمونه ها دارای افت وزنی بیش از ۳۰ درصد هستند که از نظر استاندارد B.S. 812, 1990 نامرغوب می باشند (B.S.-812, 1989). این نمونه ها همگی عدد پتروگرافی بزرگتر از ۱۶۱ دارند. نتایج آزمایشات شاخص بار نقطه ای بین ۰/۵۴ تا ۵/۱۵ مگاپاسکال قرار دارد. طبق تقسیم بندی (Broch and Franklin 1972) ۵۷/۶ درصد نمونه ها در رده با مقاومت خیلی بالا، ۳۶/۴ درصد در رده مقاومت بالا و ۶ درصد در رده مقاومت متوسط قرار می گیرند. دو نمونه ای که در رده متوسط (شاخص بار نقطه ای بین ۰/۳ تا ۱ مگاپاسکال) قرار می گیرد دارای عدد پتروگرافی ۱۷۹/۹ و ۱۹۸/۸ هستند. نتایج آزمایش مقاومت تراکمی تک محوره محدوده ای از ۴/۴ تا ۱۳۰/۶۲

جدول ۲. نتایج آزمایشات و پارامترهای آماری آن

سنگ‌شناسی	آزمایشات شبیه‌سازی			آزمایشات مکانیکی			آزمایشات فیزیکی		آزمایش شماره
	عدد پتروگرافی	سایش لوس آنجلس (%)	دوام (%)	افت وزنی در سولفات (%)	مقاومت تک محوره (MP)	بار نقطه‌ای (MPa)	ارزش ضربه‌ای (%)	جذب آب (%)	
۱۴۸,۹۰	۲۶,۳۰	۹۰,۱۲	۵۸,۰۰	۶۱,۵۳	۳,۳۵	۱۵,۶۰	۳,۰۷	۲۴,۲۰	۱
۱۴۱,۰۰	۴۳,۶۰	۹۲,۱۰	۱۲,۷۰	۸۲,۰۰	۴,۸۰	۱۶,۱۰	۶,۰۰	۲۰,۵۰	۲
۱۳۹,۷۰	۳۴,۹۰	۹۳,۰۰	۹,۸۵	۴۹,۸۰	۳,۲۹	۱۵,۲۰	۵,۱۰	۱۹,۶۰	۳
۱۷۶,۱۵	۷۳,۱۰	۸۷,۱۰	۱۱,۴۷	۸,۷۴	۱,۲۰	۵۵,۵۷	۱۵,۴۰	۱۸,۲۰	۴
۱۴۶,۰۵	۳۲,۸۵	۸۳,۸۰	۱۳,۴۰	۱۴,۹۰	۲,۱۳	۱۴,۰۶	۱۱,۵۰	۱۹,۱۰	۵
۱۸۳,۰۰	۶۶,۷۰	۷۴,۸۰	۵۳,۲۰	۸,۰۰	۱,۲۰	۴۱,۶۶	۱۷,۴۰	۱۷,۸۰	۶
۱۶۱,۰۵	۴۶,۲۰	۸۱,۳۰	۹,۳۵	۴۰,۰۰	۳,۴۸	۳۸,۲۰	۹,۸۰	۱۹,۲۰	۷
۱۶۲,۷۰	۴۷,۱۰	۸۲,۰۰	۱۲,۱۰	۱۷,۵۰	۱,۴۸	۳۸,۰۰	۷,۶۰	۱۷,۲۰	۸
۱۸۰,۵۸	۶۹,۱۰	۷۷,۶۰	۵۲,۴۰	۶,۴۰	۱,۰۵	۵۹,۴۰	۱۵,۲	۱۸,۱۰	۹
۱۳۶,۳۰	۱۹,۱۸	۹۸,۱۵	۰,۱۰	۸۲,۷۰	۳,۱۰	۹,۶۵	۱,۱۰	۲۵,۳۰	۱۰
۱۲۹,۰۰	۲۱,۵۹	۹۷,۱۴	۲,۹۰	۷۲,۴۴	۴,۰۹	۱۱,۷۱	۱,۸۹	۲۴,۱۰	۱۱
۱۳۶,۵۰	۲۰,۲۰	۹۷,۱۴	۱,۳۰	۶۸,۱۹	۳,۳۵	۱۰,۸۱	۱,۲۳	۲۴,۶۰	۱۲
۱۱۴,۱۰	۲۲,۱۴	۹۴,۰۰	۲,۱۰	۶۱,۰۰	۵,۱۵	۹,۲۰	۲,۰۰	۲۴,۰۰	۱۳
۱۲۸,۷۰	۲۶,۰۱	۹۱,۲۹	۴,۲۵	۵۴,۸۰	۳,۳۰	۱۶,۰۰	۳,۵۰	۲۳,۴۰	۱۴
۱۳۴,۶۰	۲۳,۲۶	۹۶,۱۵	۳,۳۰	۴۴,۶۳	۵,۱۲	۱۵,۶۰	۲,۱۸	۲۴,۰۰	۱۵
۱۱۸,۹۰	۲۰,۰۲	۹۶,۲۶	۳,۶۰	۳۸,۱۷	۳,۵۶	۱۱,۲۱	۱,۱۷	۲۴,۱۰	۱۶
۱۵۲,۰۰	۳۶,۹۸	۸۷,۸۰	۹,۶۰	۳۷,۳۰	۲,۰۴	۲۳,۴۰	۷,۴۰	۲۱,۵۰	۱۷
۱۷۳,۲۰	۴۹,۲۱	۸۳,۱۰	۱۶,۱۸	۱۷,۸۱	۱,۳۶	۳۴,۲۵	۱۳,۵	۱۷,۲۰	۱۸
۱۷۹,۹۰	۶۳,۸۷	۷۶,۹۵	۲۱,۲۰	۶,۸۹	۰,۹۵	۴۵,۰۰	۱۹,۱	۱۶,۱۰	۱۹
۱۷۵,۲۰	۷۶,۸۹	۸۴,۳۸	۴۲,۹۰	۲۸,۵۶	۱,۰۷	۳۷,۶۲	۷,۶۱	۲۰,۴۰	۲۰
۱۳۲,۰۰	۲۳,۰۰	۹۱,۵۲	۶,۱۲	۵۰,۰۰	۴,۸۰	۱۱,۳۰	۴,۶۰	۲۲,۵۸	۲۱
۱۴۰,۳۶	۳۲,۸۰	۹۴,۳۲	۵,۰۷	۴۹,۴۴	۳,۱۰	۱۲,۵۱	۱,۸۰	۲۵,۵۱	۲۲
۱۶۵,۵۰	۳۷,۲۰	۸۳,۵۶	۴,۰۷	۵۹,۶۳	۱,۴۳	۱۵,۴۳	۲,۵۶	۲۵,۵۵	۲۳
۱۹۸,۸۰	۷۴,۵۵	۵۵,۲۵	۲۱,۵۵	۴,۴۰	۰,۵۴	۶۵,۵۰	۲۱,۲۰	۱۵,۲۱	۲۴
۱۳۵,۸۱	۲۶,۱۰	۹۴,۲۳	۷,۶۱	۱۱۶,۲۲	۳,۴۱	۸,۷۷	۰,۱۹	۲۶,۷۰	۲۵
۱۴۶,۱۰	۳۸,۲۵	۸۱,۶۰	۱۱,۱۳	۳۴,۱۵	۳,۱۰	۲۲,۷۰	۸,۱۰	۲۰,۵۱	۲۶
۱۶۹,۸۰	۵۲,۴۰	۷۸,۰۳	۱۵,۴۸	۱۶,۶۴	۱,۹۳	۳۸,۳۰	۱۳,۶۰	۱۸,۳۵	۲۷
۱۸۶,۲۰	۶۲,۶۳	۶۹,۲۰	۱۸,۸۶	۷,۱۰	۱,۴۲	۵۱,۴۰	۱۸,۹۰	۱۶,۸۲	۲۸
۱۳۱,۳۲	۲۶,۶۰	۹۵,۵۸	۲۰,۴۵	۹۸,۴۴	۳,۷۳	۸,۷۲	۰,۱۵	۲۶,۷۰	۲۹
۱۳۴,۷۰	۱۷,۰۳	۹۸,۱۵	۰,۷۰	۶۷,۲۰	۴,۱۴	۱۰,۵۳	۰,۹۸	۲۳,۶۰	۳۰
۱۳۳,۴۵	۲۲,۶۰	۹۵,۱۲	۱۵,۴۷	۱۲۲,۵۰	۳,۸۳	۸,۸۹	۰,۲۸	۲۶,۶۰	۳۱
۱۴۶,۸۰	۲۲,۷۰	۹۱,۲۱	۱۲,۸۰	۶۰,۰۷	۳,۱۸	۱۲,۹۷	۲,۰۳	۲۴,۳۶	۳۲
۱۴۰,۱۹	۲۰,۸۰	۹۱,۸۵	۱۰,۵۰	۱۳۰,۶۲	۴,۴۹	۹,۱۷	۰,۴۵	۲۶,۳۹	۳۳
۱۴۸,۹۰	۳۸,۶۶	۸۷,۸۱	۱۴,۸۳	۴۹,۰۲	۲,۸۵	۲۴,۰۷	۶,۸۶	۲۱,۷۴	میانگین
۲۱,۵۹	۱۸,۸۹	۹,۴۶	۱۵,۲۳	۳۴,۸۵	۱,۳۵	۱۷,۰۵	۶,۵۰	۳,۵۳	انحراف معیار
۱۱۴,۱۰	۱۷,۰۳	۵۵,۲۵	۰,۱۰	۴,۴۰	۰,۵۴	۸,۷۲	۰,۱۵	۱۵,۲۱	حداقل

۱۹۸،۸۰	۷۶،۸۹	۹۸،۱۵	۵۸،۰۰	۱۳۰،۶۲	۵،۱۵	۶۵،۵۰	۲۱،۲۰	۲۶،۷۰	حداکثر
--------	-------	-------	-------	--------	------	-------	-------	-------	--------

جدول ۳. رده های مختلف عدد پتروگرافی و رده بندی نمونه ها (رده بندی برگرفته از Rogers, 1990)

عدد پتروگرافی	<140	140-160	>160
توصیف رده	خوب	متوسط، نسبتاً خوب	ضعیف و ناکارآمد
تعداد نمونه	۱۵	۶	۱۲
درصد	۴۵/۴۵	۱۸/۱۸	۳۶/۳۶

در شکل (۱) انواع رابطه بین عدد پتروگرافی با سایر ویژگی های مهندسی نمایش داده شده است. در این شکل، روابط خطی و بهترین رابطه غیرخطی بین عدد پتروگرافی با ویژگی های مهندسی نمونه ها ارائه شده است.

#### ۴-۲. ارزیابی روش عدد پتروگرافی بر اساس بررسی مقادیر حدی

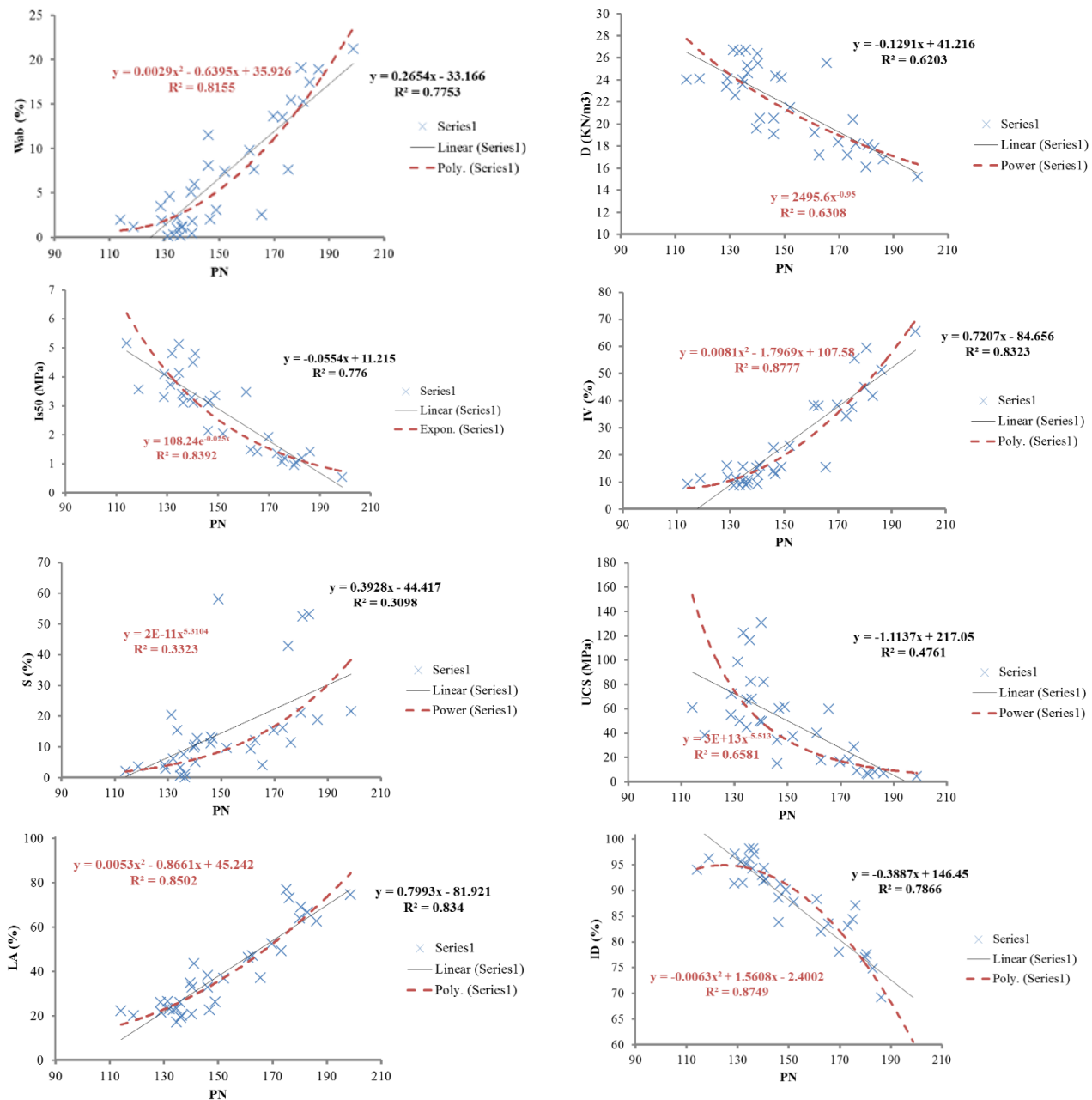
در آیین نامه وزارت راه (۱۳۸۸) توصیه هایی در مورد مقادیر حدی نتایج آزمایشات مختلف آورده شده است. مقادیر حدی برای سنگ های آهکی در جدول (۵) به همراه تعداد نمونه هایی از این تحقیق که حداقل لازم را دارا نیستند، ارائه شده است. علاوه بر تعداد و درصد نمونه های مردود در هر آزمایش، کمترین عدد پتروگرافی مربوط به همان نمونه ها ارائه شده است.

مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ به معنای وجود ارتباط معنادار و نه تصادفی در سطح اطمینان ۹۵٪، بین متغیرهای مورد نظر است (مومنی و قیومی، ۱۳۹۵؛ Norusis, 2002). با افزایش عدد پتروگرافی درصد ارزش فشاری، درصد ضربه ای، سایش لوس آنجلس، جذب آب و سلامت سنگ در سولفات سدیم افزایش یافته در حالی که دوام، وزن واحد حجم، شاخص بارنقطه ای و مقاومت فشاری تک محوره کاهش می یابد. به عبارت دیگر همان طور که انتظار می رفت با افزایش عدد پتروگرافی کارایی و کیفیت نمونه ها هم کاهش می یابد (جدول ۴). کمترین ضریب همبستگی بین عدد پتروگرافی با آزمایش سلامت سنگ ( $R=0.56$ ) و مقاومت تراکمی تک محوره ( $R=-0.69$ ) است. با توجه به مقادیر R و P، رابطه بین عدد پتروگرافی با سلامت سنگ در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار نیست.

جدول ۴. ضریب همبستگی و سطح معناداری بین نتایج آزمایشات با عدد پتروگرافی

		PN	D	Wab	IV	Is <sub>50</sub>	UCS	S	ID	LA
Correlation-PN	R	۱	۰،۷۹-	۰،۸۸	۰،۹۱	۰،۸۸-	۰،۶۹-	۰،۵۶	۰،۸۹-	۰،۹۱
	P value		۰،۰۰	۰،۰۰	۰،۰۰	۰،۰۰	۰،۰۴	۰،۰۵	۰،۰۰	۰،۰۰
Equations	Linear- R <sup>2</sup>	۱	۰،۶۲	۰،۷۷	۰،۸۳	۰،۷۸	۰،۴۸	۰،۳۱	۰،۷۹	۰،۸۳
	Nonlinear- R <sup>2</sup>	۱	۰،۶۳	۰،۸۱	۰،۸۸	۰،۸۴	۰،۶۶	۰،۳۳	۰،۸۷	۰،۸۵

PN عدد پتروگرافی، D وزن واحد حجم، Wab جذب آب، IV ارزش ضربه ای، Is<sub>50</sub> شاخص بار نقطه ای، UCS مقاومت تراکمی تک محوره، S افت وزنی در سولفات، ID شاخص دوام، LA درصد سایش لس آنجلس



شکل ۱. روابط بین عدد پتروگرافی با ویژگی های مهندسی نمونه ها

ترتیب دارای عدد پتروگرافی ۱۴۸/۹ و ۱۳۱/۳۲ ولی نتایج آزمایش سلامت سنگ آنها بیشتر از حد مجاز موجود در آیین نامه (به ترتیب ۵۸ و ۲۰/۴۵) است. با توجه به روش عدد پتروگرافی، احتمالاً این روش برای ارزیابی سلامت سنگ در سولفات، دقت لازم را ندارد. احتمالاً به این دلیل است که در

با بررسی جدول (۵) مشخص می شود که نمونه هایی دارای عدد پتروگرافی کوچکتر از ۱۶۱ دارای حداقل های لازم، البته به جزء آزمایش سلامت سنگ در سولفات، برای انتخاب به عنوان مصالح موج شکن هستند. نمونه های شماره ۱ و ۲۹ با وجود آنکه دارای عدد پتروگرافی کمتر از ۱۶۰ هستند (به



با توجه به این معیار در حدود ۱۵ درصد از نمونه‌ها در رده بسیار ضعیف با میانگین عدد پتروگرافی ۱۸۵/۶۹، ۱۸ درصد در رده ضعیف با میانگین عدد پتروگرافی ۱۶۷/۱۸، ۱۲ درصد در رده متوسط با میانگین عدد پتروگرافی ۱۴۸/۴۳، ۳۰ درصد در رده خوب با میانگین عدد پتروگرافی ۱۴۰/۱۹ و ۲۴ درصد در رده بسیار خوب با میانگین عدد پتروگرافی ۱۴۶/۱۰ قرار می‌گیرند (جدول ۶).

بین عدد پتروگرافی با مجموع امتیازات کسب شده در این معیار رابطه معکوس با ضریب همبستگی ۰/۸۰ وجود دارد (شکل ۲). با افزایش عدد پتروگرافی، مجموع امتیازات کاهش یافته و سنگ در گروه بسیار ضعیف و ضعیف قرار می‌گیرد. با استفاده از رابطه (۲) می‌توان با دقت قابل قبول ( $R^2=0.80$ ) از عدد پتروگرافی، مجموع امتیازات این معیار را تخمین زد. البته ناهم‌خوانی‌هایی هم وجود دارد به طوری که در رده خوب حداکثر عدد پتروگرافی ۱۶۵/۵ ولی در رده متوسط حداکثر عدد پتروگرافی ۱۶۱/۰۵ است. این تفاوت می‌تواند ناشی از نقاط ضعف این معیارها و یا ناشی از تعداد نمونه کم در رده متوسط باشد. نمودار همبستگی بین مقادیر تخمین زده شده طبق این رابطه با مقادیر واقعی در شکل (۳) نمایش داده شده است.

$$AS = -1.356 PN + 264.54 \quad (2)$$

در این رابطه، PN عدد پتروگرافی و AS مجموع امتیازات معیار امینی است.

۲-۳-۴. آئین‌نامه کاربرد سنگ در موج‌شکن‌ها و سازه‌های حفاظت دریایی (وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۸)

در این آئین‌نامه سنگ‌های مورد استفاده در سازه‌های ساحلی و دریایی در سه گروه طبقه‌بندی شده‌اند و برای هر گروه بطور مجزا معیاری ارائه شده است. در اینجا با توجه به هدف تحقیق فقط به گروه سنگ‌های رسوبی آهکی-ماسه-سنگی پرداخته می‌شود.

نحوه امتیازدهی به پارامترها در پنج رده از A تا E برای سنگ‌های آهکی و ماسه‌سنگی در جدول (۷) نشان داده شده

روش عدد پتروگرافی به وجود ترکیبات سولفات به ویژه پیریت مغناطیسی توجه لازم نشده است.

۳-۴. ارزیابی روش عدد پتروگرافی با استفاده از آئین‌نامه‌های دیگر

نتایج آزمایشات مکانیک سنگ انجام شده بر روی نمونه‌ها با عدد پتروگرافی نشان از وجود ارتباط معناداری بین اغلب آنها است ولی این موضوع سبب نمی‌شود که امتیاز لازم از نظر کیفیت طبق پیشنهاد محققین مختلف و یا آئین‌نامه‌های موجود در این زمینه را کسب نموده است. در نتیجه بررسی نمونه‌های مورد تحقیق طبق معیارهای موجود ضروری به نظر می‌رسد. مطالعات انجام شده توسط امینی و همکاران (۱۳۸۸) نشان داده است که استفاده از معیارهای بین‌المللی در بررسی منابع سنگی جنوب کشور مناسب نیست و با واقعیت و سرویس‌دهی مناسب موج‌شکن‌های ساخته شده توسط این منابع سنگی هم‌خوانی ندارد در نتیجه توصیه نموده‌اند که معیاری ویژه شرایط کشور استفاده گردد. در این بخش با استفاده از دو معیار داخلی به بررسی کارایی عدد پتروگرافی پرداخته شده است. استفاده از این معیارها و آئین‌نامه‌ها به علت دارا بودن سیستم امتیازدهی و همچنین در نظر گرفتن سنگ‌های آهکی است. برای مثال گرچه معیار پیشنهادی نیکودل (۱۳۶۹) دارای سیستم امتیازدهی است ولی برای سنگ‌های آذرین بدست آمده در نتیجه در این تحقیق از آن استفاده نشده است.

۱-۳-۴. معیار امینی

امینی (۱۳۸۵) معیاری را جهت ارزیابی سنگ‌های رسوبی سواحل خلیج فارس و دریای عمان پیشنهاد کرده‌اند (جدول ۶). از ویژگی این معیار ارائه پنج رده بسیار خوب، خوب، متوسط، ضعیف و بسیار ضعیف با توجه به مجموع امتیازات کسب شده از نتایج آزمایشات است. طبق این معیار و با توجه به نتایج آزمایشات برای هر نمونه مجموع امتیازات کسب شده محاسبه و سپس به بررسی ارتباط آن با عدد پتروگرافی پرداخته شده است.

با میانگین عدد پتروگرافی ۱۳۲/۹۶ قرار می‌گیرند (جدول ۷). بین عدد پتروگرافی با مجموع امتیازات کسب شده در این معیار رابطه معکوس با ضریب همبستگی ۰/۸۶ وجود دارد (شکل ۴). در این معیار هم همان طور که انتظار می‌رفت با افزایش عدد پتروگرافی، مجموع امتیازات کاهش یافته و سنگ در گروه خیلی ضعیف و ضعیف قرار می‌گیرد.

است. با توجه به این معیار در حدود ۶ درصد از نمونه‌ها در رده خیلی ضعیف (E) با میانگین عدد پتروگرافی ۱۲، ۱۸۹/۳۵، ۱۲ درصد در رده ضعیف (D) با میانگین عدد پتروگرافی ۱۵، ۱۸۱/۴۸، ۱۵ درصد در رده متوسط (C) با میانگین عدد پتروگرافی ۲۴، ۱۶۵/۳۹، ۲۴ درصد در رده مقاوم (B) با میانگین عدد پتروگرافی ۴۲ و ۴۸/۱۹، ۴۲ درصد در رده خیلی مقاوم (A)

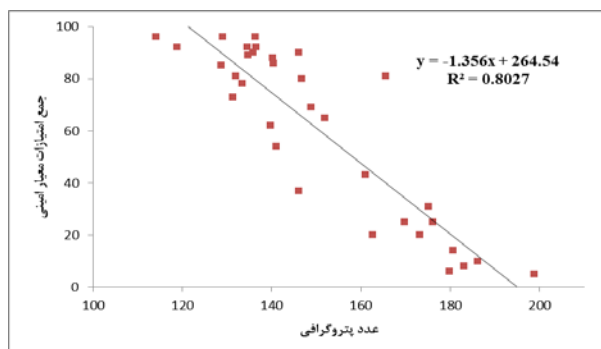
جدول ۵. معیارهای مقادیر حدی پارامترهای مختلف برای سنگ‌های آهکی (وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۸)

آزمایش	حداقل $D$ ( $KN/m^3$ )	حداکثر $Wab$ (%)	حداکثر $AIV$ (%)	حداقل $I_{s50}$ ( $Mpa$ )	حداقل $UCS$ ( $Mpa$ )	حداقل $S$ (%)	حداقل $ID$ (%)	حداکثر $LA$ (%)
	۱۷	۱۵	۳۵	۱/۵	۱۴	۱۸	۸۰	۵۰
بررسی‌های آماری								
تعداد نمونه های مردود	۳	۶	۱۰	۱۰	۶	۸	۶	۸
درصد	۹/۱	۱۸/۱۸	۳۰/۳۰	۳۰/۳۰	۱۸/۱۸	۲۴/۲۴	۱۸/۱۸	۲۴/۲۴
حداقل عدد پتروگرافی	۱۷۹/۹	۱۷۶/۱۵	۱۶۱/۰۵	۱۶۲/۷	۱۷۶/۱۵	۱۳۱/۳۲	۱۶۹/۸	۱۶۹/۸۰

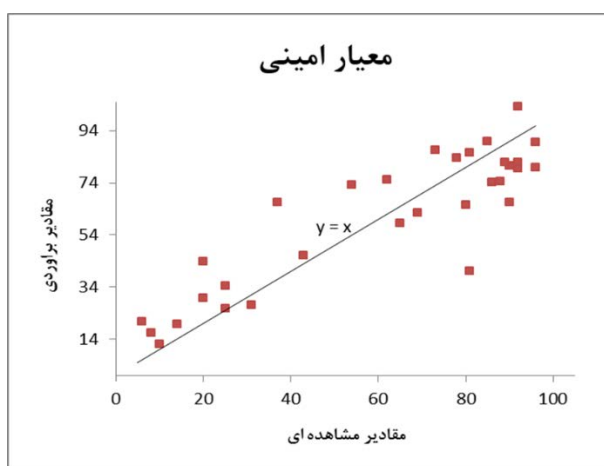
جدول ۶. بررسی نمونه‌ها با معیار پیشنهادی امینی (۱۳۸۵)

پارامترها	خصوصیات	رده				
فیزیکی	دانشیته ( $t/m^3$ )	بسیار ضعیف	ضعیف	متوسط	خوب	بسیار خوب
امتیاز		$< 1/8$	$1/8 - 1/9$	$1/9 - 2/1$	$2/1 - 2/4$	$> 2/4$
فیزیکی	جذب آب (%)	$> 16$	$10 - 16$	$6 - 10$	$4 - 6$	$< 4$
امتیاز		۱	۴	۸	۱۲	۱۶
مقاومتی	شاخص بار نقطه‌ای ( $Mpa$ )	$< 1/5$	$1/5 - 2$	$2 - 3$	$3 - 4$	$> 4$
امتیاز		۱	۴	۸	۱۲	۱۶
دوام‌داری مکانیکی	ارزش ضربه‌ای (%)	$> 45$	$35 - 45$	$20 - 35$	$10 - 20$	$< 10$
امتیاز		۱	۴	۸	۱۲	۱۶
دوام‌داری شیمیایی	افت وزنی در سولفات سدیم (سیکل ۱۰)	$> 20$	$12 - 20$	$8 - 12$	$5 - 8$	$< 5$
امتیاز		۱	۶	۱۲	۱۸	۲۴
جمع امتیازات		۵	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰
امتیاز رده		$< 15$	$15 - 40$	$40 - 65$	$65 - 90$	$90 - 100$
بررسی معیار با روش عدد پتروگرافی						
تعداد نمونه‌ها در هر رده		۵	۶	۴	۱۰	۸
درصد نمونه‌ها		۱۵/۱۵	۱۸/۱۸	۱۲/۱۲	۳۰/۳۰	۲۴/۲۴
میانگین عدد پتروگرافی		۱۸۵/۶۹	۱۶۷/۱۸	۱۴۸/۴۳	۱۴۰/۱۹	۱۳۱/۴۱

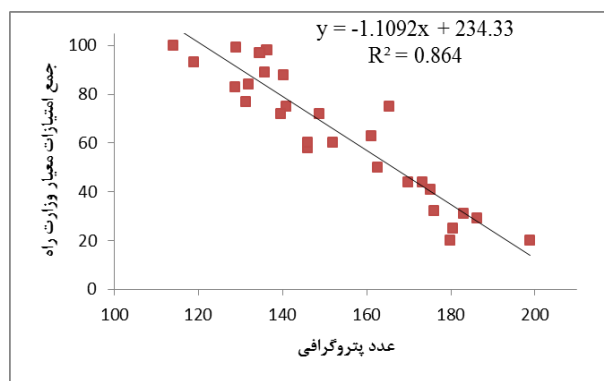
۱۱۴/۱۰	۱۲۸/۷۰	۱۳۹/۷	۱۴۶/۰۵	۱۷۹/۹	حداقل
۱۴۶/۱۰	۱۶۵/۵	۱۶۱/۰۵	۱۷۶/۱۵	۱۹۸/۸۰	حداکثر



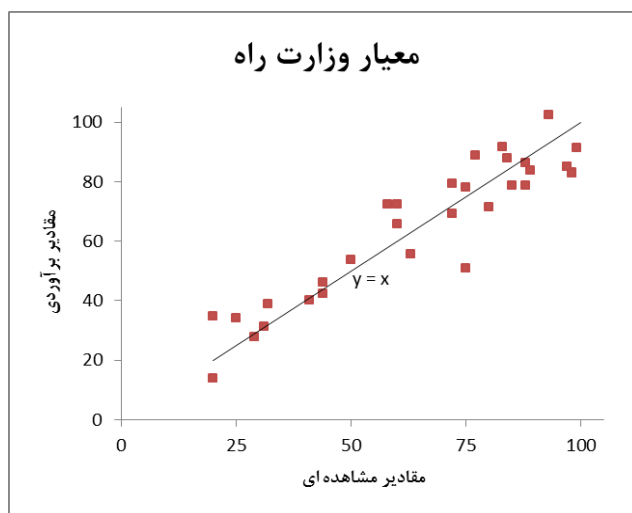
شکل ۲. برازش بین عدد پتروگرافی با جمع امتیازات معیار آمینی



شکل ۳. رابطه بین مقادیر تخمین زده شده توسط عدد پتروگرافی با مشاهده ای در معیار آمینی



شکل ۴. برازش بین عدد پتروگرافی با جمع امتیازات معیار وزارت راه



شکل ۵. رابطه بین مقادیر تخمین زده شده توسط عدد پتروگرافی با مشاهده‌ای در معیار وزارت راه

جدول ۷. بررسی نمونه‌ها با معیار پیشنهادی وزارت راه برای سنگ‌های آهکی

رده					خصوصیات	پارامترها
A	B	C	D	E		
<۳	۳-۶	۶-۱۲	۱۲-۱۸	>۱۸	جذب آب (%)	فیزیکی
>۲۴	۲۲-۲۴	۱۸-۲۲	۱۶-۱۸	<۱۶	دانسیته (KN/m <sup>3</sup> )	
۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵		امتیاز
>۴	۳-۴	۲-۳	۱-۲	<۱	شاخص بار نقطه‌ای (Mpa)	مقاومتی
>۶۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۸-۲۰	<۸	مقاومت تک‌محوری (Mpa)	
۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵		امتیاز
<۱۰	۱۰-۲۰	۲۰-۳۵	۳۵-۴۵	>۴۵	ارزش ضربه‌ای (%)	دوام‌داری مکانیکی
>۹۵	۹۰-۹۵	۸۵-۹۰	۸۰-۸۵	<۸۰	شاخص دوام (۱۵ سیکل) (%)	
<۲۵	۲۵-۳۵	۳۵-۵۰	۵۰-۶۵	>۶۵	سایش لس آنجلس (%)	
۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵		امتیاز
<۴	۴-۸	۸-۱۶	۱۶-۲۰	>۲۰	افت وزنی در سولفات (%)	دوام شیمیایی
۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵		امتیاز
۸۰-۱۰۰	۶۰-۸۰	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۰-۲۰		جمع امتیازات
بررسی معیار با عدد پتروگرافی						
۱۴	۸	۵	۴	۲		تعداد نمونه‌ها در هر رده
۴۲/۴۲	۲۴/۲۴	۱۵/۱۵	۱۲/۱۲	۶/۶		درصد
۱۳۲/۹۶	۱۴۸/۱۹	۱۶۵/۳۹	۱۸۱/۴۸	۱۸۹/۳۵		میانگین عدد پتروگرافی
۱۱۴/۱۰	۱۳۱/۳۲	۱۴۶/۰۵	۱۷۶/۱۵	۱۷۹/۹۰		حداقل
۱۴۶/۸۰	۱۶۵/۵۰	۱۷۵/۲۰	۱۸۶/۲۰	۱۹۸/۸۰		حداکثر



بار نقطه‌ای برابر  $0/881-$ ، جذب آب برابر  $0/880$ ، وزن واحد حجم برابر  $0/788-$ ، مقاومت تراکمی تک محوره برابر  $0/690-$  و سلامت سنگ در سولفات سدیم برابر  $0/557$  است. با بررسی مقادیر حدی توصیه شده توسط وزارت راه، مشخص شد که نمونه‌هایی دارای عدد پتروگرافی کوچکتر از ۱۶۱ دارای حداقل‌های لازم، به جزء آزمایش سلامت سنگ در سولفات، برای انتخاب به عنوان مصالح موج شکن هستند. همچنین رابطه‌ی بین عدد پتروگرافی با مجموع امتیازات معیار وزارت راه برابر  $R^2=0/86$  و مجموع امتیازات معیار امینی برابر  $R^2=0/80$  بدست آمده است. نتایج حاکی از آن است که روش عدد پتروگرافی با معیار وزارت راه همخوانی بیشتری دارد. روش عدد پتروگرافی برای ارزیابی آزمایش سلامت سنگ و مقاومت تراکمی تک محوره دارای دقت پایین‌تری است (ضریب همبستگی زیر  $0/7$  است). استفاده از روش عدد پتروگرافی به همراه برخی از آزمایشات برای برآوردهای اولیه از کارایی منابع سنگ آهک در مراحل ابتدایی پروژه به دلیل کاهش هزینه‌ها و زمان توصیه می‌شود. روش عدد پتروگرافی به عنوان برآورد اولیه از کارایی مصالح سنگ آهک در مراحل ابتدایی پروژه می‌تواند یک دید اولیه ارائه دهد ولی برای صحت‌سنجی آن نیاز است که آزمایشاتی مانند سلامت سنگ و مقاومت تراکمی تک محوره انجام شود. به هر حال داده‌ها و مطالعات بیشتری برای بررسی‌های تکمیلی نیاز است.

با استفاده از رابطه (۳) می‌توان با دقت قابل قبول ( $R^2=0.86$ ) از عدد پتروگرافی، مجموع امتیازات این معیار را تخمین زد. نمودار همبستگی بین مقادیر تخمین زده شده طبق این رابطه با مقادیر واقعی در شکل (۵) آورده شده است.

$$MS=-1.1092 PN+234.33 \quad (3)$$

در این در این رابطه، PN عدد پتروگرافی و MS مجموع امتیازات معیار وزارت راه است.

### ۵. نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی کارایی روش عدد پتروگرافی به عنوان روشی سریع، آسان و کم هزینه در تعیین کیفیت برخی از مصالح سنگ آهک کشور جهت استفاده در سازه‌های حفاظت دریایی، پرداخته شده است. آیین‌نامه‌ها و معیارهای توصیه شده در این زمینه دارای آزمایشات متعددی هستند که نیاز به صرف زمان، هزینه و امکانات آزمایشگاهی دارد. در مراحل ابتدایی پروژه، تشخیص و حذف منابع نامناسب و برآوردهای اولیه از منابع سنگی موجود، کمک شایانی به مدیران در برآورد هزینه و زمان پروژه دارد. بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که همبستگی خوبی بین نتایج آزمایشات و مجموع امتیازات معیار وزارت راه و معیار امینی برای کاربرد سنگ در موج‌شکن‌ها و سازه‌های حفاظت دریایی، با عدد پتروگرافی وجود دارد. ضریب همبستگی ( $R$ ) بین عدد پتروگرافی با سایش لوس‌آنجلس برابر  $0/913$ ، ارزش ضربه‌ای برابر  $0/912$ ، شاخص دوام برابر  $0/887-$ ، شاخص

## منابع

- امینی، م.، ۱۳۸۵. ارزیابی عملکرد سنگ در موج شکن‌های توده‌سنگی سواحل شمالی خلیج فارس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- امینی، م.، شفیعی‌فر، م.، نیکودل، م.ر.، ۱۳۸۸. مقایسه سنگ‌های آهکی بکار رفته در موج شکن‌های سواحل جنوبی کشور با معیارهای ارزیابی کیفیت سنگ، پژوهشنامه حمل و نقل، سال ششم، شماره سوم.
- تلخابلو، م.، ۱۳۸۶. ارزیابی ویژگی‌های مهندسی سنگها و ارائه معیارهای مناسب جهت کاربرد در سازه‌های دریایی - سواحل جنوبی ایران، رساله دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- جلالی، ح.، ۱۳۶۹. اهمیت دوام سنگ در پایداری موج شکن‌های سنگریزه‌ای، اولین کنفرانس بین‌المللی بندر سازی و سازه‌های دریایی، جلد دوم، تهران.
- مومنی، م.، قیومی، ع.، ۱۳۹۵. تحلیل‌های آماری با استفاده از SPSS، ۳۱۲ ص.
- نیکودل، م.، ۱۳۶۹. مطالعه معیارهای شناخت زوال‌پذیری سنگ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.
- وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۸. آئین‌نامه کاربرد سنگ در موج شکن‌ها و سازه‌های حفاظت، مرکز نشر پژوهشکده حمل و نقل، تهران.
- Ajalloeian, R., Kamani, M., 2017. An investigation of the relationship between Los Angeles abrasion loss and rock texture for carbonate aggregates, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Published online: 20-12-2017, <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1209-y>
- Ajalloeian, R., Mansouri, H., Baradaran, E., 2017. Some carbonate rock texture effects on mechanical behavior, based on Koohrang tunnel data, Iran, *Bull Eng Geol Environ*.
- ASTM, 2013. Annual Book of Standards. American Society of Testing and Materials, West Conshohocken.
- Bayne, RL., Brownridge, FC, 1955, Petrographic analysis for determining quality of coarse aggregate, *Proceeding, Canadian Good Roads Association*, 36: 114-122.
- Bragg, DJ., 1995. Petrographic examination of construction aggregate of Newfoundland, *Geological survey, Report 95-1*, pp. 77-104.
- British Standard Institution, BSI 812, 1989. "Code of practice for determination of Aggregate", Impact Value, "B.S. 812".
- British Standard, BS 6349, 200. Maritime structures, Part 1: Code of practice for general criteria.
- Broch, E. and Franklin, J., 1972. The point-load strength test. Paper presented at the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts.
- Chitnarin, A., 2015. The influence of lithology, petrography and chemistry on mechanical property of the Permian limestones in central Thailand, 5th GEOINDO, Khon Kaen, Thailand.
- Choquette, P. W., and L. C. Pray, 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates: AAPG Bulletin, 54(2): 207-250.
- CIRIA/CUR. 2000. Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, Construction Industry Research and Information Association, London. CIRIA Spec Publ 83/CUR, Report 154.
- Dunham RJ., 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional textures. In: Ham WE (ed) Classification of carbonate rocks, A symposium, Am Assoc Petroleum Geologist Mem, 1: 108-121.
- Fookes, P., Gourley, C. and Ohikere, C., 1988. Rock weathering in engineering time. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 21(1): 33-57.
- Howarth, D. and Rowlands, J., 1987, Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock mechanics and rock engineering*, 20(1): 57-85.
- ISRM, International Society for Rock Mechanics, 1978. Commission on standardization of laboratory and field tests, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 15.
- Kamani, M., Ajalloeian, R., 2018. Evaluation of engineering properties of some carbonate rocks through corrected texture coefficient, *Geotechnical and Geological Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0630-8>.

- Mather, R., 1985. Rock for breakwater construction in Western Australia-its availability and influence on design. *Engineering Geology*, 22(1): 35-44.
- McClellan, G.H., Eades, J.L., Grerory, J.S., Fountain, K.B., 2002. Evaluation and petrologic characteristics of Florida riprap sources. Final Report, Department of Geological Science, University of Florida. p 107.
- Nishiyama, T., Youqing, C., Kusuda, H., Ito, T., Kaneko, K., Kita, H., Sato, T., 2002. The examination of fracturing process subjected to triaxial compression test in Inada granite. *Eng. Geol.* 66: 257-269.
- Norusis, M., 2002. SPSS 11.0 Guide to data analysis. Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ, 637 pp.
- OCDI, 2000. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan. The Overseas Coastal Area Development Institute, Japan.
- Oyen, C.W., Fountain, K.B., McClellan, G.H., Eades, J.L., 1998. Thin-section petrography of concrete aggregates: Alternative approach for petrographic number evaluation of carbonate aggregate soundness, *Transportation research record* 1619: 18-25.
- Rogers, C.A., 1990. Petrographic examination of aggregate and concrete in Ontario, In Erlin B and Stark D, (eds) *Petrography applied to concrete and concrete aggregates*, ASTM STP 1061: American society for testing and Materials, Philadelphia, p. 5-31.
- Shakoor, A., Bonelli, R.E., 1991. Relationship between petrophysical characteristics, engineering index properties and mechanical properties of selected sandstones. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* 28: 55-71.
- Tamrakar, K.N., Yokota, S., Shrestha, S.D., 2007. Relationships among mechanical, physical and petrographic properties of Siwalik sandstones, Central Nepal sub-Himalayas. *Eng. Geol.* 90: 105-123.
- Tandon, R.S., Gupta, V., 2013. The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya. *Eng. Geol.* 153: 125-143.
- Tiryaki, B., Cagatay Dikmen, A., 2006. Effects of rock properties on specific cutting energy in linear cutting of sandstones by picks, *Rock Mech. Rock Engng.* 39( 2): 89-120
- Ulusay, R., Tureli, K., Ider, M.H., 1994. Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. *Eng. Geol.* 38 (1-2): 135-157.
- Ündül, O., 2016. Assessment of mineralogical and petrographic factors affecting petro-physical properties, strength and cracking processes of volcanic rocks, *Engineering Geology*, 210: 10-22.