معرفی شاخص صیقلی شدن سنگدانه‌ها و نتایج آزمایش برخی مصالح سنگی ایران

علی‌اصغر اکبری نسرکانی، سیاوش کردی، کورش نادری

شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک

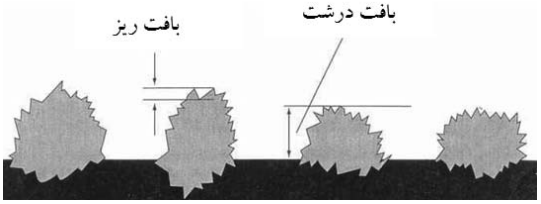
چکیده

از مهم‌ترین موارد مرتبط با ایمنی راه‌ها، روسازی با مقاومت اصطکاکی مناسب است. یکی از مواردی که در سرعت‌های مختلف وسیله نقلیه بر مقاومت اصطکاکی تأثیر می‌گذارد بافت ریز روسازی است و این بافت ریز وابسته به مشخصات مصالح سنگی است. آزمایش شاخص صیقلی شدن سنگ یک آزمایش بسیار کاربردی برای سنجش بافت ریز سنگدانه‌های مختلف و ارزیابی مقاومت آن‌ها در برابر ساییده شدن است. با انجام این آزمایش در کنار سایر آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی می‌توان مصالح سنگی مناسب را انتخاب نمود به نحوی که سطح نهایی روسازی، از مقاومت اصطکاکی بیشتری برخوردار باشد. در این یادداشت فنی روش انجام آزمایش توضیح داده شده و ارتباط آن با سایر آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی بررسی شده است. در ادامه آزمایش شاخص صیقلی شدن بر روی چند نوع سنگ مورد استفاده در راهسازی از اقصی نقاط کشور انجام شده که نتایج آن ارائه می‌شود.

۱– مقدمه

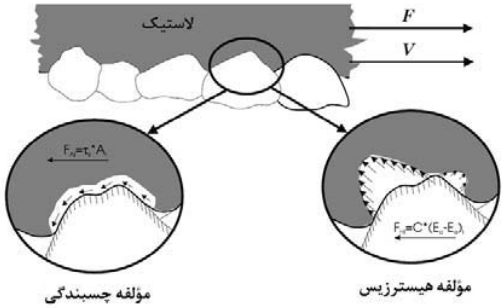
عوامل مؤثر بر مقاومت اصطکاکی روسازی را می‌توان به پنج گروه مشخصات بافت سطح جاده و مصالح به کار رفته، مشخصات وسیله نقلیه، مشخصات لاستیک، شرایط عبور و مرور و شرایط آب و هوایی تقسیم نمود. بافت روسازی تابعی از مشخصات سطح روسازی است که از پیکربندی سطح مصالح روسازی ناشی می‌شود و اصطکاک بین چرخ وسیله نقلیه و سطح جاده را تأمین می‌کند. بافت روسازی عبارت است از ترکیبی از نامنظمی‌ها با طول موج و دامنه‌های مختلف در یک محدوده مشخص که با توجه به این محدوده‌ها به سه نوع بافت ریز، بافت درشت و بافت بزرگ تقسیم می‌گردد [۱].

شکل ۱ به صورت شماتیک بافت ریز و درشت روسازی را نشان می‌دهد. بافت ریز درجه‌ای از ناهمواری است که از مشخصات سطح مصالح سنگی ناشی می‌شود. مطابق با استاندارد EN 13473-5 بافت ریز به ناهمواری‌های مصالح سنگی روسازی با طول موج‌های در محدوده یک میکرومتر الی پانصد میکرومتر اطلاق می‌شود. بافت ریز روسازی وابسته به شکل و بافت ظاهری سنگدانه می‌باشد. دوام این شکل ظاهری به پتروگرافی و مینرالوژی سنگ باز می‌گردد. بافت ریز روسازی نقش عمده‌ای در تأمین مقاومت اصطکاکی روسازی به ویژه در آب و هوای خشک ایفا می‌کند. عیب بزرگ بودن آن این است که استهلاک لاستیک را بالا می‌برد [۳-۲].



شکل ۱- بافت ریز و درشت روسازی

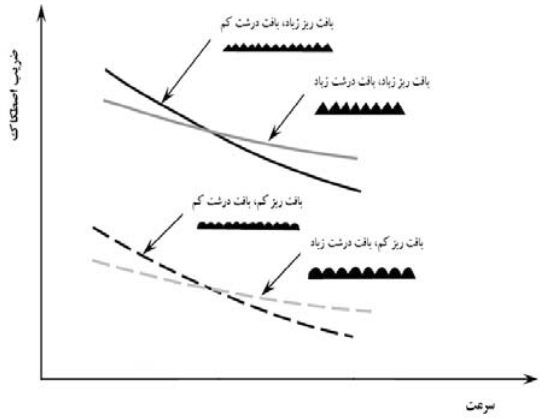
اصطکاک روسازی ناشی از تعامل پیچیده دو مؤلفه نیروی اصطکاکی تحت عنوان چسبندگی و هیسترزیس می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. مؤلفه چسبندگی نیروی اصطکاکی از چسبندگی تایر وسیله نقلیه و سطح روسازی مادامی که با هم در تماس هستند رخ می‌دهد. این نیرو تابعی از مقاومت برشی و سطح تماس می‌باشد. مؤلفه هیسترزیس نیروی اصطکاکی ناشی از کاهش انرژی به علت تغییر حجم تایر وسیله نقلیه است. مؤلفه چسبندگی وابسته به بافت ریز روسازی و مؤلفه هیسترزیس وابسته به بافت درشت روسازی می‌باشد [٤]. عملکرد اصلی بافت ریز روسازی تأمین مؤلفه چسبندگی نیروی اصطکاک در مقیاس میکروسکوپی است ضمن آن که منجر به از بین رفتن پیوستگی لایه نازک آب موجود در سطح راه و مقاومت اصطکاکی بهتر می‌شود [٤].



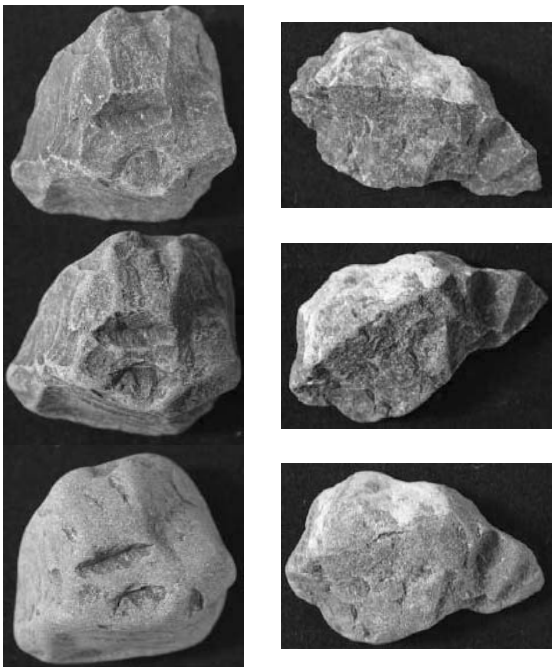
شکل ۲- مکانیسم اصطکاک بین تایر و سطح روسازی [٤]

شکل ۳ اثر نسبی بافت ریز، بافت درشت و سرعت را بر اصطکاک روسازی نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، صرف نظر از آن که مقدار بافت درشت روسازی چقدر باشد، روسازی دارای بافت ریز مناسب، چه در حالت خشک و چه در شرایط مرطوب، دارای ضریب اصطکاک بیشتری با چرخ وسیله نقلیه است که نشان از اهمیت بافت ریز در تأمین اصطکاک روسازی دارد، در حالی که بافت درشت بر شیب این منحنی تأثیر می‌گذارد به نحوی که در سرعت‌های بالا نقش عمده‌ای در تأمین اصطکاک روسازی ایفا می‌کند [٥].

با گذر زمان و عبور ترافیک از روسازی، مصالح سنگی به مرور ساییده می‌شوند و بافت ریز روسازی کاهش می‌یابد. شکل ٤ دو نمونه سنگ را نشان می‌دهد که با سایش بیشتر (از بالا به پایین) بافت ریز آن کاهش یافته و ساییده شده است. هنگامی که این نوع مصالح سنگی برای ساخت روسازی استفاده می‌شوند و تحت سایش چرخ وسایل نقلیه قرار می‌گیرند، برخی از آنها پس از مثلاً پنج سال عبور ترافیک در این حد ساییده می‌شوند در حالی که شاید برخی دیگر پس از پانزده سال به این سطح از صیقلی شدن می‌رسند که این امر به جنس و کانی‌های تشکیل دهنده سنگ باز می‌گردد. لذا انتخاب مصالح سنگی مناسب پیش از اجرای روسازی از اهمیت بسیاری در تأمین اصطکاک سطح رویه نهایی راه برخوردار است [٦].



شکل ۳- اثر بافت ریز و درشت روسازی بر اصطکاک چرخ - روسازی در سرعت‌های مختلف [٥]



شکل ٤- از بین رفتن بافت مصالح سنگی بر اثر سایش [٦]

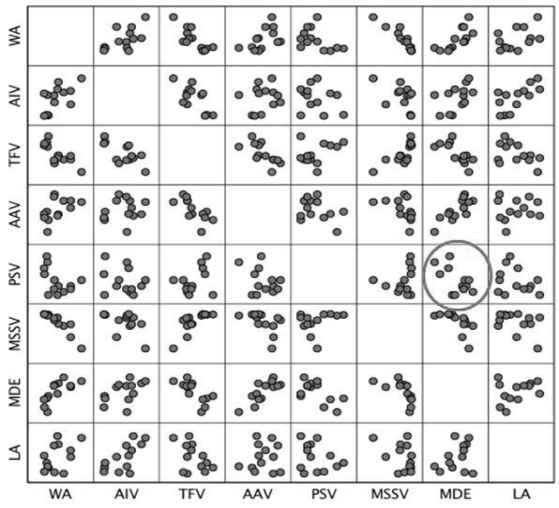
آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی برای بررسی مناسب بودن مصالح سنگی جهت کاربرد در روسازی آسفالتی انجام می‌شود. این آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های ابعاد و شکل، وزن مخصوص و جذب آب، مقاومت، دوام و سازگاری با قیر است. مهم‌ترین آزمایش مصالح سنگی که با مقاومت لغزشی روسازی و بافت ریز آن مرتبط است، آزمایش تعیین شاخص صیقلی شدن مصالح سنگی (PSV[1]) است که در این یادداشت فنی به آن پرداخته می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد میان PSV و سایر پارامترهای مصالح سنگی ارتباط مناسبی وجود ندارد. وودساید[2] و همکاران با انجام آزمایش PSV بر روی بیش از ۳۰ نوع سنگ مختلف، ارتباط PSV را با سایر پارامترهای مصالح سنگی مورد بررسی قرار دادند و ملاحظه شد ضریب همبستگی (R^2) میان PSV و نتایج آزمایش‌ها (نظیر جذب آب مصالح سنگی، ارزش ضربه‌ای، میکرودوال، مقاومت در برابر سولفات منیزیم) بسیار پایین است. بیشترین همبستگی میان PSV و نتیجه آزمایش میکرودوال وجود داشت که ضریب همبستگی ۰/٤٦ حاصل شد [۷]. در پژوهشی دیگر نیکولز[3] بر روی بیش از ۱۵ نوع سنگدانه آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی را انجام داد. ارتباط نتایج این آزمایش‌ها در برابر یکدیگر در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل مشخص است که پارامتر PSV ارتباط مناسبی با سایر پارامترها ندارد و بیشترین همبستگی با نتیجه آزمایش میکرودوال مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی آن ۰/٦۲ است [۸].

هال[4] و همکاران در گزارشی جامع پارامترهای مختلف مصالح سنگی را بررسی و عنوان کردند آزمایش‌های زیر بیشترین تأثیر را بر مقاومت اصطکاکی سطح روسازی نهایی دارند:

- سختی خراش[5]
- آنالیز پتروگرافی[6]
- گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه[7]
- جرم واحد حجم مصالح سنگی درشت‌دانه غیرمتراکم[8]
- درصد شکستگی[9]
- میکرودوال[10]
- مقدار مواد نامحلول در اسید[11]
- سایش لس آنجلس[12]
- شاخص صیقلی‌شدن سنگ[13]
- افت وزنی در برابر سولفات منیزیم[14] [۹].

[1] Polished Stone Value
[2] Woodside

[3] Nicholls
[4] Hall
[5] Scratch Hardness
[6] Petrographic Analysis
[7] Uncompacted voids for fine aggregates
[8] Uncompacted voids for coarse aggregates
[9] Fractured-face particles
[10] Micro-Deval for coarse aggregates
[11] Acid insoluble residue
[12] Los angeles abrasion
[13] Polished stone value
[14] Magnesium sulfate soundness



WA: Water Absorption
AIV: Aggregate Impact Value
TFV: Ten percent Fines Value
AAV: Aggregate Abrasion Value
PSV: Polished Stone Value
MSSV: Magnesium Sulfate Soundness Value
MDE: Micro-Deval
LA: Los Angeles

شکل ۵- ارتباط پارامترهای مختلف مصالح سنگی با یکدیگر

هال و همکاران به این نتیجه رسیدند که با انجام یک آزمایش به تنهایی نمی‌توان پی برد که عملکرد اصطکاکی یک سنگدانه مناسب است. آزمایش سایش لس آنجلس بر خلاف نام آن، با استفاده از فرآیند چرخش و ضربه با گلوله‌های فولادی در واقع مقاومت سنگدانه را در برابر خرد شدن در حین عملیات جابجایی و حمل، پخش و تراکم زیر غلتک شبیه‌سازی می‌کند، در حالی که آزمایش تعیین شاخص صیقلی شدن سنگ، در عمل مقاومت سنگ را در برابر ساییده شدن بر اثر قرار گرفتن در معرض عبور چرخ و ترافیک می‌سنجد. در این یادداشت فنی به مقاومت مصالح سنگی در برابر ساییده و صیقلی شدن پرداخته می‌شود که عامل تعیین کننده در تأمین بافت ریز سطح روسازی نهایی است. ارزیابی مقاومت مصالح سنگی در برابر صیقلی شدن و اطمینان از میزان نیروی اصطکاکی موجود به منظور جلوگیری از حادثه ناگوار برای وسایل نقلیه و حفظ سطح ایمنی مسیر در طول دوره عمر روسازی، ضروری است [۹].

۲- آزمایش شاخص صیقلی شدن PSV

آزمایش PSV مطابق با استاندارد EN 1097-8 انجام می‌شود که آخرین ویرایش آن در سال ۲۰۰۹ ارائه شده است [۱۰]. این استاندارد در سال ۱۳۹٤ توسط سازمان ملی استاندارد ترجمه شد و اکنون در دسترس همگان قرار دارد. دستگاه آزمایش PSV موجود در آزمایشگاه قیر و آسفالت شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی با این استاندارد منطبق است. این آزمایش طبق استانداردهای ASTM و AASHTO نیز انجام می‌شود، اما دستگاه آزمایش، روش انجام آزمایش، ابعاد نمونه‌ها، زمان صیقل دادن نمونه‌ها و برخی شرایط دیگر آزمایش در این دو استاندارد با روش استاندارد EN و استاندارد ملی ایران متفاوت است که با توجه به موجود نبودن آن در کشور، تنها به شرح آزمایش مطابق استاندارد EN و ISIRI بسنده می‌گردد. برای انجام آزمایش PSV از دستگاه صیقلی کننده سنگ و پاندول انگلیسی استفاده می‌شود که در ادامه هر یک از آنها توضیح داده می‌شود.

۲-۱- دستگاه صیقل دهنده سنگ

شکل ٦ دستگاه صیقل دهنده مصالح سنگی و شماتیک آن را نشان می‌دهد. دستگاه صیقل بر روی چهار پایه قابل تنظیم برای تراز کردن، قرار گرفته و اجزای آن به شرح زیر است:

۱- چرخ جاده[15] با قطر ٤٠٦ میلیمتر و ضخامت ٤٤/٥ میلیمتر که دارای دو لبه جهت نگهداشت نمونه‌ها است و ١٤ نمونه بر روی محیط خارجی آن قرار می‌گیرد. چرخ جاده با استفاده از یک موتور که به محور آن متصل است با سرعت ۳۲۵ دور در دقیقه می‌چرخد.

۲- چرخ لاستیکی توپر[16] با قطر ۲۰۰ میلیمتر و ضخامت ۳۸ میلیمتر. در این آزمایش از دو چرخ لاستیکی توپر استفاده می‌شود. یک چرخ با رنگ تیره که باید همزمان با سنباده دانه‌ای[17] و یک چرخ با رنگ روشن که باید توأم با پودر سنباده[18] استفاده گردد.

۳- بازوی اهرم و وزنه‌ای که در صورت حرکت رو به پایین، سطح چرخ لاستیکی توپر را با سطح چرخ جاده درگیر کرده و نمونه‌های روی سطح آن را تحت بار ۷۲۵ نیوتنی قرار می‌دهد.

٤- سیستم تغذیه سنباده دانه‌ای و پودر سنباده که به ترتیب با چرخ لاستیکی توپر تیره و روشن مورد استفاده قرار می‌گیرند. میزان ریزش سنباده دانه‌ای و پودر سنباده به ترتیب برابر ۲۷ گرم بر دقیقه و ۳ گرم بر دقیقه تنظیم می‌گردد.

٥- منبع آب

٦- شیر تنظیم جریان آب که وظیفه کنترل نرخ آب مصرفی را بر عهده دارد. دبی آب ورودی برابر ۲۷ گرم بر دقیقه تنظیم می‌گردد و سنباده و آب مستقیماً روی چرخ جاده و نزدیک نقطه تماس با چرخ لاستیکی توپر ریخته می‌شود.

۲-۲- دستگاه پاندول انگلیسی

شکل ۷ دستگاه پاندول انگلیسی و شماتیک آن را به همراه نمونه نشان می‌دهد. دستگاه شامل اجزای زیر است:

۱- مقیاس F که برای انجام آزمایش پاندول انگلیسی بر روی نمونه‌های انحنادار با طول لغزش ٧٦ میلیمتر استفاده می‌گردد.

۲- مقیاس نشان دهنده عدد اصطکاک سطحی که برای انجام آزمایش پاندول انگلیسی بر روی نمونه‌های تخت با طول لغزش ١٢٦ میلیمتر استفاده می‌شود. از این مقیاس در آزمایش PSV استفاده نمی‌شود.

۳- اشاره‌گر که آخرین وضعیت بازوی آونگ را با تاب خوردن رو به جلوی خود نشان می‌دهد و قرائت نتیجه با کمک این اشاره‌گر انجام می‌شود.

٤- پیچ تنظیم عمودی که وسیله‌ای است برای بالا بردن و پایین آوردن محور آویز آونگ به نحوی که بتوان کفشک لاستیکی را برای پیمودن ٧٦ میلیمتر نمونه انحنادار تنظیم نمود.

٥- آونگ

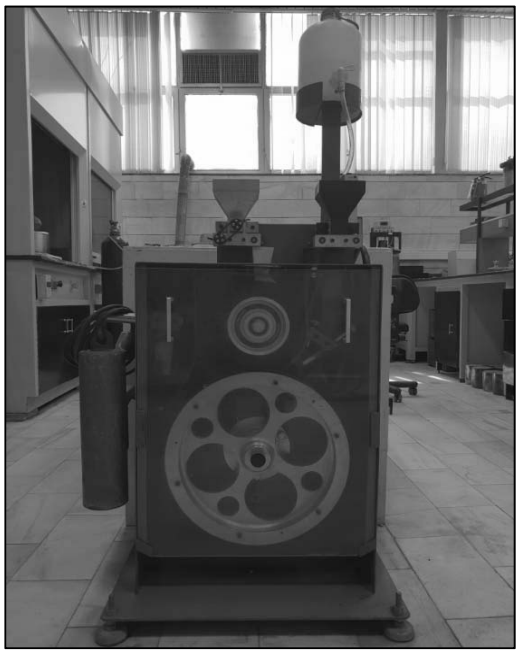
٦- تراز حباب دار برای تراز کردن دستگاه

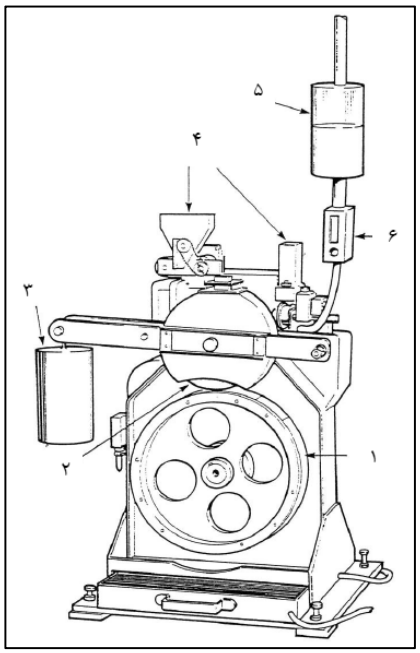
۷- کفشک لاستیکی بارگذاری شده با فنر و دارای جرم، اندازه، شکل و خصوصیات مشخص (عرض ٢٥/٤ میلیمتر و طول ۳۱/۸ میلیمتر).

۸- پیچ تراز برای استقرار و تراز کردن دستگاه

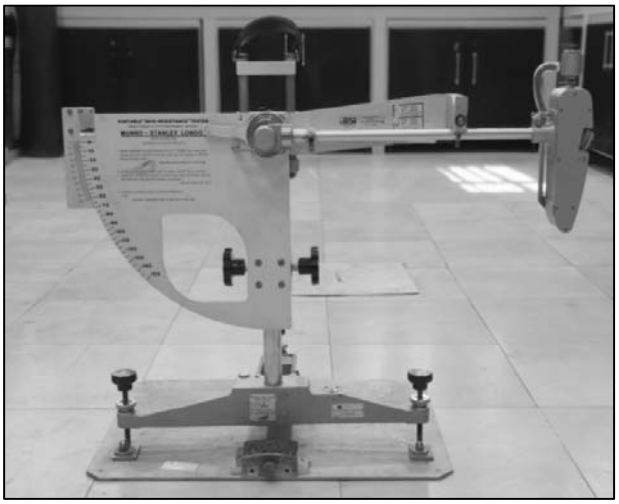
۹- نگه‌دارنده نمونه برای استقرار محکم یکی از نمونه‌های انحنادار دستگاه صیقل دهنده به طوری که بعد بلندتر آن در شیار قرار گرفته و نسبت به کفشک لاستیکی و محور آویز آونگ هم مرکز باشد.

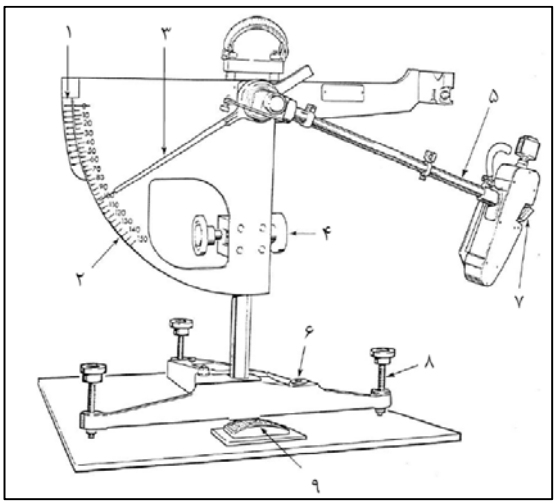
[15] Road wheel
[16] Solid rubber-tyred wheel
[17] Corn Emery
[18] Emery Flour





شکل ٦- دستگاه صیقل دهنده سنگ





شکل ۷- دستگاه پاندول آنگلیسی

۲-۳- شرح آزمایش و نحوه محاسبه PSV

آزمایش بر روی مصالح سنگی درشت، عبوری از الک ۱۰/۰ میلیمتر و مانده بر الک ۷/۲ میلیمتر، انجام می‌شود. پس از الک کردن، مصالح سنگی شسته و خشک می‌شود. در هر بار انجام آزمایش PSV، شش نوع سنگدانه با جنس‌های مختلف را می‌توان مورد آزمایش قرار داد. البته پس از الک کردن بایستی سنگدانه‌های طویل با بعد بزرگتر از ١٤/٧ میلیمتر را جدا نمود. لازم به ذکر است آزمایش PSV را نمی‌توان بر روی مصالح سنگی حاصل از آزمایش اکستراکشن انجام داد.

مطابق شکل ۸-الف سنگدانه‌ها در قالب مخصوص چیده می‌شوند به نحوی که در هر قالب ۳۶ الی ٤٦ سنگدانه قرار بگیرد. این شرط برای آن است که سنگدانه‌های مورد استفاده خیلی ریز و خیلی درشت نباشند. سنگدانه‌ها را بایستی از طرف تخت آن‌ها بر کف قالب قرار داد و آنها را بدون فاصله اضافی کنار یکدیگر چید. درزهای بین سنگدانه‌ها مطابق شکل ۸- ب تا سه چهارم عمق آنها با ماسه پر می‌شود تا از نفوذ چسب به کف قالب جلوگیری شود. سپس طبق شکل ۸- پ روی سنگدانه‌ها از ماسه پاک می‌شود تا چسب بتواند کاملاً با سنگدانه در تماس قرار گیرد. در ادامه چسب در داخل قالب ریخته شده و پوشش فلزی بر روی قالب قرار داده می‌شود و روی آن وزنه قرار می‌گیرد یا مجموعه توسط یک گیره به صورت محکم مهار می‌شود تا چسب فرم قالب را به خود بگیرد (شکل ۸- ت). پس از گیرش چسب، نمونه از قالب خارج و سطح آن بازبینی می‌شود. اگر چسب به کف قالب یا روی سنگدانه‌ها نفوذ کرده باشد باید از آن نمونه صرفنظر و نمونه مجدداً ساخته شود.

برای انجام آزمایش PSV نیاز است نمونه‌هایی با استفاده از سنگ مرجع PSV[19] نیز ساخته شود. این سنگ که از معادن بریتانیا تهیه می‌شود، از جنس کوارتز و دارای PSV مشخص (۵۰ الی ٦۰) است. شکل ۸-ج و ۸- چ به ترتیب شکل ظاهری این سنگ و نمونه ساخته شده با آن را نشان می‌دهد.

برای سنجش صحت عملکرد دستگاه پاندول انگلیسی از سنگ مرجع اصطکاک‌سنج[20] استفاده می‌شود. سنگ مرجع اصطکاک‌سنج نیز از معادن بریتانیا تهیه می‌شود و از جنس بازالت است. مقدار PSV این سنگ مشخص است (٦۰ الی ٦۵) و در صورتی که پس از انجام آزمایش بر روی سنگ مرجع اصطکاک‌سنج مقدار PSV در محدوده مذکور قرار نگیرد، نشان دهنده آن است که دستگاه پاندول انگلیسی به درستی کار نمی‌کند و نیاز به سرویس دارد. البته این کنترل هر از گاهی انجام می‌شود. شکل ۸-ح و ۸- د به ترتیب شکل ظاهری این سنگ و نمونه ساخته شده با آن را نشان می‌دهد.

برای پر کردن محیط چرخ جاده نیاز است ١٤ نمونه ساخته شود تا بتوان آزمایش PSV را انجام داد. نمونه‌ها بایستی از ۱ تا ١٤ مشابه شکل ۸-ر شماره‌گذاری و جهت چرخش و ساییده شدن آن با یک پیکان مشخص گردد. شماره‌گذاری نمونه‌ها به شرح زیر صورت می‌پذیرد:

- دو نمونه از مصالح جنس اول: ۱ و ۲
- دو نمونه از مصالح جنس دوم: ۳ و ٤
- دو نمونه از مصالح جنس سوم: ۵ و ٦
- دو نمونه از مصالح جنس چهارم: ۷ و ۸
- دو نمونه از مصالح جنس پنجم: ۹ و ۱۰
- دو نمونه از مصالح جنس ششم: ۱۱ و ۱۲
- دو نمونه از مصالح جنس سنگ مرجع: ۱۳ و ١٤

نمونه‌ها را باید به ترتیب شماره‌هایی که در استاندارد ذکر شده است بر روی چرخ جاده قرار داد (شکل ۸-ژ). در صورتی که انجام آزمایش PSV بر روی یک یا دو نوع سنگدانه مد نظر باشد، می‌توان چرخ جاده را با نمونه‌های یدکی یا بدون استفاده پر نمود. پس از جایگذاری نمونه‌ها، چرخ جاده بر روی دستگاه قرار داده می‌شود. منبع آب و سیستم‌های تغذیه سنباده پر می‌شود و دستگاه آماده صیقل دادن نمونه‌ها می‌گردد.

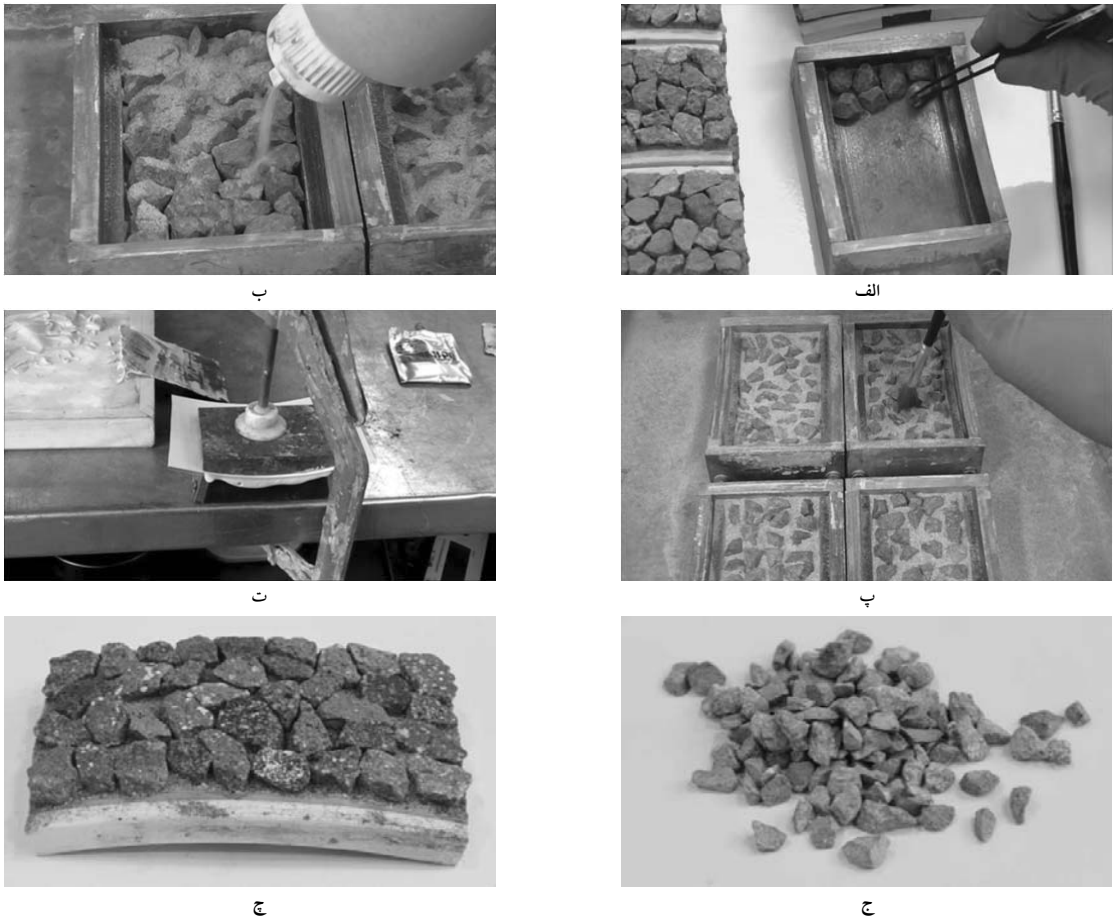
به کمک اهرم، چرخ لاستیکی توپر با رنگ تیره پایین آورده می‌شود و در تماس با نمونه‌ها قرار می‌گیرد. دستگاه روشن می‌شود و چرخ جاده شروع به دوران می‌کند. به صورت همزمان آب و سنباده دانه‌ای نیز بر روی نمونه‌ها

[19] PSV reference stone
[20] Friction tester reference stone

ریخته می‌شود. پس از ۳ ساعت صیقل دادن نمونه‌ها، دستگاه متوقف و چرخ لاستیکی توپر با رنگ روشن جایگزین چرخ قبلی می‌شود. سپس مجدداً دستگاه شروع به کار می‌کند و به صورت همزمان آب و این بار پودر سنباده بر روی نمونه‌ها ریخته می‌شود. در این مرحله نیز نمونه‌ها ۳ ساعت صیقل داده می‌شوند، سپس نمونه‌ها از چرخ جاده بیرون آورده می‌شوند. در ادامه سطح نمونه‌ها را با آب شستشو می‌دهند و آنها را به صورت وارونه طبق شکل ۸-س در داخل آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ الی ۱۲۰ دقیقه قرار می‌دهند.

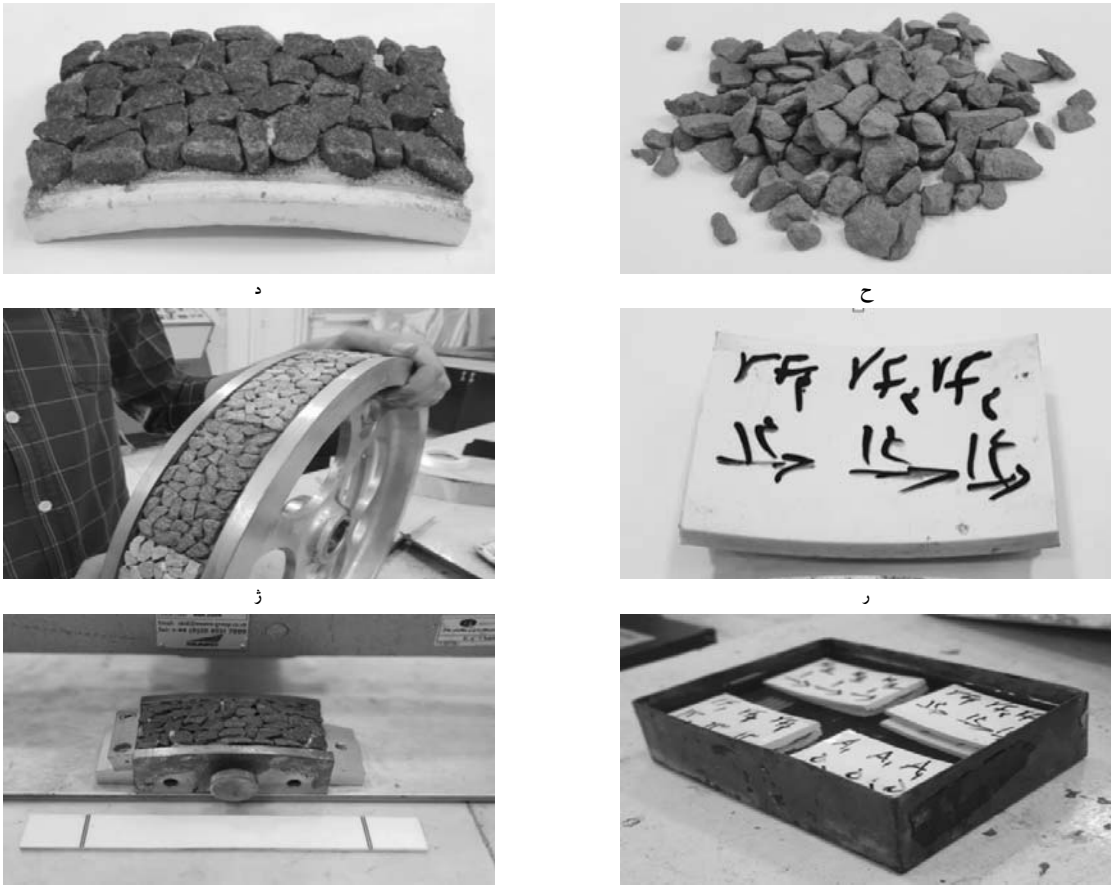
نمونه‌ها را از داخل آب خارج نموده و پیش از آن که خشک شوند تحت آزمایش پاندول انگلیسی در خلاف جهت سایش (در جهت خلاف پیکان) قرار می‌دهند و برای قرائت نتیجه از مقیاس F استفاده می‌شود. طبق استاندارد آزمایش پاندول انگلیسی بر روی هفت نمونه با شماره‌های مشخص، انجام می‌شود، سپس کفشک لاستیکی را بر عکس نموده، آزمایش پاندول انگلیسی را بر روی هفت نمونه دیگر انجام می‌دهند (شکل ۸-ش). اگر اختلاف بین دو نتیجه آزمون برای هر نوع سنگدانه بیش از ۵/۰ واحد باشد یا اگر حتی یکی از دو نتیجه آزمون برای سنگ مرجع PSV خارج از گستره مشخص شده باشد، نتایج آزمون پذیرفته نیست و آزمون باید تکرار شود.

تمامی مراحل ذکر شده یکبار دیگر انجام می‌شود تا برای هر نوع سنگدانه چهار عدد اصطکاک سطحی به دست آید. میانگین این چهار عدد را به نزدیکترین ۰/۱ گرد کرده و ثبت می‌نمایند.



الف ب پ ت ج چ

شکل ۸- مراحل انجام آزمایش PSV



د ح

ژ ر

ش س

شکل ۸ (ادامه)- مراحل انجام آزمایش PSV

اکنون می‌توان PSV را با استفاده از رابطه ۱ زیر محاسبه نمود.

$$PSV = S + (52.5) - C \qquad (۱)$$

که در آن S میانگین عدد اصطکاک سطحی چهار نمونه از یک نوع سنگدانه و C میانگین عدد اصطکاک سطحی چهار نمونه سنگ مرجع PSV است. مقدار PSV را بایستی به نزدیک‌ترین عدد کامل گرد کرد. با استفاده از این رابطه می‌توان PSV هر شش نوع سنگدانه را تعیین نمود. حداکثر مقدار برای تکرارپذیری و تجدیدپذیری این آزمایش به ترتیب برابر ۳ و ۵ است.

۳- مقدار PSV برخی مصالح سنگی ایران

در این پژوهش پنج نوع مصالح سنگی مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. نتیجه آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای آن که بتوان این مقادیر را ارزیابی نمود نیاز است آنها را با حدود مجاز مقایسه کرد.

جدول ۱- PSV مصالح سنگی ایران

مصالح سنگی	PSV
معدن شماره ۱	۳٤
معدن شماره ۲	۲۷
معدن شماره ۳	۳۵
معدن شماره ٤	۲۷
معدن شماره ۵	٤۱

کشورهای مختلف حدود متفاوتی را برای PSV مصالح سنگی جهت استفاده در روسازی اعلام کرده‌اند.

آئین‌نامه‌های اروپایی بسته به درجه اهمیت راه، مقدار متوسط ترافیک روزانه و کاربرد راه (آزادراه، راه دوطرفه، شیب طولی بالای ۵ درصد، نزدیکی تقاطع‌ها، میدان‌ها و ..) مقادیر مختلفی از حداقل PSV مورد نیاز برابر ۵۰ تا ٦٨ را ذکر کرده‌اند که نشان از توجه و سختگیری آنها بر مسائل ایمنی سطح راه دارد. آنها در برخی موارد الزام کرده‌اند در نقاط حادثه خیز و دارای ریسک بالا علاوه بر استفاده از مصالح سنگی دارای PSV بالای ٦٨، باید رویه با مقاومت اصطکاکی بالا[21] نیز اجرا کرد [۸].

از سایر کشورها نیز می‌توان به مشخصات ایالت انتاریو کانادا اشاره کرد که حداقل PSV مصالح سنگی ۵۰ اعلام شده است.

در آمریکا ایالت‌های مختلف حدود مشخصات خویش را با توجه به معیارهای مختلف بیان کرده‌اند. ایالت یوتا حداقل PSV مصالح سنگی راهسازی را برابر ۳۸ اعلام کرده است. ایالت نیوجرسی PSV از ۲۵ تا ۳۰ را قابل قبول و بالای ۳۰ را خوب در نظر می‌گیرد و در نقاط حادثه‌خیز حداقل PSV را برابر ۳۳ توصیه کرده است. ایالت تنسی برای سه نوع راه درجه ۱، درجه ۲ و درجه ۳ مقادیر حداقل PSV را به ترتیب حداقل ۳۳، حداقل ۳۰ و حداقل ۲۵ تعیین کرده است. ایالت تگزاس بسته به متوسط ترافیک روزانه مقادیر حداقل PSV مورد نیاز را به شرح زیر بیان کرده است:

- کمتر از ۷۵۰ وسیله نقلیه: بدون الزام
- بین ۷۵۰ تا ۲۰۰۰ وسیله نقلیه: حداقل ۲۸
- بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ وسیله نقلیه: حداقل ۳۰
- بیشتر از ۵۰۰۰ وسیله نقلیه: حداقل ۳۲

ایالت لوئیزیانا نیز حداقل PSV را به صورت زیر اعلام کرده است:

- راه با درجه اصطکاکی ۱: بیشتر از ۳۷
- راه با درجه اصطکاکی ۲: بین ۳۵ تا ۳۷
- راه با درجه اصطکاکی ۳: بین ٢٤ تا ۳۰
- راه با درجه اصطکاکی ٤: بین ۲۰ تا ۲۹

سایر ایالت ها نیز حدود دیگری را مشخص کرده‌اند.

در مجموع مقایسه نتایج با حدود مجاز آئین‌نامه‌های مختلف برای مقدار PSV نشان می‌دهد اروپا حداقل مقدار PSV را بسیار بالا در نظر می‌گیرد. این مسأله احتمالاً به جنس مصالح سنگی راهسازی رایج در اروپا و شرایط آب و هوایی مرطوب آن بازمی‌گردد. درحالی که طبق جدول ۱ برای هیچ یک از انواع مصالح سنگی مورد مطالعه، حداقل مقدار PSV مورد نیاز یعنی عدد ۵۰ به دست نیامد و تنها در بهترین حالت مقدار PSV برابر ٤١ حاصل شد. این مسأله در حالی است که در کشور ایران راه‌های بسیاری وجود دارند که وقتی بر روی سطح آنها آزمایش پاندول انگلیسی انجام می‌شود، مقدار عدد اصطکاک سطحی بیش از ٦٥ به دست می‌آید که نشان می‌دهد این راه‌ها از مقاومت اصطکاکی مناسبی برخوردارند. بنابراین مقایسه نتایج با آئین‌نامه‌های اروپا منطقی به نظر نمی‌رسد.

حداقل PSV مجاز در ایالت‌های مختلف آمریکا نشان می‌دهد مقدار PSV بالای ۳۰ تا ۳۵ برای مصالح سنگی مقدار مناسبی است. با توجه به نزدیکی نتایج حاصل از آزمایش PSV برخی مصالح سنگی ایران با این حدود به نظر می‌رسد مقاومت صیقلی شدن مصالح سنگی ایران و آمریکا به یکدیگر نزدیک است و بتوان نتیجه آزمایش‌ها را با آئین‌نامه‌های آنها مقایسه نمود. مقایسه نتایج نشان می‌دهد مصالح سنگی معدن شماره ۲ و ٤ دارای شاخص

[21] High friction surface course

صیقلی‌شدن مناسبی نیستند ولی مصالح سنگی معدن‌های دیگر از PSV مناسبی برخوردارند.

۴- نتیجه گیری

مقاومت مصالح سنگی در برابر صیقلی شدن نقش تعیین کننده‌ای در تأمین بافت ریز روسازی و مقاومت اصطکاکی سطح روسازی دارد. در این مقاله شاخص صیقلی شدن مصالح سنگی، PSV، معرفی و تجهیزات و روش انجام آزمایش به تفصیل توضیح داده شد. همچنین آزمایش PSV روی مصالح سنگی با جنس‌های مختلف از معادن مختلف کشور انجام و نتیجه با حدود مجاز آئین‌نامه‌های موجود مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد مصالح سنگی موجود از PSV نسبتاً مناسبی برخوردارند.

۵- مراجع

1. Scharnigg, K., and Schwalbe G. "Report on knowledge gaps and proposals for further research concerning optimisation for road surfaces and tyres for skid resistance, rolling resistance and noise emissions." *TYROSAFE project.* http://tyrosafe.fehrl.org (2010).
2. Rasmussen, Robert O., et al. "Measuring and analyzing pavement texture." National Concrete Pavement Technology Center, Tech Brief January 2011 (2011).
3. Mataei, Behrouz, et al. "Pavement friction and skid resistance measurement methods: a literature review." Open Journal of Civil Engineering 6.04 (2016): 537.
4. Hall, J. W., et al. "Guide for pavement friction. NCHRP. Web-only document 108. Contractor's final Report NCHRP Project 01-43" Transportation Research Board of the National Academes (2009).
5. Flintsch, G., et al. "Effect of HMA properties on pavement surface characteristics." Pavement Evaluation Conference, 2002, Roanoke, Virginia, USA. (2002).
6. Wang, Linbing, Cristian Druta, and D. Stephen Lane. *Methods for assessing the polishing characteristics of coarse aggregates for use in pavement surface layers*. Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2010.
7. Woodside, A. R., et al. "Possible problems with high PSV aggregate of the gritstone trade group." Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications 13.1 (1998): 159-167.
8. Nicholls, J. Cliff, ed. Asphalt surfacings. CRC Press, 2002.
9. Hall, J. W., et al. "Guide for pavement friction." Final Report for NCHRP Project 1 (2009): 43.
10. Woodward, W. D. H., A. R. Woodside, and J. H. Jellie. "Higher PSV and other aggregate properties." International Surface Friction Conference: roads and runways: improving safety through assessment and design. 2005.