

## بررسی همبستگی بین ارزش صیقلی با دیگر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های رویه راه

محمود احمدی نژاد، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمود عامری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

شاهین شهبانی\*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: shabani@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۸۸/۰۶/۲۵ - پذیرش: ۱۳۸۸/۱۱/۱۴

### چکیده

( )

واژه های کلیدی: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، سنگدانه، ارزش ضربه، ارزش سایش لوس آنجلس، وزن مخصوص، ارزش صیقلی

### ۱. مقدمه

افت وزنی سنگدانه‌ها در شرایط بهره برداری نیز توسط برخی آزمایش‌های مکانیکی دیگر میسر می‌شود. مطالعات انجام شده در خصوص ویژگی‌های سنگدانه‌هایی که در کارهای راهسازی استفاده می‌شوند نشان داده است که بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ها روابط معنی داری وجود دارد، ولی در اغلب مطالعات، نوع ارتباط دقیقاً مشخص نشده است، علاوه بر این نتایج تحقیقات به علت تفاوت بین گروه‌های سنگ انتخاب شده و یا عدم جامعیت خانواده سنگ‌ها

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌ها از جمله پارامترهایی هستند که چگونگی کاربرد آنها را برای استفاده در قشر رویه راه‌ها تعیین می‌کنند. تاکنون آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مختلفی که عمدتاً تجربی هستند برای ارزیابی سنگدانه‌ها به صورت استاندارد معرفی شده اند. این آزمایش‌ها ویژگی‌های متفاوتی مانند مقاومت در برابر ضربه، خرد شدن، سایش، صیقل شدن، وضعیت هندسی مانند شکل، اندازه، زاویه‌داری و تطویل و تورق را تشریح می‌کنند. کنترل کیفیت مصالح و تعیین میزان

ارتباط معنی داری با ضریب همبستگی برابر با  $0.73$  وجود دارد. همچنین ارزش سایش لوس آنجلس و ارزش خرد شدن دارای ضریب همبستگی برابر با  $0.82$  هستند. همان طور که ملاحظه می شود در خصوص ارتباط بین ارزش سایش لوس آنجلس با ارزش خرد شدن، بین نتیجه مطالعه وودوارد و هاسکینگ اختلاف وجود دارد که می تواند ناشی از تفاوت بین جنس و ترکیب سنگ های انتخاب شده توسط آنها باشد.

در پژوهشی که بر روی پارامترهای دوام مربوط به  $23$  نمونه سنگ معدنی شامل  $19$  نمونه سنگ گرانیتی،  $2$  نمونه سنگ آهکی، یک نمونه سنگ گنیس-گرانیت و یک نمونه سنگ مرمر انجام شد [Rangarvaju (et al.), 2005] نشان داده شد که هیچگونه ارتباط منطقی و معنی داری بین ارزش سایش لوس آنجلس و ساندنس ناشی از استفاده از سولفات منیزیم وجود ندارد. ولی بین ساندنس حاصل از استفاده از سولفات سدیم و سولفات منیزیم ارتباط بسیار خوب و معنی داری با ضریب همبستگی برابر با  $0.906$  وجود دارد. مشابه تحقیق فوق الذکر، توسط براندس و رابینسون [Brandes and Robinson, 2006] و بر روی  $12$  نمونه از مصالح سنگی در منطقه هاوایی انجام و همان نتیجه حاصل شد، به طوری که هیچگونه ارتباط و همبستگی بین مقادیر ارزش سایش لوس آنجلس و ساندنس به دست نیامد.

فاولر و گروه تحقیقاتی وی [Fowler (et al.), 2006] در یک ارزیابی جامع بر روی دوام و استحکام  $117$  نمونه سنگ معدنی در ایالات متحده آمریکا و انجام  $10$  آزمایش مختلف بر روی نمونه های جمع آوری شده، ارتباط معنی دار و قابل قبولی بین نتایج آزمایشهای دوام سنگدانه ها به دست نیاوردند، ولی در گروه آزمایشهای مربوط به استحکام سنگدانه ها توانستند بین ارزش سایش لوس آنجلس و ارزش خرد شدن، رابطه ای با ضریب همبستگی برابر با  $0.765$  به دست آورند که در مقایسه با نتایج مطالعات هاسکینگ وودوارد از میزان همبستگی بسیار کمتری برخوردار بود. البته با توجه به گستردگی تعداد نمونه های سنگ معدنی در مطالعات فاوولر، نتیجه به دست آمده توسط وی از اعتبار بیشتری برخوردار است.

## ۲-۲ ارتباط بین ارزش صیقلی با دیگر خصوصیات سنگدانه ها

تاکنون مطالعات بسیار محدودی در باره یافتن ارتباط بین ارزش صیقلی با دیگر خصوصیات سنگدانه ها انجام شده است و تقریباً هیچ رابطه ریاضی یا ضریب همبستگی مشخصی در این خصوص ارائه نشده است. در یکی از اولین مطالعات که توسط

متفاوت است. در این پژوهش با انتخاب نمونه های سنگدانه تهیه شده از معادن سنگ که در روسازی استفاده می شوند و دارای جنس مختلف متشکل از کربنات ها<sup>۱</sup>، ماسه سنگ ها<sup>۲</sup> و آذرینی ها<sup>۳</sup> هستند و انجام تعدادی از آزمایش های فیزیکی و مکانیکی، سعی شده است ارتباط بین خصوصیات سنگدانه ها، مورد بررسی دقیق قرار گرفته و روابط احتمالی بین آنها مشخص شود. برای این منظور آزمایشهای تعیین وزن مخصوص، ارزش ضربه (AIV)<sup>۴</sup>، ارزش سایش لوس آنجلس (LAV)<sup>۵</sup>، افت وزنی در برابر سولفات سدیم (ساندنس) و ارزش صیقلی سنگ (PSV)<sup>۶</sup> بر روی نمونه های سنگدانه انجام و سپس داده های حاصله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

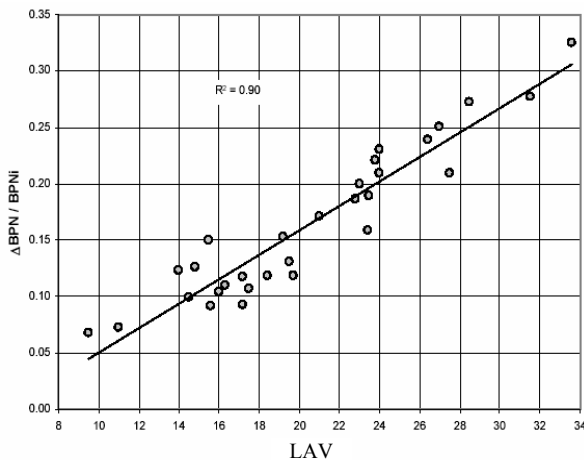
هدف اصلی این پژوهش یافتن ارتباط بین میزان مقاومت در برابر صیقلی شدن سنگدانه ها با دیگر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنها است. لازم به ذکر است وضعیت مقاومت سنگدانه ها در برابر صیقل شدن به کمک شاخص ارزش صیقلی سنگ قابل اندازه گیری است.

## ۲. مروری بر مطالعات گذشته

### ۲-۱ ارتباط بین خصوصیات مکانیکی سنگدانه ها

مطالعات مختلفی برای تعیین میزان همبستگی بین خصوصیات مکانیکی سنگدانه ها انجام شده است. مطالعاتی که توسط آزمایشگاه تحقیقات جاده ای انگلستان انجام شده نشان داده است که در گروهی از سنگ های معدنی که دارای مقاومت و دوام در حد متوسط و معمولی هستند، بین ارزش خرد شدن سنگدانه ها (ACV)<sup>۷</sup> و ارزش سایش لوس آنجلس رابطه خطی با ضریب همبستگی  $99\%$  وجود دارد، ولی در گروه وسیع تری از سنگ ها خصوصاً با اضافه شدن سنگ هایی که از دوام کمتری برخوردار هستند (ارزش سایش لوس آنجلس آنها از عدد  $30$  تجاوز می کند) این ارتباط برقرار نیست [Hosking, 1992]. در مطالعه دیگری نیز مشخص شد که بین ارزش خرد شدن سنگدانه ها و ارزش ضربه رابطه نسبتاً معنی داری برقرار است، به طوری که با افزایش ارزش خرد شدن، ارزش ضربه نیز افزایش می یابد [Hosking, 1992]. البته در این خصوص هیچگونه رابطه ریاضی مشخصی ارائه نشده است.

در تحقیق دیگری که توسط آقای وودوارد [Woodward, 1995] بر روی دوام و استحکام سنگدانه ها انجام گرفت، مشخص شد که بین ارزش سایش لوس آنجلس و ارزش ضربه



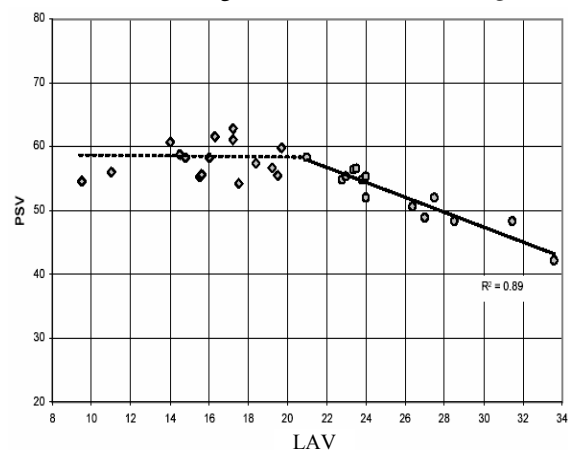
شکل ۲. ارتباط بین نرخ کاهش عدد آونگی ( $\frac{\Delta BPN}{BPNi}$ ) با ارزش سایش لوس آنجلس [Lancieri(et al.), 2005]

همان طور که ملاحظه می شود در هیچ یک از پژوهش های فوق، نوع ارتباط یا مقدار همبستگی بین ارزش صیقلی با دیگر خصوصیات سنگدانه تعیین نشده است. در مطالعه لانسیری نیز ارتباط ارزش صیقلی با ارزش سایش لوس آنجلس بر روی کل نمونه های سنگ به دست نیامده است. ارزش سایش لوس آنجلس بیشتر از ۲۰، مربوط به سنگدانه های سست شامل گروه ماسه سنگ ها و سنگ های کربناته مانند سنگ آهک می شود. بنابراین بر اساس نتیجه حاصل از مطالعات لانسیری، بین ارزش صیقلی و ارزش سایش لوس آنجلس برای سنگ های سخت و محکمی مانند سنگ های آذرین ارتباط معنی داری وجود ندارد. با توجه به موارد یاد شده، در این پژوهش سعی شده است تا با انتخاب نمونه های سنگدانه دارای جنس مختلف از معادن سنگی که در روسازی استفاده می شوند و انجام تعدادی از آزمایشهای فیزیکی و مکانیکی که از اهمیت بیشتری در تعیین عملکرد سنگدانه ها، برخوردارند، ارتباط بین خصوصیات سنگدانه ها تحت بررسی دقیق قرار گرفته و روابط احتمالی بین آنها مشخص شود.

### ۳. برنامه آزمایشگاهی

با وجود تنوعی که در معادن سنگ کشور وجود دارد، معادن سنگ مورد استفاده در کارهای راهسازی از تنوع در نوع و جنس سنگ برخوردار نیستند و اغلب آنها را معادن سنگ کربناته (مانند سنگ آهک) و برخی هم معادن سیلیسی تشکیل می دهند. بنابراین علاوه بر معادن سنگ مورد استفاده در راهسازی و روسازی راهها، بررسی بر روی سایر معادن سنگ کشور نیز برای

هاسکینگ در سال ۱۹۷۰ انجام شد، نشان داده شد که افزایش ارزش سایش سنگ (AAV)<sup>۱</sup> در گروه ماسه سنگ ها منجر به افزایش ارزش صیقلی می شود. در همین مطالعات نتیجه مشابهی برای گروه سرباره های کوره ذوب آهن نیز به دست آمد [Hosking, 1992]. علاوه براین، هاسکینگ نشان داد که در گروه سرباره های کوره ذوب آهن بین ارزش صیقلی و وزن مخصوص ارتباط معنی داری وجود دارد، به طوری که با افزایش وزن مخصوص از ارزش صیقلی سنگ کاسته می شود [Hosking, 1992]. البته در این مطالعه نه تنها نوع رابطه مشخص نشده بلکه نتیجه تحقیق نیز محدود به گروه سرباره ها بوده است. در پژوهش انجام گرفته در دانشگاه پیزا ایتالیا [Lancieri(et al), 2005] سعی شد ارتباط ارزش صیقلی با پارامترهای مکانیکی سنگ شناسایی شود. در این مطالعه علاوه بر ارزش صیقلی، متغیر جدیدی به نام نرخ کاهش عدد آونگی که به صورت نسبت  $\frac{\Delta BPN}{BPNi}$  تعریف شده مورد استفاده قرار گرفت. این متغیر مشخص کننده سرعت صیقل شدن سنگدانه ها است. در این نسبت،  $\Delta BPN$ ، مخفف اختلاف اعداد آونگی قبل و بعد از آزمایش صیقل و  $BPNi$ ، مخفف عدد آونگی اولیه قبل از آزمایش صیقل است. نتیجه حاصل از انجام پژوهش نشان داد که بین ارزش صیقلی و ارزش سایش لوس آنجلس در دامنه مقادیر  $LAV < 20$  هیچگونه ارتباط معنی داری وجود ندارد، لیکن برای مقادیر  $LAV > 20$  یک رابطه خطی با ضریب همبستگی برابر با ۰/۸۹ وجود دارد (شکل ۱).



شکل ۱. همبستگی بین ارزش صیقلی با ارزش سایش لوس آنجلس سنگدانه ها [Lancieri(et al.), 2005]

همچنین مقایسه بین مقادیر نرخ کاهش عدد آونگی و ارزش سایش لوس آنجلس نشان داد که یک رابطه خطی با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹ بین آنها وجود دارد. این موضوع در شکل (۲) نشان داده شده است.

ارایه شده اند. در این آزمایش از دستگاه شتاب دهنده صیقل و آونگ انگلیسی به صورت توأمان استفاده شده و میزان مقاومت سنگ در برابر صیقل شدن اندازه گیری می شود. در ادامه مقاله، نتایج حاصل از انجام آزمایش های یاد شده ارایه شده و مورد بحث قرار گرفته است.

#### ۴. بحث و بررسی نتایج حاصل از آزمایش

نمودار شکل (۳) مقادیر وزن مخصوص سنگدانه های مختلف را بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب در سه گروه مختلف سنگ نشان می دهد. میانگین وزن مخصوص در گروه سنگ آهک، ماسه سنگ و آذرین به ترتیب برابر ۲/۵۸، ۲/۷۰، ۳/۰۵ است که نشان دهنده چگال تر بودن سنگ های آذرین نسبت به سایر سنگ هاست. البته در میانگین گیری از گروه سنگ های آذرین، وزن مخصوص توف در نظر گرفته نشده است. توف یک سنگ آذر آواری است که از تراکم خاکسترهای آتش فشانی به دست می آید به همین دلیل از وزن مخصوص نسبی کمتری (۲/۴۰) برخوردار است و در بین سنگ های بررسی شده در این تحقیق کمترین وزن مخصوص به آن اختصاص دارد. در گروه سنگ های کربناته، سنگ تراورتن با وزن مخصوص ۲/۵۴ از سایر سنگ ها سبک تر است که دلیل آن را می توان به میزان تخلخل بیشتر این سنگ نسبت داد. همچنین در گروه سنگ های آذرین، از آندزیت بازالت شهریار به دلیل سرشار بودن از اکسیدهای آهن و گابرو همدان به علت سهم قابل توجه کانی های سنگین مانند کلینوپیروکسن و آمفیبول، می توان به عنوان سنگ های چگال تر نام برد. با توجه به انجام آزمایش وزن مخصوص بر روی سرباره فولاد، مشخص شد که این سنگ مصنوعی با وزن مخصوص ۳/۲۲ از کلیه سنگ های آذرین بررسی شده در این تحقیق سنگین تر است.

نمودار شکل (۴) مقادیر ارزش ضربه پذیری را در سنگ های مختلف نشان می دهد. بر اساس میانگین گیری به عمل آمده در هر گروه مشخص شد که ماسه سنگ ها با میانگین ۱۵/۱۹٪ نسبت به سایر گروه های سنگ از مقاومت کمتری در برابر ضربه (حتی نسبت به سنگ های آهکی) برخوردار هستند و سنگ های آذرین با میانگین ۱۲/۱۲٪ (۹/۵۲٪ بدون در نظر گرفتن گرانیت) مقاوم ترین گروه محسوب می شوند. علت مقاومت کمتر ماسه سنگ ها را می توان در پیوند ضعیف تر ذرات به یکدیگر به واسطه ماتریس نرم تر (سست تر) دانست. بنابراین ماتریس ماسه سنگ ها از ماتریس سنگ های آهکی سست تر است. تراورتن با

انتخاب سنگدانه هایی که شرایط ذیل را تأمین کنند انجام پذیرفت:

۱- شامل گروه های مختلف سنگ اعم از رسوبی، آذرین، دگرگونی و مصنوعی باشند؛

۲- داری مقادیر مختلفی از ارزش صیقلی باشند (از مقاومت و دوام مختلفی در برابر صیقلی شدن برخوردار باشند)؛

۳- در دسترس باشند، به طوری که باعث کاهش هزینه های تهیه و تأمین شود؛

در نهایت جهت دستیابی به اهداف این پژوهش، ۲۰ نمونه سنگ معدنی، متشکل از ۹ نمونه سنگ رسوبی - شیمیایی (کربناته)، ۴ نمونه سنگ رسوبی - آواری (ماسه سنگ)، ۶ نمونه سنگ آذرین و یک نمونه سنگ مصنوعی (سرباره فولاد) انتخاب و تحت آزمایش های فیزیکی و مکانیکی مورد نظر قرار گرفتند. فهرست سنگدانه های انتخاب شده در جدول (۱) ارایه شده است.

آزمایش هایی که در این تحقیق انجام پذیرفتند عبارت بودند از:

الف- آزمایش تعیین ارزش ضربه پذیری سنگدانه (AIV)؛ این آزمایش در استاندارد انگلیسی BS 812: part 3 ارایه شده و شامل سنجشی نسبی از مقاومت سنگدانه در برابر ضربه های ناگهانی است.

ب- آزمایش تعیین ارزش سایش لوس آنجلس (LAV)؛ این آزمایش در اغلب کشورهای دنیا به استثنای انگلستان مورد استفاده قرار گرفته و معیار خوبی برای بیان استحکام سنگدانه هاست. در انگلستان از آزمایش AAV به جای LAV استفاده می شود. در این تحقیق از استاندارد ASTM C131 برای آزمایش لوس آنجلس بهره گیری شده است. ج- آزمایش تعیین وزن مخصوص سنگدانه (SG)؛ این آزمایش با دو روش مجزا برای سنگدانه های درشت و ریز انجام می شود. در این تحقیق با توجه به اینکه تمرکز بر مصالح درشت دانه است، از استاندارد ASTM C127 استفاده شده است.

د- آزمایش تعیین افت وزنی سنگدانه ها در مقابل سولفات سدیم (SS)؛ این آزمایش که یکی از اولین و قدیمی ترین آزمایش ها برای پیش بینی دوام سنگدانه ها است در اغلب کشورهای دنیا به عنوان مناسب ترین روش برای تعیین مقاومت سنگدانه ها در برابر یخ زدگی و عوامل جوی پذیرفته شده است [Vincent (et al.), 1999]. این آزمایش در استاندارد ASTM C88 ارایه شده است.

ه- آزمایش صیقل برای تعیین ارزش صیقلی سنگ (PSV)؛ آزمایش صیقل در استانداردهای اروپایی BS 812: part 114 و BS EN 1097-8 و همچنین در استانداردهای آمریکایی نیز

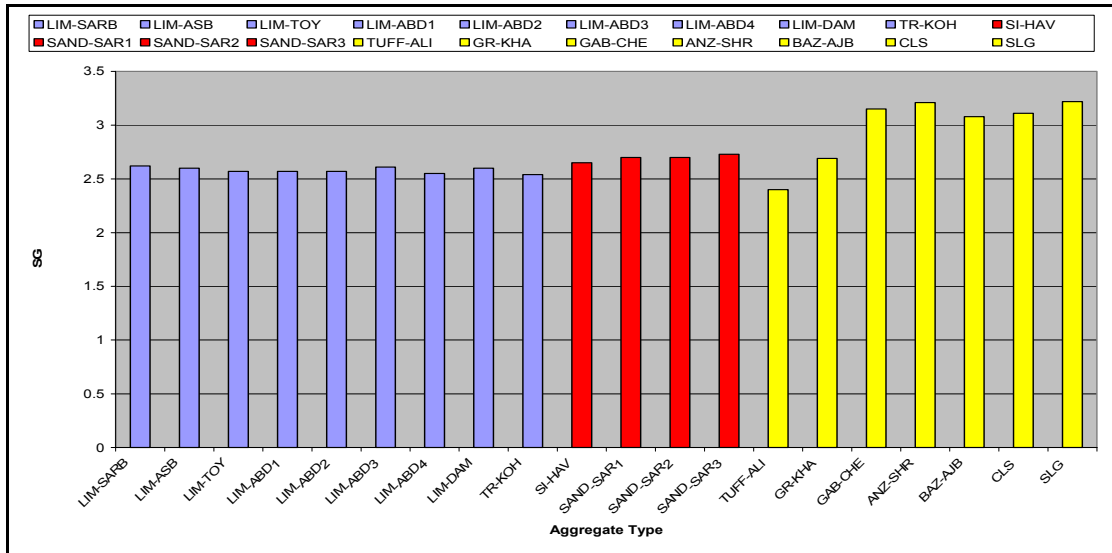
بررسی همبستگی بین ارزش صیقلی با دیگر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه ها

سایش لوس آنجلس را در سنگ های مختلف نشان می دهد. میانگین ارزش سایش در گروه سنگ های کربناته، ماسه سنگ و آذرین به ترتیب ۲۸/۳٪، ۳۳/۱٪ و ۲۴/۸٪ (۱۸/۵۲٪ بدون در نظر گرفتن گرانیته) است. بنابر این مقاومت سایشی ماسه سنگ ها از دیگر گروه های سنگ کمتر و آذرینی ها از دیگر گروه های سنگ بیشتر است. در این میان، سنگ گرانیته و ماسه سنگ سیلیسی به ترتیب با ارزش سایش ۴۹/۹۴٪ و ۴۰/۱٪ ضعیف ترین و گابرو و توف به ترتیب با ارزش سایش ۱۴/۳۶٪ و ۱۸/۶۸٪ مقاوم ترین سنگدانه ها در برابر سایش محسوب می شوند.

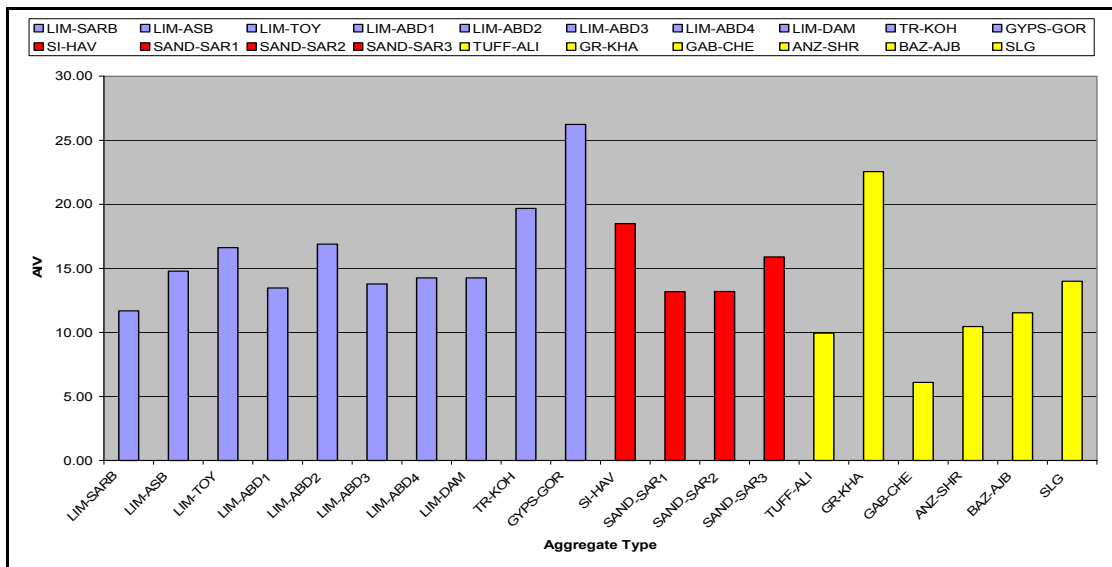
ارزش ضربه ۱۹/۶۹٪ کمترین مقاومت را در برابر ضربه در گروه سنگ های کربناته و دومین جایگاه را پس از گرانیته در کل سنگ ها به خود اختصاص داد. این مطلب را می توان به دلیل خلل و فرج موجود در این نوع سنگ دانست که باعث ایجاد ساختار شکننده در آن می شود. سنگ گرانیته با ارزش ضربه ۲۲/۵۵٪ و گابرو با ارزش ضربه ۶/۱۰٪ به ترتیب کمترین و بیشترین مقاومت را در برابر ضربه در گروه سنگ های آذرین و در کل گروه های سنگ نشان دادند. پیوند سست ذرات سخت تشکیل دهنده گرانیته، دلیل اصلی افت زیاد مقاومت این سنگ در برابر ضربه محسوب می شود. نمودار شکل (۵) مقادیر ارزش

جدول ۱. فهرست نمونه های سنگ آزمایش شده در این تحقیق

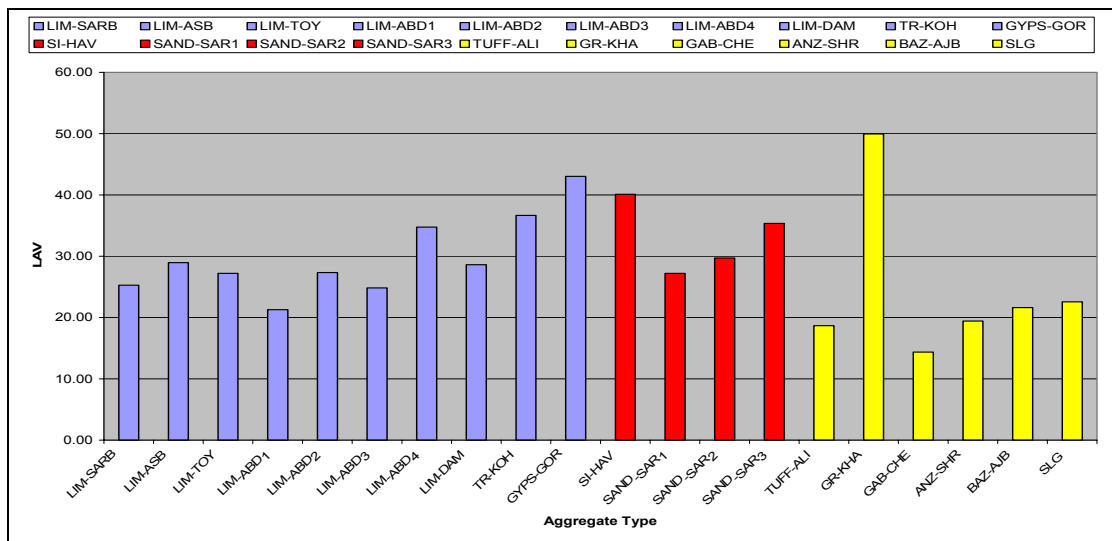
ردیف	نام معدن	نوع معدن	جنس سنگ	کد سنگ	استان	شهر
۱	سریندان	کوهی	سنگ آهک	LIM-SARB	تهران	دماوند
۲	کهنک	کوهی	تراورتن	TR-KOH	تهران	دماوند
۳	علی آباد	کوهی	توف	TUFF-ALI	تهران	دماوند
۴	هویر	کوهی	ماسه سنگ سیلیسی	SI-HAV	تهران	دماوند
۵	اسب چران	کوهی	سنگ آهک	LIM-ASB	تهران	دماوند
۶	سر سلطان ۱	کوهی	ماسه سنگ	SAND-SAR1	تهران	دماوند
۷	سرسلطان ۲	کوهی	ماسه سنگ	SAND-SAR2	تهران	دماوند
۸	سرسلطان ۳	کوهی	ماسه سنگ	SAND-SAR3	تهران	دماوند
۹	تویه-دروار	کوهی	سنگ آهک	LIM-TOY	سمنان	سمنان
۱۰	عبدل آباد ۱	کوهی	سنگ آهک	LIM-ABD1	سمنان	گرمسار
۱۱	عبدل آباد ۲	کوهی	سنگ آهک	LIM-ABD2	سمنان	گرمسار
۱۲	عبدل آباد ۳	کوهی	سنگ آهک	LIM-ABD3	سمنان	گرمسار
۱۳	عبدل آباد ۴	کوهی	سنگ آهک	LIM-ABD4	سمنان	گرمسار
۱۴	چشمه قصابان	کوهی	گابرو	GAB-CHE	همدان	همدان
۱۵	خاکو	کوهی	گرانیته خاکستری	GR-KHA	همدان	همدان
۱۶	بالاست شهریار	کوهی	آندزیت قهوه ای	ANZ-SHR	تهران	رباط کریم
۱۷	بالاست دامغان	کوهی	سنگ آهک	LIM-DAM	سمنان	دامغان
۱۸	عجب شیر	کوهی	بازالت	BAZ-AJB	آذ- شرقی	عجب شیر
۱۹	ذوب آهن	سرباره	گابروی دیوریتی	SLG	اصفهان	
۲۰		کوهی	بازالت	CLS	انگلستان	



شکل ۳. مقادیر وزن مخصوص (SG) سنگدانه‌های مختلف بر حسب نوع و جنس سنگدانه‌ها



شکل ۴. مقادیر ارزش ضربه‌پذیری (AIV) برای سنگدانه‌های مختلف بر حسب نوع و جنس سنگدانه‌ها



شکل ۵. مقادیر ارزش سایش لوس آنجلس (LAV) برای سنگدانه‌های مختلف بر حسب نوع و جنس سنگدانه‌ها

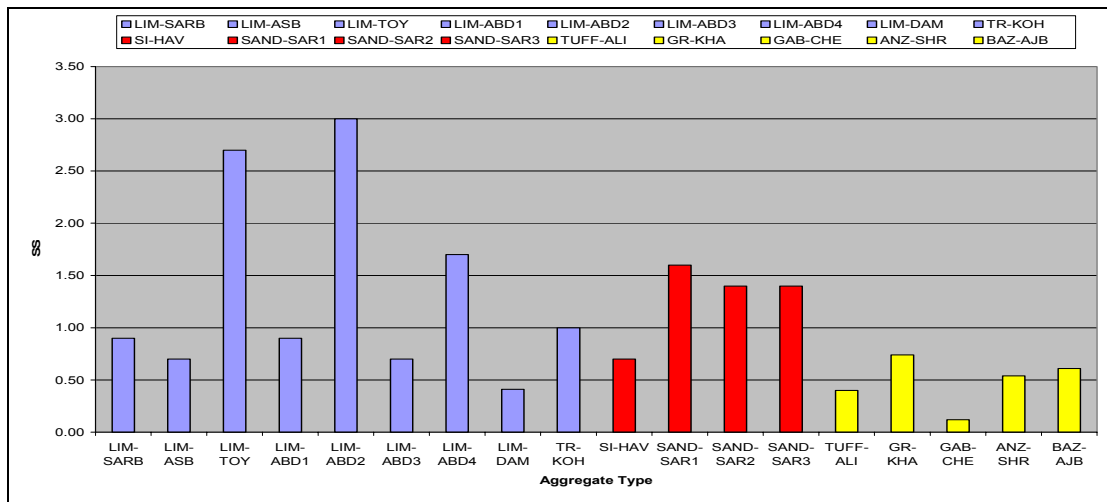
بررسی همبستگی بین ارزش صیقلی با دیگر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه ها

سنگ های آهکی نیز مبین این مطلب است. نمودار شکل (۷) مقادیر ارزش صیقلی برای سنگدانه های مختلف را نشان می دهد. حدود ارزش صیقلی برای گروه سنگ های رسوبی - شیمیایی (کربناته و آهکی) بین ۳۵ تا ۴۶، برای گروه سنگ های آذرین بین ۵۲ تا ۶۶ و برای گروه ماسه سنگ ها بین ۶۲ تا ۷۰ به دست آمد.

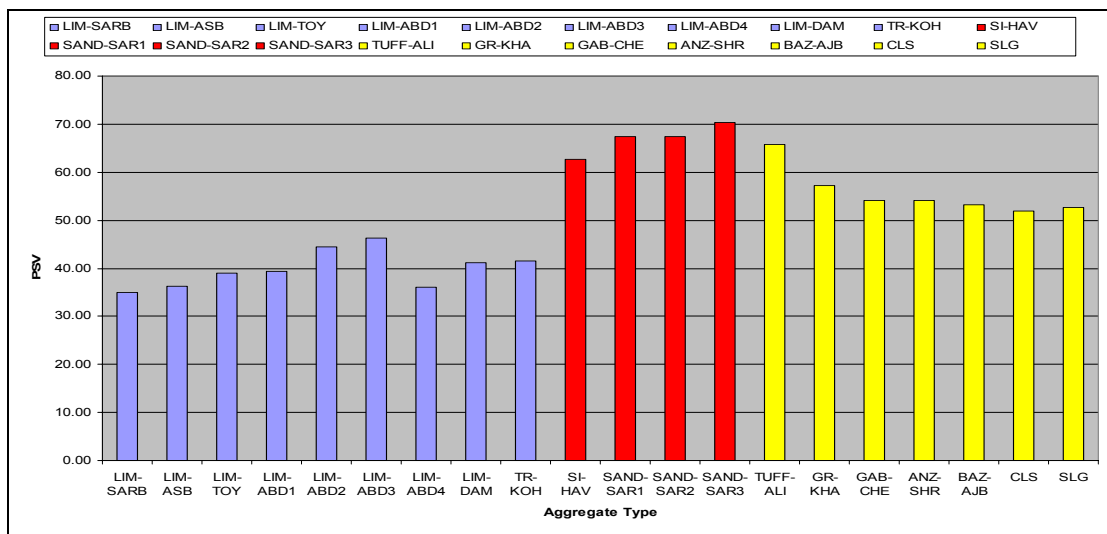
وجود تخلخل و کانی های سخت باعث افزایش ارزش صیقلی در سنگ های آهکی شده است. این مطلب در خصوص سنگ تراورتن (TR-KOH) و سنگ آهک دامغان (LIM-DAM) نیز صادق است. در گروه سنگ های آذرین، کمترین مقدار ارزش صیقلی متعلق به سنگ کنترل (بازالت دولریت) و بیشترین مقدار مربوط به سنگ توف (نوعی سنگ آذر آواری) است.

نمودار شکل (۶) میزان افت وزنی سنگدانه های مختلف را در برابر محلول سولفات سدیم نشان می دهد. در واقع آزمایش ساندنس مقاومت سنگدانه ها را در برابر هوازادگی و شرایط جوی مشخص می کند. بر اساس نتایج آزمایش های ارایه شده در شکل (۶)، سنگ های آهکی با میانگین افت وزنی ۱/۳۳٪ کمترین مقاومت و سنگ های آذرین با میانگین افت وزنی ۰/۴۸٪ بیشترین مقاومت را در برابر سولفات سدیم دارند.

در این میان ماسه سنگ ها با میانگین افت وزنی برابر با ۱/۲۸٪ وضعیتی نزدیک به سنگ های آهکی دارند. لازم به ذکر است که آزمایش ساندنس از قابلیت تکرارپذیری بسیار ضعیفی برخوردار است، به همین دلیل نمی توان استنباط قابل قبولی از نتایج حاصل از این آزمایش به دست آورد. نتایج پراکنده این آزمایش در گروه



شکل ۶. مقادیر افت وزنی در برابر سولفات سدیم (SS) برای سنگدانه های مختلف



شکل ۷. مقادیر ارزش صیقلی سنگ (PSV) برای سنگدانه های مختلف

## ۵. بررسی همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی

به منظور بررسی میزان همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی گروه های سنگ استفاده شده در این پژوهش از طریق تحلیل رگرسیون، ابتدا آزمون فرض برای بررسی نرمال بودن متغیرها (یعنی متغیر مورد نظر دارای توزیع نرمال است) انجام پذیرفت. در این آزمون، فرض صفر را بر نرمال بودن متغیر قرار داده و سطح اطمینان برابر با ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. به این ترتیب چنانچه مقدار  $p$ -value بیشتر از ۰/۰۵ شود فرض صفر یعنی نرمال بودن متغیر پذیرفته می شود. متغیرهایی که از توزیع نرمال تبعیت کنند به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته می شوند. نتایج آزمون نرمال در جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول متغیرهای SG و SS دارای  $p$ -value کمتر از ۰/۰۵ هستند بنابراین نمی توان آنها را به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفت. متغیر نرخ کاهش عدد آونگی ( $\frac{\Delta BPN}{BPN_0}$ ) که سرعت سیقلی شدن و از بین رفتن بافت ریز را تشریح می کند، در این پژوهش با واژه کوتاه شده PRR<sup>۴</sup> مورد استفاده و بررسی قرار گرفته است.

تحلیل رگرسیون در سطح معنی دار ۵ درصد انجام و صحت نتایج به روش تحلیل واریانس (ANOVA) و ضریب همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفت. همچنین محاسبه و کنترل پارامتر دوربین واتسون (DW) و بررسی نرمال بودن باقیمانده های مدل پیش بینی نیز برای کنترل مضاعف مدل ها انجام شد که نتایج آن در ادامه ارائه شده است. بر این اساس هرچه پارامتر دوربین واتسون که نشان دهنده میزان استقلال بین باقیمانده های مدل است به عدد ۲ نزدیک تر باشد، همبستگی و ارتباط قوی تری بین متغیر پاسخ و مستقل برقرار است [Gujarati, 2003]. همچنین نرمال بودن باقیمانده های مدل، نشان دهنده صحت و دقت زیاد نتایج مدل است. یاد آوری می شود که تحلیل در چهار گروه مختلف از سنگ ها شامل گروه سنگ های کربناته (LIM)، گروه سنگ های آذرین (IGN) و گروه مرکب از سنگ های آذرین و ماسه سنگ (IGN-SAND) و گروه مرکب از تمامی سنگ ها (TOTAL)، انجام شد. نتایج رگرسیون هایی که مورد تأیید بوده و بیان کننده رابطه معنی دار بین متغیرها هستند به صورت خلاصه در جدول (۳) ارائه شده اند.

جدول ۲. نتایج آزمون نرمالیت متغیرها

متغیر	مقدار P-Value	نتیجه آزمون نرمال
AIV	۰/۸۱۵	نرمال است
LAV	۰/۴۸۸	نرمال است
SG	۰/۰۴	نرمال نیست
SS	۰/۰۱	نرمال نیست
PRR	۰/۴۹۲	نرمال است
PSV	۰/۱۰۸	نرمال است

جدول ۳. مدل های رگرسیونی ارتباط خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه ها

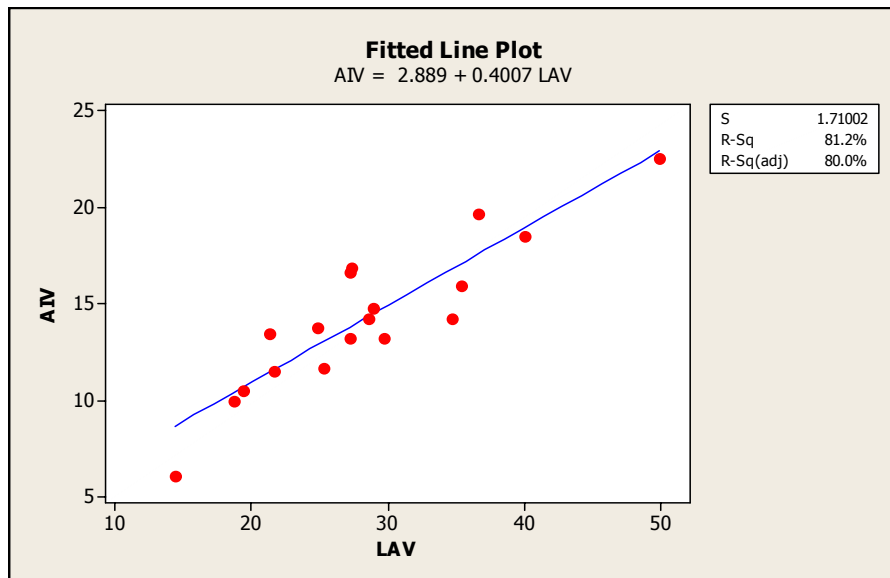
ردیف	گروه سنگ	مدل رگرسیونی	R-Sq(adj)	DW	P-Value
۱	TOTAL	AIV = 2.89 + 0.401 LAV	80.0%	1.222	0.000
۲	IGN	AIV = 1.53 + 0.427 LAV	96.7%	1.873	0.002
۳	IGN-SAND	AIV = 1.54 + 0.419 LAV	97.1%	2.029	0.000
۴	IGN	PRR = 0.0713 + 0.00196 LAV + 0.0455 SG - 0.128 SS	99.4%	2.668	0.049
۵	IGN	PSV = 96.9 - 13.7 SG	80.7%	2.673	0.025
۶	IGN-SAND	PSV = 94.7 - 14.0 SG + 7.15 SS	77.6%	2.364	0.005



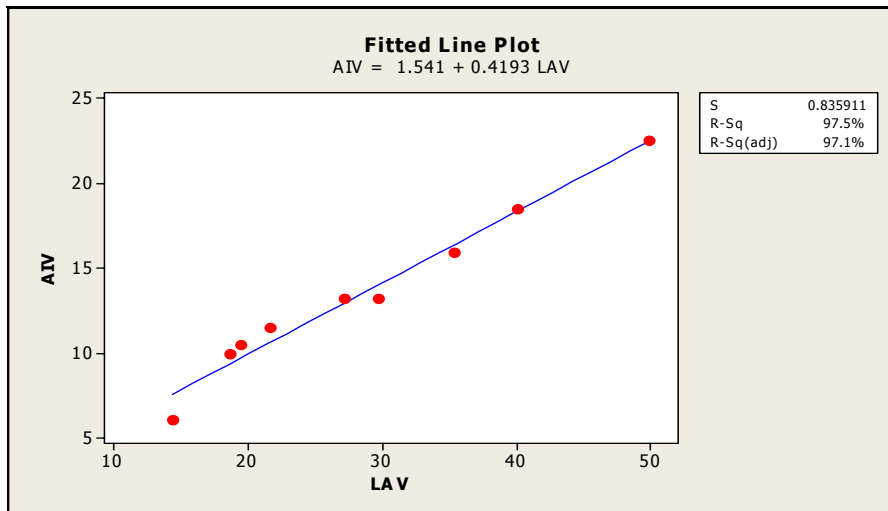
این تحقیق انجام شد مشخص گردید که در گروه سنگ های کربناته ارزش صیقلی با هیچ یک از متغیرهای ارزش ضربه، ارزش سایش لوس آنجلس، وزن مخصوص و ساندنس دارای همبستگی و ارتباط معنی داری نیست. همچنین به طور کلی ارزش صیقلی در هیچکدام از گروه های سنگ با متغیرهای ارزش ضربه و ارزش سایش لوس آنجلس نه به صورت مجزا و نه ترکیبی دارای ارتباط و همبستگی نیست. اما در گروه سنگ های آذرین، ارزش صیقلی با وزن مخصوص ارتباط خطی با ضریب همبستگی برابر با  $0.807$  برقرار کرد (رابطه ردیف ۵ جدول ۲ و شکل ۱۰)، به طوری که مقدار ارزش صیقلی با افزایش وزن مخصوص کاهش می یابد. این مطلب در مطالعات هاسکینگ تنها برای سرباره های کوره ذوب آهن تایید شده بود [Hosking 1992]. در گروه وسیع تری از سنگدانه ها یعنی گروه مشتمل بر سنگ های آذرین و ماسه سنگ ها، ارزش صیقلی با ترکیب وزن مخصوص و ساندنس ارتباط خطی و معنی داری با ضریب همبستگی برابر با  $0.776$  برقرار نمود (رابطه ردیف ۶ جدول ۲). نتیجه بررسی نرمال بودن باقیمانده های این مدل نیز در شکل (۱۲) ارایه شده که با P-Value برابر با  $0.725$  نشان دهنده کیفیت مناسب مدل پیش بینی است.

همان طور که ملاحظه می شود ارزش ضربه با ارزش سایش لوس آنجلس دارای ارتباط خطی و معنی دار است. این رابطه در گروه مشتمل بر سنگ های آذرین و ماسه سنگ با ضریب همبستگی برابر با  $0.971$  و DW نزدیک به ۲ از قوی ترین ارتباط برخوردار است (رابطه ردیف ۳ جدول ۳ و شکل ۸). در گروه سنگ های آذرین نیز با ضریب همبستگی برابر با  $0.967$  و DW نزدیک به ۱.۹ ارتباط خطی قوی بین متغیرهای مذکور وجود دارد (رابطه ردیف ۲ جدول ۳). در گروه وسیع تری که مشتمل بر کلیه سنگ های مورد استفاده در این پژوهش است میزان ضریب همبستگی و پارامتر دوربین واتسون کاهش یافته ولی همچنان رابطه خطی معنی دار و نسبتاً قوی بین متغیرهای مذکور برقرار است (رابطه ردیف ۱ جدول ۳ و شکل ۹). از مقایسه روابط ۱ و ۲ می توان نتیجه گرفت که همبستگی بین ارزش ضربه و سایش لوس آنجلس در گروه سنگ های کربناته که در مقایسه با دیگر گروه های سنگ دارای دوام و استحکام کمتری هستند ضعیف تر است و همین مسئله موجب کاهش ضریب همبستگی در مدل ۱ نسبت به مدل ۲ شده است.

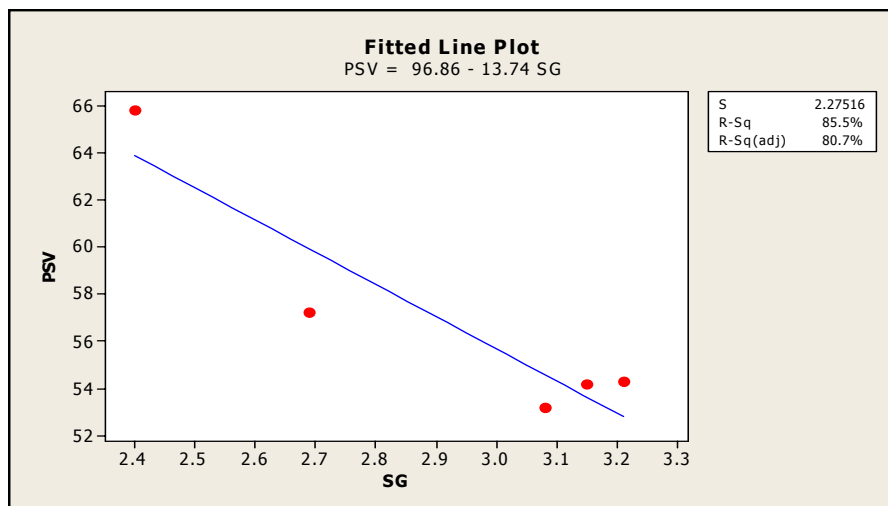
بر اساس بررسی های مختلفی که در خصوص ارتباط بین ارزش صیقلی سنگ با دیگر متغیرهای فیزیکی و مکانیکی مورد نظر در



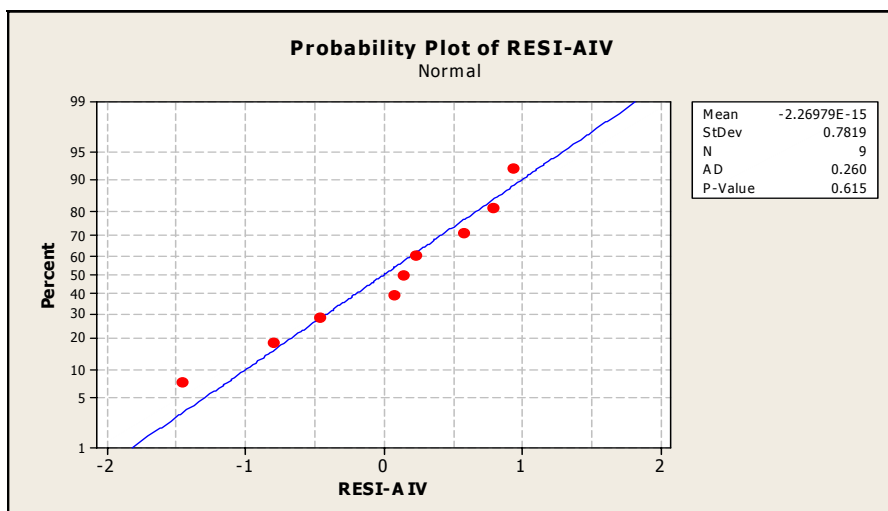
شکل ۸. همبستگی و ارتباط خطی بین مقادیر ارزش ضربه و ارزش سایش لوس آنجلس برای گروه مشتمل بر تمامی سنگ ها



شکل ۹. ارتباط خطی بین مقادیر ارزش ضربه و ارزش سایش لوس آنجلس برای گروه مشتمل بر سنگ های آذرین و ماسه سنگ



شکل ۱۰. همبستگی و ارتباط خطی بین ارزش صیقلی و وزن مخصوص برای گروه سنگ های آذرین



شکل ۱۱. نمودار توزیع نرمال باقیمانده های مدل پیش بینی ارزش ضربه بر حسب ارزش سایش لوس آنجلس (مدل ردیف ۳ جدول ۲)

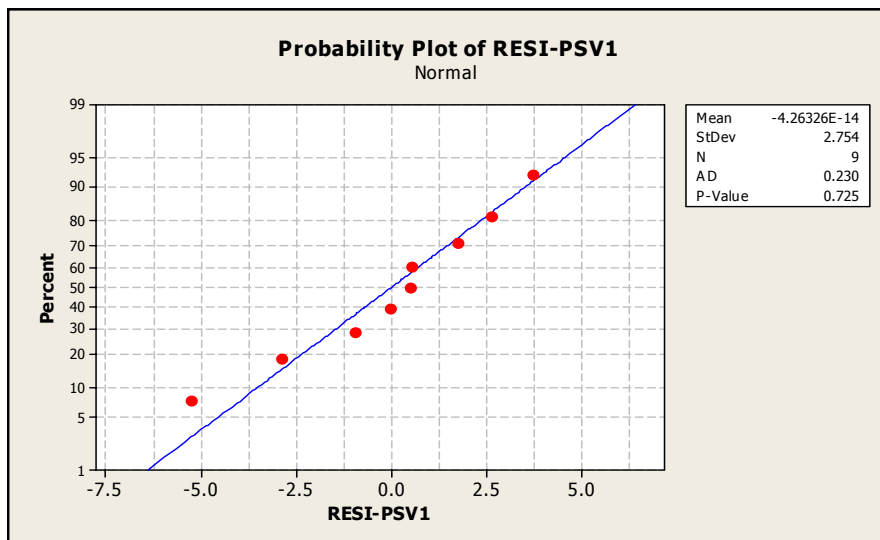
مربوط به ذوب آهن اصفهان استفاده شد. وزن مخصوص، ارزش ضربه، ارزش سایش لوس آنجلس و ارزش صیقلی این سرباره با انجام آزمایشهای مربوط به ترتیب برابر ۳/۲۲، ۱۴، ۲۲/۵۵ و ۵۲/۷ به دست آمد. با جایگذاری مقادیر مذکور در مدل های ردیف ۱ و ۵ از جدول (۲)، مقادیر پیش بینی با مقادیر مشاهده شده مقایسه شد که نتایج آن در جدول (۳) ارایه گردیده است. چنانکه اختلاف مقدار پیش بینی با مقدار مشاهده در محدوده تکرار پذیری و قابل قبول قرار گیرد صحت نتایج مدل ها مورد تأیید قرار می گیرد.

با توجه به دقت مربوط به قابلیت تکرارپذیری و بازتولید نتایج مربوط به آزمایشهای ارزش ضربه و ارزش صیقلی که عبارتند از ۱ تا ۲ واحد برای ارزش ضربه (BS812 part3) و ۳ تا ۵ واحد برای ارزش صیقلی (BSEN1097-8)، می توان صحت نتایج مدل های ذکر شده در جدول (۳) را تأیید کرد. این نتیجه نشان می دهد که مدل های پیشنهادی، جامعیت خوبی برای پوشش انواع مختلف سنگ ها را دارد.

همان طور که در مروری بر مطالعات گذشته ذکر شد، در تحقیق انجام شده توسط لانسیری بین نرخ کاهش عدد آونگی و ارزش سایش لوس آنجلس رابطه خطی با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹ برای سنگدانه های مورد استفاده در آن تحقیق که عمدتاً از سنگ آهک و تعدادی هم سنگ های آذرینی بودند به دست آمد. در این تحقیق این مطلب مورد بررسی قرار گرفت ولی رابطه مستقیم مشابهی به دست نیامد، بلکه یک مدل خطی و معنی دار با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۹/۴ بین PRR و ترکیبی از متغیرهای ارزش سایش لوس آنجلس، وزن مخصوص و ساندنس (مدل ردیف ۴ جدول ۲) در گروه سنگ های آذرین به دست آمد. مقدار ضریب همبستگی و همچنین پارامتر دوربین واتسون نشان دهنده ارتباط قوی بین نرخ کاهش عدد آونگی با متغیرهای مذکور است.

## ۶. بررسی صحت مدل

به منظور کنترل صحت مدل های خطی که برای پیش بینی ارزش صیقلی به دست آمدند، از اطلاعات یک نمونه سرباره فولاد



شکل ۱۲. نمودار توزیع نرمال باقیمانده های مدل پیش بینی ارزش صیقلی بر حسب وزن مخصوص و ساندنس برای گروه مرکب از سنگ های آذرین و ماسه سنگ ها (مدل ردیف ۶ جدول ۲)

جدول ۳. مقایسه مقادیر مشاهده و پیش بینی برای نمونه سنگدانه سرباره فولاد

گروه سنگ	مدل رگرسیونی	پیش بینی	مشاهده	اختلاف
TOTAL	$AIV = 2.89 + 0.401 LAV$	۱۲	۱۴	۲
IGN	$PSV = 96.9 - 13.7 SG$	۵۲/۸	۵۲/۷	۰/۱۰

## ۷. نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه ها تابع نوع و ساختار سنگدانه است، به طوری که وجود کانی های چگال و سنگین مانند کلینو پیروکسن، آمفیبول و اکسید آهن و یا وجود تخلخل در سنگ ها تأثیر زیادی روی وزن مخصوص آنها دارد. همچنین در بین سنگ های بررسی شده ماسه سنگ ها دارای کمترین مقاومت در برابر ضربه و سایش بودند که علت آن را می توان در پیوند ضعیف ذرات تشکیل دهنده سنگ به یکدیگر به واسطه ماتریس سست تر نسبت به سایر سنگ ها دانست. در گروه سنگ های آذرین نیز سنگ گرانیت با وجود اینکه از ذرات با سختی نسبی بالا تشکیل شده است، ولی به دلیل پیوند ضعیف بین ذرات، از مقاومت کمی در برابر ضربه و سایش برخوردار است. پراکنندگی زیاد نتایج آزمایش ساندنس به خصوص در گروه سنگ های کربناته نشان داد که ارتباط شفاف و معنی داری بین نتایج این آزمایش با نوع ترکیب سنگ ها وجود ندارد.

بررسی نتایج آزمایش صیقل روی نمونه های مختلف سنگدانه نشان داد که سنگ ها را از نظر ارزش صیقلی می توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: سنگ های با ارزش صیقلی کم شامل سنگ های کربناته، سنگ های با ارزش صیقلی متوسط شامل سنگ های آذرین و سنگ های با ارزش صیقلی نسبتاً زیاد شامل ماسه سنگ ها.

بررسی رابطه بین خصوصیات سنگدانه ها با یکدیگر نشان داد که ارزش ضربه با ارزش سایش لوس آنجلس دارای ارتباط خطی و معنی دار است، به طوری که در گروه مرکب از سنگ های آذرین و ماسه سنگ با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۷ از قوی ترین ارتباط برخوردار است. در گروه سنگ های آذرین و گروه شامل تمامی سنگ های مورد استفاده در این پژوهش نیز این ارتباط با ضرایب همبستگی بالا برقرار است. لازم به ذکر است تنها در گروه سنگ های کربناته ارتباط معنی داری بین ارزش ضربه و ارزش سایش لوس آنجلس به دست نیامد. نتایج حاصل از این پژوهش، ضریب همبستگی بیشتری بین ارزش ضربه و ارزش سایش لوس آنجلس در مقایسه با مطالعات قبلی را نشان داد.

بر اساس بررسی های مختلفی که در خصوص ارتباط بین ارزش صیقلی سنگ با دیگر متغیرهای فیزیکی و مکانیکی سنگدانه های مورد استفاده در این تحقیق انجام شد، مشخص گردید که در

گروه سنگ های کربناته ارزش صیقلی با هیچ یک از متغیرهای ارزش ضربه، ارزش سایش لوس آنجلس، وزن مخصوص و ساندنس دارای همبستگی و ارتباط قابل قبولی نیست. همچنین به طور کلی ارزش صیقلی در هیچکدام از گروه های سنگ با متغیرهای ارزش ضربه و ارزش سایش لوس آنجلس نه به صورت مجزا و نه ترکیبی دارای ارتباط و همبستگی نیست. اما در گروه سنگ های آذرین ارزش صیقلی با وزن مخصوص ارتباط خطی با ضریب همبستگی برابر با ۰/۸۰۷ برقرار کرد، به طوری که با افزایش وزن مخصوص مقدار ارزش صیقلی کاهش می یابد. در گروه وسیع تری از سنگدانه ها شامل گروه مرکب از سنگ های آذرین و ماسه سنگ ها، ارزش صیقلی با ترکیب وزن مخصوص و ساندنس ارتباط خطی با ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۷۶ برقرار کرد.

## ۸. پانویس ها

1. Carbonates
2. Sandstones
3. Igneous Rocks
4. Aggregate Impact Value
5. Los Angeles Abrasion Value
6. Polished Stone Value
7. Aggregate Crushing Value
8. Aggregate Abrasion Value
9. Pendulum Number Reduction Rate

## ۹. مراجع

- Alvarado C., Mahmoud E., Abdallah I., Masad E., Nazarian, S., Tandon V. and Button J. (2006) "Feasibility of quantifying the role of coarse aggregate point and mass strength on resistance to load in HMA", Texas Department of Transportation Research Report, TX 0-5268-2, October, 2006.

- ASTM:C88-05 (2007) "Test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate", Book of ASTM Standards, Volume 04.02: Concrete and Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, United States.

- ASTM:C127-04 (2007) "Test method for density, relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate", Book of ASTM Standards, Volume:04.03: Concrete and Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, United States.

- International Center for Aggregate Research, ICAR Report 507-1F.
- Gujarati, D.N. (2003) "Basic econometrics", 4<sup>th</sup> edition, Boston, McGraw-Hill.
- Hosking, J.R. (1992), "Road aggregates and skidding", State-of-The-Art Review 4, Transport Research Laboratory, Department of Transport, London :HMSO.
- Lancieri F., Losa, M. and Marradi, A. (2005) "Resistance to polishing and mechanical properties of aggregates for asphalt concrete wearing courses", 3<sup>rd</sup> International SIIV Congress, Proceeding Volume 4, pp.162-178, Bari, Italia, September, 2005.
- Rangaraju, P.R., Edlinski, J. and Amikhanian, S. (2005) "Evaluation of South Carolina aggregate durability properties", South Carolina Department of Transportation, Report No, FHWA-SC-05-01, Final Report, January 31, 2005.
- Woodward, W.D.H. (1995) "Laboratory predication of surfacing aggregate performance", Ph. D. Thesis, University of Ulsterat Jordans Town, Newtown Abbey, County Antrim, Northern Ireland.
- ASTM: C131-06 (2007) "Test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine" Book of ASTM Standards, Volume 04.02:Concrete and Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, United States.
- Brandes, H.G. and Robinson, C.E. (2006) "Correlation of aggregate test parameters to hot mix asphalt pavement performance in Hawaii", Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, Issue 1.
- British Standards Institution (1975) "Methods for determination of mechanical properties", B.S.812: Part 3, London.
- British Standards Institution (1989) "Method for determination of polished stone value (PSV)", B.S.812: Part 114, London.
- BS EN 1097-8, (2000) "Tests for mechanical and physical properties of aggregates, determination of the polished stone value", British-Adopted European Standard, March 15<sup>th</sup> 2000.
- Fowler, D.W., Allen J.J., Lange A. and Range P. (2006) "The prediction of coarse aggregate performance by micro-deval and other aggregate tests", The University of Texas at Austin,