

ارزیابی مقاومت صیقلی سنگدانه‌های رویه راه در ایران

محمود احمدی‌نژاد، 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 شعبانی*، 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

(PSV)

()

واژه‌های کلیدی: مقاومت صیقلی، ارزش صیقلی، سنگدانه، بافت ریز، سنگ کربناته، ماسه‌سنگ، سنگ آذرین

۱. مقدمه

به طور کلی سازوکار اصطکاک و مقاومت در برابر لغزش، تابع دو مؤلفه اصلی، یعنی خصوصیات سطح راه (بافت ریز و بافت درشت) و خصوصیات لاستیک وسیله نقلیه است. بافت سطح راه بر اساس دو پارامتر طول موج و عمق به چهار سطح مختلف به نامهای بافت ریز^۱، بافت درشت^۲، بافت بزرگ^۳ و ناهمواری^۴ طبقه‌بندی می‌شود [ASTM E 867]. بافت ریز به برجستگی و فرورفتگی‌های سطح سنگدانه گفته می‌شود و تابع نوع و جنس سنگدانه است. این بافت، به مرور زمان و بر اثر عبور بار ترافیک از بین رفته و

صیقلی می‌شود [Ergun and Agar, 2000]. میزان توانایی سنگدانه در حفظ بافت ریز، به مقاومت سنگدانه در برابر صیقلی‌شدن بستگی دارد و به کمک شاخصی به نام ارزش صیقلی سنگ (PSV)^۵ اندازه‌گیری می‌شود. در واقع، بافت ریز نشانه‌ای از میزان و درجه صیقلی‌شدن سنگدانه زیر بار ترافیک است [Ergun and Agar, 2000]. با توجه به اینکه در حدود ۹۰ درصد مخلوطهای آسفالتی را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند و در ضمن سطح سنگدانه‌ها به طور مستقیم در تماس با لاستیک چرخ وسایل نقلیه است، بنابراین ارزش صیقلی

صیقلی سنگدانه می‌توان وضعیت بافت ریز و تغییرات آن را بررسی کرد.

۲-۲ شکل

شکل سنگدانه تابع نوع و جنس ذرات تشکیل دهنده سنگ است. هرچه ذرات تشکیل دهنده سنگ سخت‌تر باشد، امکان تیز گوشه بودن سنگ، بیشتر و در نتیجه اصطکاک سطحی آن نیز بیشتر خواهد شد. البته حفظ تیز گوشگی در سنگها بستگی به میزان ترافیک عبوری و جنس ذرات تشکیل دهنده سنگ دارد [NCHRP, 1972].

۲-۳ اندازه

عموماً سنگدانه‌های درشت‌تر نسبت به سنگدانه‌های ریزتر تأثیر بیشتری بر روی مقاومت لغزشی دارند، به علاوه دانه‌بندی باز، به علت امکان خروج سریع‌تر آب در سطح تماس لاستیک و سطح راه، از مقبولیت بیشتری برای تأمین سطوح مقاوم در برابر لغزش برخوردار است [Dahir, 1979].

۲-۴ مقاومت در برابر سایش و صیقلی شدن

برای پدیده صیقلی شدن سنگدانه در زیر بار ترافیک تئوری‌های متفاوتی وجود دارند که معتبرترین این تئوری‌ها عبارتند از: تئوری سایش و تئوری سایش-تغییر شکل. در تئوری اول، پدیده صیقلی شدن صرفاً به دلیل سایش برجستگی‌های بسیار ریز (میکروسکوپی) روی سطح سنگدانه در اثر تماس با لاستیک وسیله نقلیه رخ می‌دهد. ولی در تئوری دوم، پدیده صیقلی شدن متأثر از عمل همزمان سایش برجستگی‌های ریز و تغییر شکل کریستال‌های سطح سنگدانه است [Roe (et. al.), 1998]. وضعیت بافت ریز یک سنگدانه، قبل و بعد از انجام آزمایش صیقل، در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بافت ریز در اثر صیقلی شدن از بین رفته و سطح سنگدانه صاف شده است.

مطالعات نشان داده‌اند که مقاومت سنگدانه در برابر صیقلی شدن، به خصوصیات مانند سختی کانیهای تشکیل دهنده سنگ، تفاوت سختی کانیهای تشکیل دهنده سنگ، تخلخل سنگ، توزیع و پیوند ذرات تشکیل دهنده سنگ بستگی دارد. تفاوت سختی ذرات تشکیل دهنده سنگ باعث ایجاد سطوح شکست متفاوت و در نتیجه ایجاد بافت ریز می‌شود. همچنین اگر ذرات

سنگدانه یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در مقاومت لغزشی سطح راههاست.

دانستن ارزش صیقلی سنگدانه‌هایی که در ساخت رویه راهها استفاده می‌شوند در انتخاب آنها برای قطعه‌های مختلف موجود در طول مسیر راه مانند قوس‌ها، تانژانت‌ها و تقاطع‌ها، به منظور ارتقای ایمنی ترافیک نقش مهم و بسزایی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که ارزش صیقلی سنگها با نوع و جنس آنها ارتباط دارد. بنابراین در این تحقیق که برای اولین بار در کشور ایران انجام گرفته، سعی شده با بررسی جامع و انجام آزمایش‌های لازم بر روی انواع مختلف سنگدانه‌هایی که در ساخت رویه راهها استفاده می‌شوند، رفتار سنگدانه‌ها و مقاومت آنها در برابر صیقلی شدن مورد بررسی قرارگیرد.

۲. ویژگی‌های مؤثر بر اصطکاک

چهار ویژگی مهم سنگدانه‌هایی که در ساخت رویه راهها استفاده می‌شوند و در اصطکاک سطح راه نقش مؤثری دارند عبارتند از: بافت ریز، شکل، اندازه، مقاومت در برابر سایش و صیقلی شدن که در ادامه به اختصار به این ویژگی‌ها پرداخته می‌شود.

[Beaton, 1976]

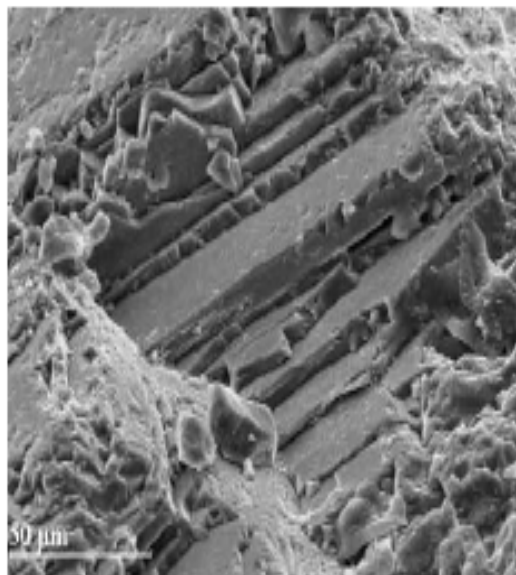
۲-۱ بافت ریز

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، بافت ریز متشکل از برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های بسیار ریز بر روی سطح سنگدانه‌هاست که از شکاف‌ها و جداشدگی‌های بین کانیها ناشی می‌شود. این بافت، میزان زبری^۶ و یا صیقل شدگی سطح سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. نمونه‌ای از بافت ریز ناشی از شکاف کانیها (موسوم به رخ) که توسط دوربین‌های الکترونیکی تصویربرداری شده در شکل (۱) مشاهده می‌شود [Ledee (et. al.), 2005]. این بافت در شرایط هوای بارانی و مرطوب، لایه نازک آب موجود در سطح راه را جذب کرده و باعث درگیری و تماس بیشتر لاستیک با سطح راه می‌شود [Ergun and Agar, 2000].

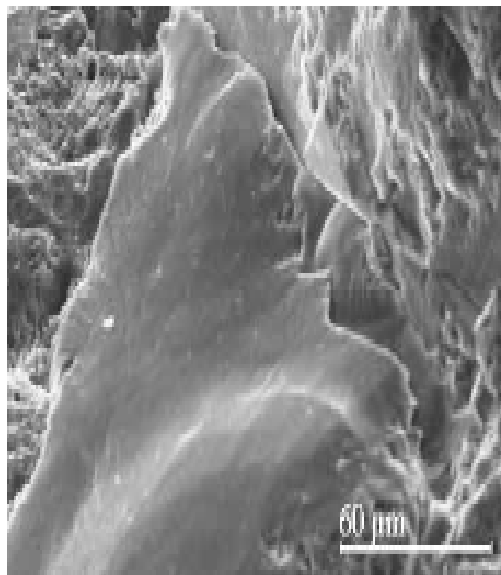
بافت ریز سنگدانه‌ها همیشه و در تمام سرعت‌ها در مقاومت لغزشی سطح راه تأثیر دارد، ولی اثر آن در سرعت‌های کمتر، بیشتر نمایان می‌شود (HD 28/04). هرچه بافت ریز، زبرتر باشد، مقدار مقاومت لغزشی سطح راه بیشتر خواهد بود. اندازه‌گیری بافت ریز کار دشواری است و نیاز به استفاده از ابزار دقیق دارد، اما با انجام آزمایش صیقل و تعیین شاخص ارزش

سنگ‌ها از مقاومت متفاوتی در برابر صیقلی شدن برخوردارند. مقاومت سنگدانه در برابر صیقلی شدن زیر بار ترافیک، به عنوان مهم‌ترین ویژگی آن برای استفاده در آسفالت‌های حفاظتی و لایه‌های رویه راه تشخیص داده شده است [Hosking, 1976].

سخت سنگ با ماتریس نرم‌تر به صورت سست به هم چسبیده باشند، در هنگام عبور ترافیک و عمل صیقلی شدن ممکن است از جای خود کنده شده و باعث تجدید بافت ریز شوند [Roe (et. al.), 1998]. به همین دلیل انواع مختلف

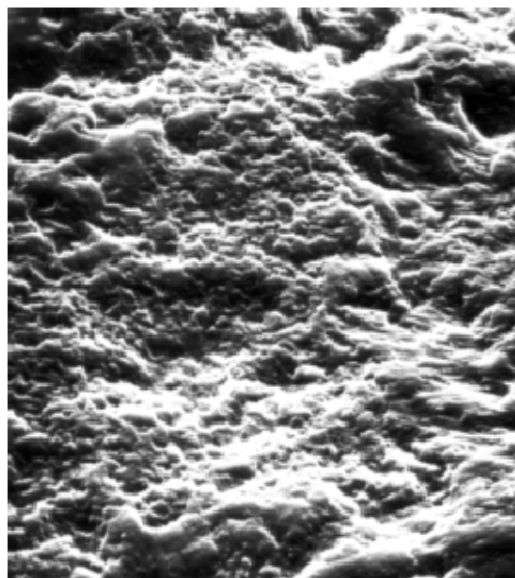


رخ کانی فلدسپات

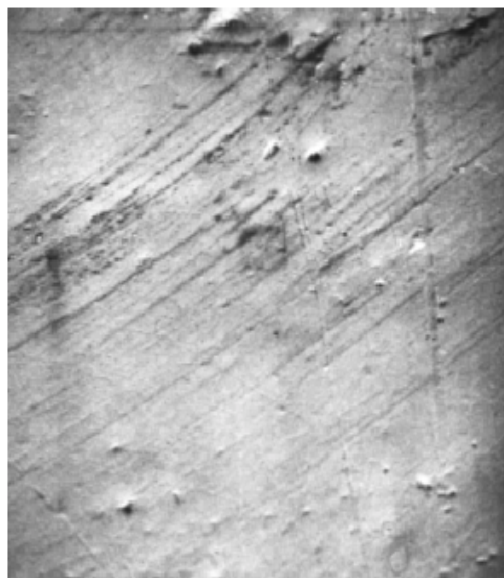


رخ کانی کوارتز

شکل ۱. نمونه‌هایی از بافت ریز ناشی از رخ [Ledee (et. al.), 2005]



صیقل نشده



صیقل شده

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی از سطح سنگدانه قبل و بعد از انجام آزمایش صیقل [Roe (et. al.), 1998]

۳. روش‌های اندازه‌گیری مقاومت صیقلی

سنگدانه

در دهه ۵۰ میلادی، مک لین و شرگلد برای اولین بار دستگاه شتاب‌دهنده صیقل (APM)^۷ را برای ارزیابی خصوصیات سنگدانه‌های مختلف طراحی کردند. این دستگاه به تدریج توسعه پیدا کرد تا روش فعلی ارزیابی مقاومت صیقلی سنگدانه‌ها به صورت استاندارد شده به وجود آمد [Roe (et. al.), 1998]. این روش در حال حاضر به عنوان رایج‌ترین و معتبرترین روش اندازه‌گیری مقاومت سنگدانه‌ها در برابر صیقلی شدن در جهان شناخته می‌شود و در آن از دستگاه شتاب‌دهنده صیقل و آونگ انگلیسی، به صورت توأم استفاده می‌شود. تشریح کامل روش انجام آزمایش، در استانداردهای BS 812، BS-EN1097-8، ASTM D3319 و AASHTO T279 آورده شده است.

روش‌های دیگری نیز طی سال‌های اخیر برای اندازه‌گیری مقاومت صیقلی توسعه یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به روش‌هایی مانند: دستگاه صیقل دهنده با مسیر دوار CTPM^۸ [ASTM E660 1995]، روش آب افکنی (PM)^۹ [Vincent (et. al.), 1999] و [Ledee (et. al.), 2005]، دستگاه W&S^{۱۰} [Ledee (et. al.), 2005]، روش عکس‌برداری از سنگ^{۱۱}، روش درصد فضای خالی متراکم نشده^{۱۲} [Mahmoud, 2005] و روش پسماند غیر قابل حل در سنگدانه کربناته^{۱۳} (ASTMD3042) اشاره کرد. در این تحقیق از روش دستگاه شتاب دهنده صیقل استفاده شده است.

۴. انتخاب نمونه‌های سنگدانه

یکی از جامع‌ترین روش‌های طبقه‌بندی کانی‌شناسی سنگدانه‌هایی که در راهسازی استفاده می‌شوند توسط استاندارد مؤسسه

انگلستان انجام شده است [Hosking, 1992]. بر این اساس، سنگدانه‌ها به ۲۸ گروه تقسیم شده‌اند که جزئیات آن در استاندارد BS812 ارایه گردیده است. چنین طبقه‌بندی بی برای سنگدانه‌ها در آیین‌نامه‌های راه و روسازی ایران آورده نشده و فقط به دو نوع کلی سنگ یعنی آهکی و سیلیسی اشاره شده است. به همین دلیل معادن سنگ مورد استفاده در پروژه‌ها به تعدادی جنس خاص سنگ محدود شده و اطلاعات متنوعی از جنس و ترکیب سنگدانه‌های قابل استفاده در راهسازی و روسازی راه‌ها در اختیار است. همین امر باعث شده تا معادن سنگ مورد استفاده در ساخت رویه‌های راه از تنوع کافی برخوردار نبوده و عمده آنها را سنگهای کربناته (مانند سنگ آهک) تشکیل دهند.

- از طرفی، انتخاب سنگدانه‌ها برای دستیابی به اهداف تحقیق مستلزم تأمین شرایط زیر بودند:
- ۱- شامل گروه‌های مختلف سنگ اعم از رسوبی، آذرین، دگرگونی و مصنوعی باشند،
 - ۲- از نظر مقدار ارزش صیقلی، PSV، دارای تنوع کافی باشند،
 - ۳- دسترسی به آنها از نظر فراوانی و هزینه‌های بهره‌برداری میسر باشد،
 - ۴- نمونه‌های آزمایش از نظر جنس همسان باشند.
- نهایتاً، 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 صیقل قرار گرفتند. لازم به ذکر است که نمونه‌های سنگ رودخانه‌ای به دلیل تأمین نکردن شرط چهارم مورد استفاده قرار نگرفتند. فهرست سنگدانه‌های انتخاب شده در جدول (۱) ارایه شده است.

جدول ۱. فهرست نمونه‌های سنگ آزمایش شده در این تحقیق

ردیف	نام معدن	نوع معدن	جنس سنگ	کد سنگ	استان	شهر
۱	سربندان	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	SI-HAV	تهران	دماوند
۵	اسب چران	کوهی	سنگ آهک	LIM-ASB	تهران	دماوند

ادامه جدول ۱. فهرست نمونه‌های سنگ آزمایش شده در این تحقیق

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	گرانیت 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	آذربایجان	عجب شیر
۱۹	ذوب آهن	سرباره	گابروی دیوریتی	SLG	اصفهان	اصفهان
۲۰		کوهی	بازالت	CLS	انگلستان	

۵. انجام آزمایش صیقل

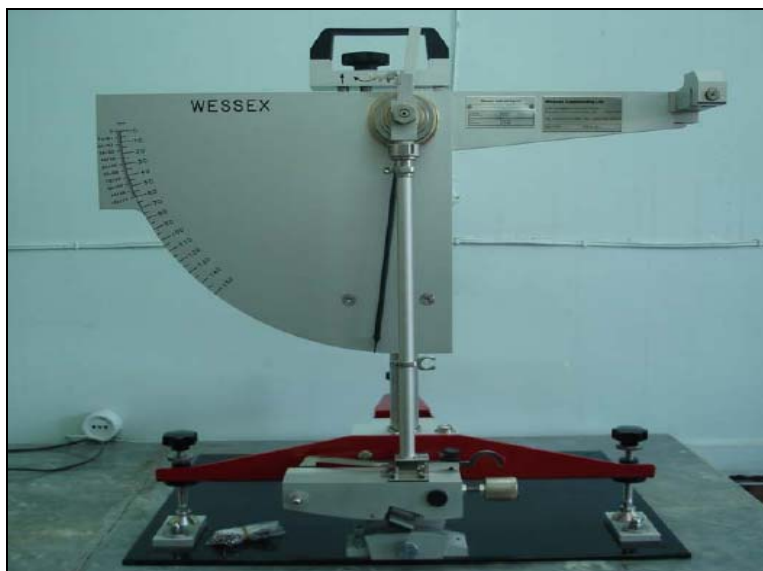
همان‌طور که قبلاً ذکر شد، متداول‌ترین روش انجام آزمایش صیقل، استفاده توأمان از دستگاه شتاب‌دهنده صیقل و آونگ انگلیسی است.

دستگاه شتاب‌دهنده صیقل در دهه ۶۰ میلادی در کشور انگلستان ساخته شد و به تدریج توسعه یافت (شکل ۳-الف). دستگاه آونگ نیز اولین بار توسط پرسبی سیگلر^{۱۴} در دهه ۴۰ میلادی طراحی و ساخته شد و به تدریج توسط آزمایشگاه تحقیقات حمل و نقل انگلستان در دهه ۶۰ میلادی توسعه پیدا کرد (شکل ۳-ب). این دستگاه در اصل برای اندازه‌گیری اصطکاک سطح رویه راهها ساخته شد، ولی به تدریج کاربردهای متنوعی برای آن در نظر گرفته شد [Wessex S885, 2001]. در این آزمایش، قرائت آونگ، قبل و بعد از صیقل دادن نمونه‌های سنگدانه‌ای انجام می‌شود. برای هر بار اجرای آزمایش توسط دستگاه شتاب‌دهنده صیقل،

۶ نمونه سنگ معدنی مختلف مورد نیاز است و از هر نمونه سنگ معدنی، ۲ نمونه آزمایشی (نمونه‌های ساخته شده از رزین) آماده می‌شود که با دو نمونه آزمایشی ساخته شده از سنگ کنترل (سنگ شاخصی که برای تعیین PSV و کالیبراسیون دستگاه شتاب‌دهنده صیقل استفاده می‌شود)، جمعاً ۱۴ نمونه آزمایش روی چرخ دستگاه قرار می‌گیرد. برای تعیین PSV یک سنگ، به دو بار اجرای دستگاه شتاب‌دهنده صیقل نیاز است. هر بار اجرای آزمایش نیز حداقل ۸ ساعت به طول می‌انجامد. ساخت نمونه‌های آزمایش (نمونه‌هایی که به کمک رزین ساخته می‌شوند) یکی از اصلی‌ترین بخش‌های انجام آزمایش صیقل است. تصویر تعدادی از نمونه‌های رزینی آماده شده، در شکل (۴) نشان داده شده است. در این تحقیق، قرائت عدد آونگی (عددی که از انجام آزمایش آونگ انگلیسی روی نمونه‌های آزمایش به دست می‌آید و بیان‌کننده میزان مقاومت سطوح در برابر سر خوردن و لغزیدن اجسام متحرک روی آنها یا همان مقاومت لغزشی است) در ۴

که با عنوان BPNiw یا BPN0 نشان داده شده است،
 ۳- حین انجام آزمایش و پس از ۳ ساعت صیقل دادن به کمک
 پودر سنباده زبر، که با عنوان BPN3 نشان داده شده است،
 ۴- در انتهای آزمایش و پس از ۶ ساعت صیقل دادن، که با عنوان
 BPN6 نشان داده شده است.

مرحله به شرح زیر انجام شد که نتایج آن برای سنگدانه‌های
 مختلف در جدول (۲) ارائه شده است:
 ۱- قبل از شروع آزمایش و برای نمونه‌های صیقل نشده خشک،
 که با عنوان BPNid نشان داده شده است،
 ۲- قبل از شروع آزمایش و برای نمونه‌های صیقل نشده خیس،



۳- ب



۳- الف

شکل ۳. نمایی از دستگاه شتاب‌دهنده صیقل (الف) و آونگ انگلیسی (ب)



شکل ۴. نمونه‌های رزینی آماده شده برای آزمایش صیقل

جدول ۲. مقادیر عدد آونگی سنگدانه‌ها در مراحل انجام آزمایش صیقل

ردیف	کد سنگ	BPNid	BPNiw(BPN0)	BPN3	BPN6	PSV
۱	LIM-SARB	۸۳/۲۵	۵۰/۶۷	۵۲/۵۸	۴۳/۳	۳۵
۲	LIM-ASB	۷۵/۰۸	۵۶/۶۷	۵۴/۵۴	۳۵/۹	۳۶/۳
۳	LIM-TOY	۷۶/۴۲	۵۲/۸۳	۵۲/۵۸	۳۹	۳۹
۴	LIM-ABD1	۷۵/۳۳	۴۸/۳۳	۵۳/۳۳	۳۹/۳	۳۹/۳
۵	LIM-ABD2	۶۹/۸۳	۵۷/۸۳	۵۹/۳۳	۴۴/۵	۴۴/۵
۶	LIM-ABD3	۷۶/۵	۵۲/۷۵	۶۱/۰	۴۶/۳	۴۶/۳
۷	LIM-ABD4	۷۴/۱۷	۵۰/۵	۵۲/۰۸	۳۶	۳۶
۸	LIM-DAM	۷۷/۸۳	۶۰/۸۳	۵۲/۹۲	۴۰	۴۱/۲
۹	TR-KOH	۸۴/۵	۶۲/۴۲	۵۸/۲۹	۴۰/۹	۴۱/۶
۱۰	SI-HAV	۹۰	۶۶/۰۸	۷۰/۵	۶۱/۵	۶۲/۷
۱۱	SAND-SAR1	۸۵/۸۳	۷۵/۴۲	۷۶/۶۷	۶۷/۵	۶۷/۵
۱۲	SAND-SAR2	۸۳	۷۴/۵	۷۶/۹۲	۶۷/۵	۶۷/۵
۱۳	SAND-SAR3	۸۹/۶۷	۷۸/۹۲	۸۲	۷۰/۳	۷۰/۳
۱۴	TUFF-ALI	۸۹/۰۸	۷۸/۹۲	۷۹/۱۷	۶۵/۸	۶۵/۸
۱۵	GR-KHA	۸۵/۴۲	۶۹/۷۵	۶۶/۹۲	۵۶	۵۷/۲
۱۶	GAB-CHE	۸۲/۵	۶۸/۵۸	۶۲	۵۳	۵۴/۲
۱۷	ANZ-SHR	۸۲/۳۳	۶۵/۲۵	۶۳/۶۷	۵۳	۵۴/۲
۱۸	BAZ-AJB	۸۲/۰۸	۶۳	۶۱/۱۷	۵۲	۵۳/۲
۱۹	CLS	۸۰/۷۵	۶۲/۵۷	۶۲/۱۷	۵۲	۵۲
۲۰	SLG	۸۰/۳۴	۶۳/۷۱	۵۵/۷۱	۵۲/۷	۵۲/۷

۶. بحث و بررسی داده‌های حاصل از آزمایش

در این بخش نتایج حاصل از بررسی و تحلیل داده‌های آزمایش جدول (۲) برای گروه‌های مختلف سنگ ارایه شده است.

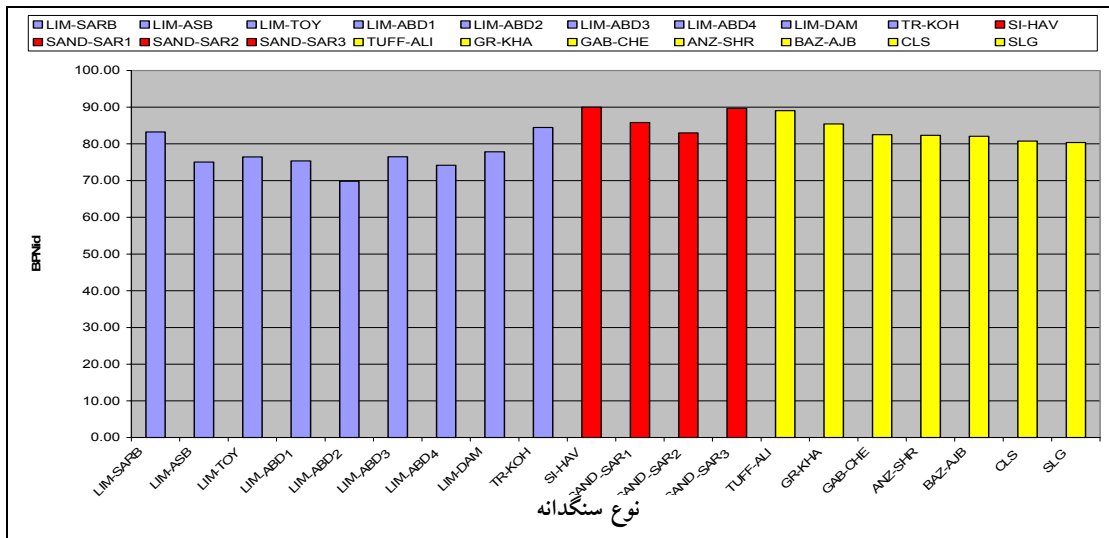
۶-۱- نمودار شکل (۵)، عدد آونگی سنگدانه‌های شکسته را که هنوز صیقل داده نشده‌اند، در حالت خشک برای گروه‌های مختلف سنگ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ماسه‌سنگها با میانگین عدد ۸۷ بیشترین مقاومت لغزشی را دارند. سنگهای آذرین با میانگین ۸۴ و سنگهای کربناته که عمدتاً از نوع سنگ آهکی هستند با میانگین ۷۷ در مراتب بعدی قرار دارند.

۶-۲- نمودار شکل (۶) عدد آونگی سنگدانه‌های صیقل نشده را در حالت خیس و قبل از شروع آزمایش صیقل نشان می‌دهد. این عدد در واقع همان مقاومت لغزشی اولیه سنگدانه محسوب شده و با عنوان BPN0 نامگذاری شده است. براساس آنچه که مشاهده می‌شود ماسه‌سنگها با میانگین عدد ۷۴ بیشترین مقاومت لغزشی را دارند. سنگهای آذرین با میانگین ۶۸ و سنگهای

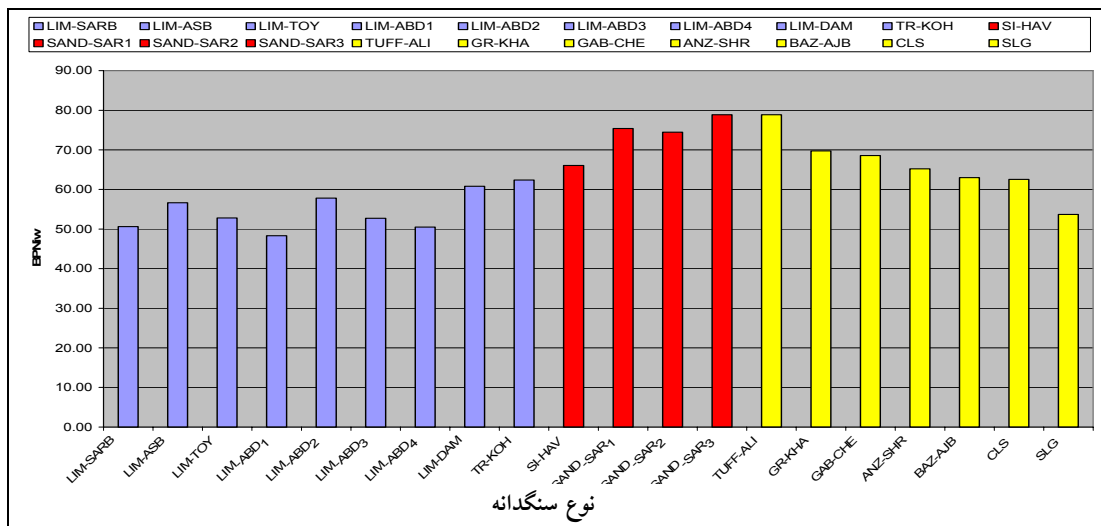
کربناته که عمدتاً از نوع سنگ آهکی هستند با میانگین ۵۵ در مراتب بعدی قرار دارند.

۶-۳- با مقایسه نمودارهای (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که رطوبت و خیسی باعث کاهش قابل توجه مقاومت لغزشی سنگدانه می‌شود. سنگهای آهکی با میانگین ۲۲ واحد کاهش دارای بیشترین مقدار افت مقاومت لغزشی هستند و سپس گروه سنگهای آذرین با میانگین ۱۶ واحد کاهش و گروه ماسه‌سنگها با میانگین ۱۳ واحد کاهش قرار دارند. بنابراین می‌توان استنباط کرد که مقاومت لغزشی در اثر خیس شدن سطح راه حدود ۱۵ درصد برای مخلوطهای ماسه‌سنگی، ۱۹ درصد برای مخلوطهای آذرین و ۳۰ درصد برای مخلوطهای آهکی کاهش می‌یابد.

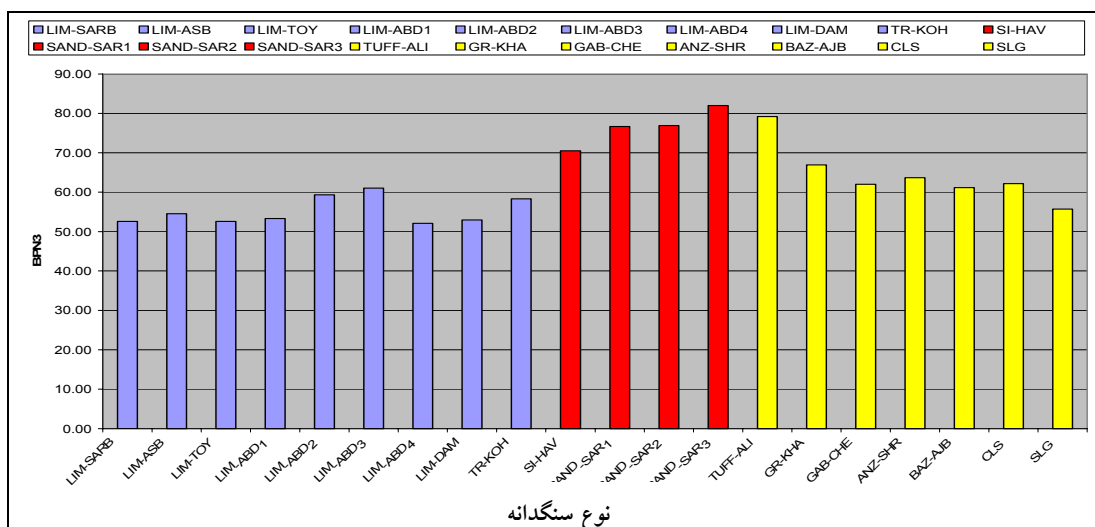
۶-۴- نمودار شکل (۷)، عدد آونگی سنگدانه‌ها را پس از آنکه به مدت ۳ ساعت با دستگاه شتاب‌دهنده صیقل و با استفاده از پودر سنباده زیر تحت آزمایش صیقل قرار گرفتند نشان می‌دهد. مقایسه اعداد نمودار (۷) با نمودار (۶) حاکی از رفتارهای مختلف گروههای سنگ است که در ادامه تشریح شده است.



شکل ۵. عدد آونگی سنگدانه‌های صیقل داده نشده در حالت خشک (BPNid)



شکل ۶. عدد آونگی سنگدانه‌های صیقل داده نشده در حالت خیس (BPNiw یا BPN0)



شکل ۷. عدد آونگی سنگدانه‌ها پس از ۳ ساعت صیقل دادن با استفاده از بودر سنباده زیر (BPN3)

سنباده زبر (پودر مخصوص دستگاه شتاب دهنده صیقل) از ذرات درشت و سخت تشکیل شده است، بنابراین در تماس با سطح سنگدانه‌های گروه ماسه سنگ باعث جدا شدن ذرات سست ماتریس سنگدانه (مانند کلسیت، گلوکونیت، اکسید آهن و...) شده و با ایجاد فاصله و شکاف بین ذرات سخت‌تر (کوارتز و فلدسپات) پدیده احیا و تجدید بافت ریز رخ می‌دهد. بنابراین عدد آونگی در این گروه از سنگها پس از ۳ ساعت قرار گرفتن تحت آزمایش صیقل با پودر زبر نه تنها کاهش نمی‌یابد، بلکه به دلیل زبر شدن سطح سنگدانه، افزایش نیز پیدا می‌کند.

ج- سنگدانه‌های متشکل از کانیهای نرم که در ماتریس نرم به صورت نه چندان محکم به یکدیگر پیوند خورده‌اند، مانند اغلب سنگهای کربناته و آهکی. تفاوت سختی ذرات تشکیل دهنده سنگ در این گروه از سنگها بسیار کم است و معمولاً خاصیت تجدید بافت ریز را ندارند. در صورت وجود ذرات سخت‌تر در ترکیب سنگ، امکان رخداد پدیده تجدید بافت ریز در این گروه از سنگها وجود دارد.

۶-۵- نمودار شکل (۸) عدد آونگی سنگدانه‌ها را پس از ۶ ساعت قرار گرفتن تحت آزمایش صیقل (۳ ساعت پودر سنباده زبر و ۳ ساعت پودر سنباده نرم) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تمام گروههای سنگ با افت عدد آونگی همراه هستند. میانگین عدد آونگی بعد از ۶ ساعت برای گروه سنگ آهک برابر ۴۰، برای آذرین ۵۶ و برای ماسه‌سنگها حدود ۶۷ به دست آمد.

۶-۶- روند کاهش عدد آونگی در مدت ۶ ساعت آزمایش صیقل برای ۴ نمونه آزمایشی، شامل ۲ نمونه از گروه سنگهای کربناته، یک نمونه از گروه ماسه‌سنگها و یک نمونه از گروه آذرین به ترتیب در شکل‌های (۹) تا (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بخش اعظم صیقلی شدن سنگدانه‌ها در ۳ ساعت دوم آزمایش رخ می‌دهد. شیب خط برازش شده بر نقاط آزمایش، بیان کننده میزان شتاب صیقلی شدن سنگدانه‌هاست. بر این اساس، سرعت صیقل یافتن سنگها به ترتیب زیر است: گروه سنگهای کربناته، آذرین و ماسه‌سنگها. همچنین با مقایسه ضرایب همبستگی معادلات خطی برازش شده می‌توان نتیجه گرفت که روند صیقلی شدن گروه سنگهای آذرین با تقریب زیادی (ضریب همبستگی ۰/۷۵ تا ۱) از رابطه خطی تبعیت می‌کند. این موضوع در مورد سنگهای آهکی و مخصوصاً گروه ماسه‌سنگها مصداق ندارد.

در گروه سنگهای آهکی، عدد آونگی برخی از سنگها مانند سنگ آهک معدن عبدال آباد، افزایش یافته و برای برخی از سنگها مانند تراورتن و سنگ آهک معدن دامغان، کاهش یافته‌اند. در مجموع، میانگین عدد آونگی گروه سنگهای کربناته پس از ۳ ساعت صیقل دادن نسبت به قبل از شروع آزمایش (حالت صیقل داده نشده) ثابت باقی مانده است (عدد ۵۵).

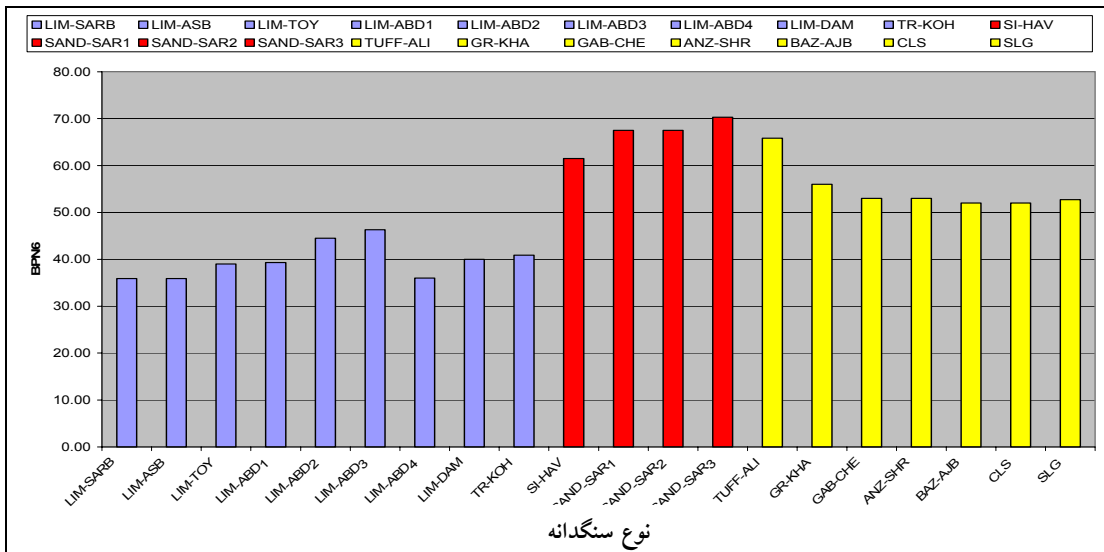
در گروه سنگهای آذرین ملاحظه می‌شود که عدد آونگی تمامی نمونه‌ها کاهش یافته است، به طوری که عدد میانگین این گروه از سنگها حدود ۲ واحد کاهش (عدد ۶۶) را نسبت به میانگین حالت صیقل داده نشده (عدد ۶۸) نشان می‌دهد.

در گروه ماسه‌سنگها بر عکس گروه آذرین ملاحظه می‌شود که عدد آونگی کلیه نمونه‌ها افزایش یافته است، به طوری که میانگین عدد آونگی این گروه پس از ۳ ساعت صیقل دادن با استفاده از پودر زبر حدود ۲ واحد افزایش (عدد ۷۶) را نسبت به میانگین عدد آونگی حالت صیقل داده نشده نشان می‌دهد. بررسی این پدیده برای گروههای مختلف سنگ نیاز به پژوهش تکمیلی دارد ولی علت کلی این پدیده‌های رفتاری را بر اساس نتایج تحقیقات اشاره شده در بند ۲ این مقاله می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

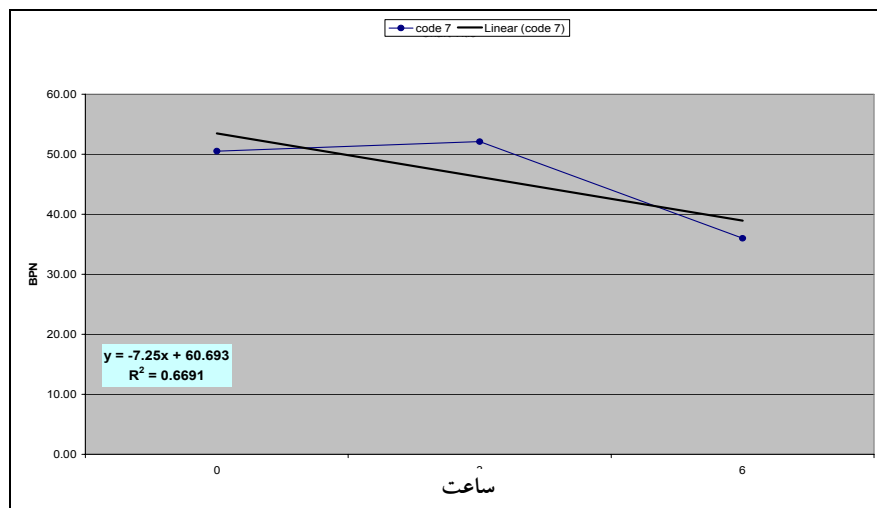
همان‌طور که قبلاً در این مقاله اشاره شد، تفاوت سختی ذرات تشکیل دهنده سنگ باعث ایجاد سطوح متفاوت شکست و در نتیجه ایجاد بافت ریز می‌گردد. همچنین اگر ذرات سخت سنگ با ماتریس نرم‌تر به صورت سست به هم چسبیده باشند در اثر صیقل ناشی از عبور ترافیک ممکن است از جای خود کنده شده و پدیده تجدید بافت ریز رخ دهد [Roe (et. al.), 1998]. به این ترتیب برای گروههای مختلف سنگ می‌توان سه ساختار کلی زیر را در نظر گرفت:

الف- سنگدانه‌های متشکل از کانیهای سخت که در ماتریس سخت قرار گرفته و به صورت محکم به یکدیگر پیوند خورده‌اند، مانند اغلب سنگهای آذرین. در این گروه از سنگها تفاوت سختی ذرات تشکیل دهنده سنگ نیز بسیار کم است، بنابراین، این سنگها خاصیت خوداحیایی و تجدید بافت ریز را ندارند. به همین دلیل عدد آونگی این گروه از سنگها پس از ۳ ساعت قرار گرفتن تحت آزمایش صیقل با پودر زبر کاهش می‌یابد.

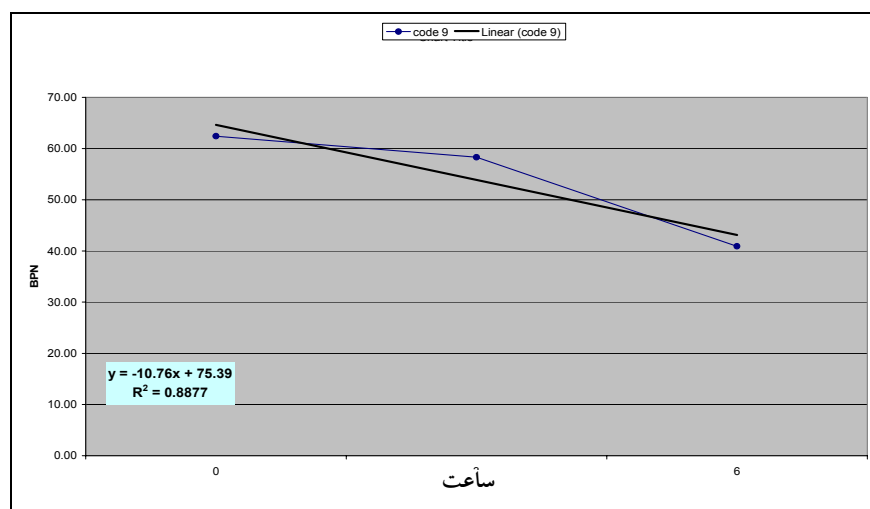
ب- سنگدانه‌های متشکل از کانیهای سخت که در ماتریس نرم قرار گرفته و با پیوند ضعیف به یکدیگر متصل شده‌اند، مانند اغلب ماسه‌سنگها. این گروه از سنگها دارای خاصیت خوداحیایی و تجدید بافت ریز هستند. با توجه به اینکه پودر



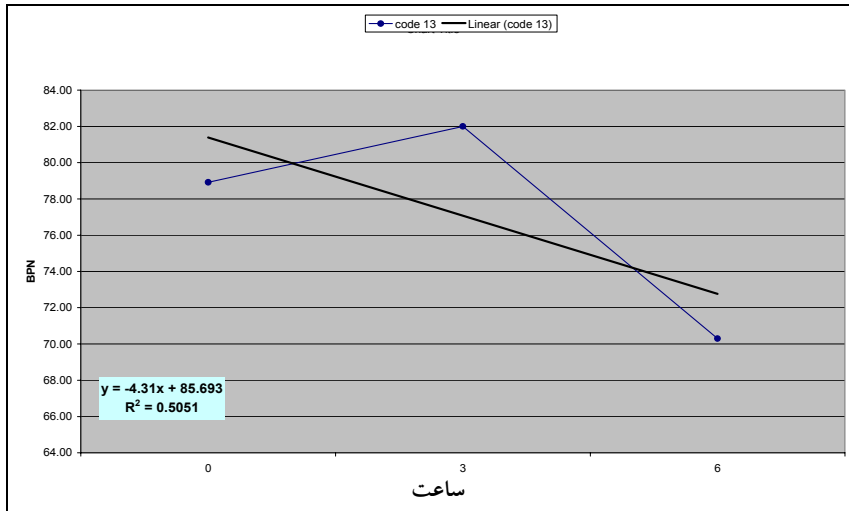
شکل ۸. عدد آونگی سنگدانه‌ها پس از ۶ ساعت صیقل دادن (۳ ساعت پودر سنباده زبر + ۳ ساعت پودر سنباده نرم) (BPN6)



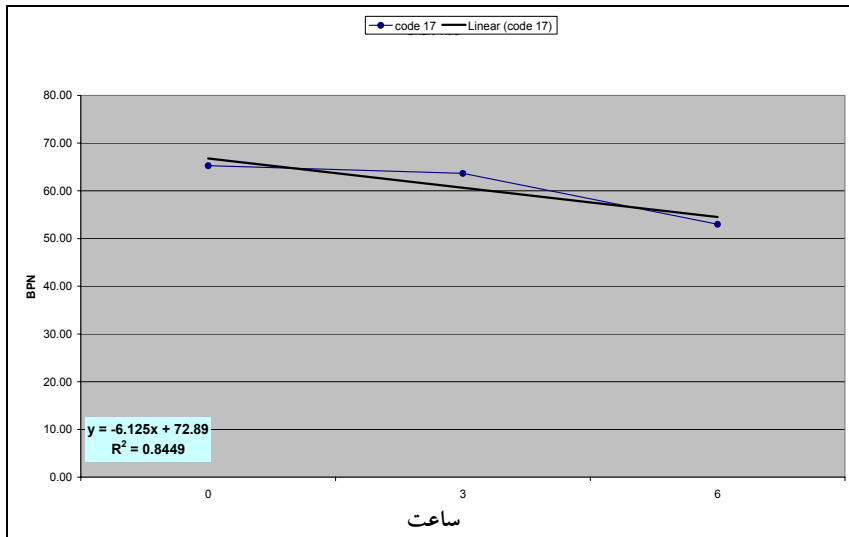
شکل ۹. روند کاهش عدد آونگی طی آزمایش صیقل برای سنگ آهک LIM-ABD4



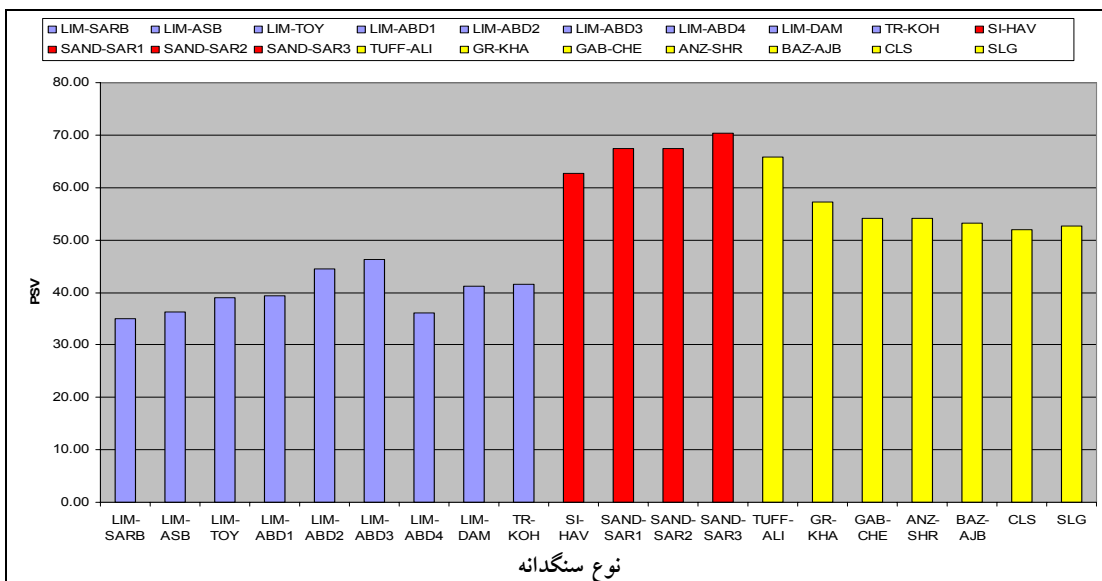
شکل ۱۰. روند کاهش عدد آونگی طی آزمایش صیقل برای تراورتن TR-KOH



شکل ۱۱. روند کاهش عدد آونگی طی آزمایش صیقل برای ماسه سنگ SAND-SAR3



شکل ۱۲. روند کاهش عدد آونگی طی آزمایش صیقل برای بازالت آندزیتی ANZ-SHR



شکل ۱۳. مقادیر ارزش صیقلی سنگ (psv) برای سنگدانه‌های مختلف

کانیهای تشکیل دهنده آن و ناتوانی در حفظ بافت اولیه، پس از انجام آزمایش صیقل بافت شدیدی مواجه شده و مقدار عدد آونگی آن که معیاری از وضعیت بافت ریز آن است نیز بسیار کم می‌شود. بالعکس، ممکن است سنگدانه‌ای در حالت صیقل نشده از عدد آونگی بالایی برخوردار نباشد و پس از انجام آزمایش نیز شرایط اولیه خود را تا حدودی حفظ کرده و دچار افت زیاد نشود.

$$\Delta BPN = BPN_0 - BPN_6 \quad (1)$$

با مقایسه نمودارهای (۸) و (۶) می‌توان میزان افت عدد آونگی (ΔBPN) را در پایان آزمایش صیقل به دست آورد که نتیجه آن در نمودار شکل (۱۴) نمایش داده شده است. بر این اساس حداکثر افت عدد آونگی با میانگین ۱۵ واحد کاهش، متعلق به گروه سنگهای آهکی و کمترین آن با میانگین ۷ واحد کاهش متعلق به گروه ماسه‌سنگ هاست.

۲-۷ نرخ کاهش عدد آونگی (PRR)

این متغیر که در این تحقیق با عنوان مخفف PRR معرفی شده است طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود و تفاوت عمده آن با متغیر ΔBPN در این است که به جای اختلاف مطلق اعداد لغزش، قبل و بعد از انجام آزمایش، میزان شیب تغییرات عدد آونگی که همان سرعت صیقلی شدن و از بین رفتن بافت ریز است را بیان می‌کند. در رابطه (۲)، متغیر BPN_0 همان مقاومت لغزشی اولیه سنگدانه در حالت خیس و صیقل نشده است که قبلاً شرح آن ارائه شد. هرچه PRR سنگدانه بیشتر باشد سرعت اضمحلال بافت ریز برای آن سنگدانه بیشتر است.

$$PRR = \frac{\Delta BPN}{BPN_0} \quad (2)$$

۸. ارتباط ارزش صیقلی با متغیرهای

ΔBPN و PRR

قبل از بررسی رابطه بین ارزش صیقلی سنگدانه با متغیرهای مذکور، نرمال بودن متغیرها مورد آزمون قرار می‌گیرد.

۸-۱ کنترل نرمال بودن داده‌ها

برای کنترل نرمال بودن داده‌ها از آزمون فرض صفر استفاده شده است. در این آزمون فرض صفر را بر نرمال بودن قرار داده و سطح اطمینان، ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. به این ترتیب چنان که مقدار p-value بیشتر از ۰/۰۵ شود فرض H_0 یعنی

۶-۷- نمودار شکل (۱۳) میزان ارزش صیقلی سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. حدود ارزش صیقلی برای گروه سنگهای رسوبی-شیمیایی (کربناته و آهکی) بین ۳۵ تا ۶۶، برای گروه سنگهای آذرین بین ۵۲ تا ۶۶ و برای گروه ماسه‌سنگها بین ۶۲ تا ۷۰ به دست آمد. بررسی‌ها نشان دادند که وجود تخلخل و کانیهای سخت باعث افزایش ارزش صیقلی در سنگهای آهکی می‌شود. این موضوع برای تراورتن کهنک (TR-KOH) و سنگ آهک دامغان (LIM-DAM) صادق است. بازالت کمترین مقدار و سنگ توف که نوعی سنگ آذرآواری است بیشترین مقدار ارزش صیقلی را در گروه سنگهای آذرین به خود اختصاص می‌دهند. ارزش صیقلی سنگدانه پارامتری است که به منظور تأمین ایمنی ترافیک در طراحی رویه راهها باید مد نظر قرار گیرد و انتخاب سنگدانه بر این اساس انجام پذیرد. به همین دلیل معمولاً مقادیر حداقلی برای ارزش صیقلی سنگدانه با توجه به نوع راه، حجم ترافیک و شرایط هندسی محل در آیین‌نامه‌ها مشخص شده است که به عنوان نمونه می‌توان به آیین‌نامه طراحی راه و پل انگلستان (HD36/06) که در این زمینه پیشرو است اشاره کرد. معمولاً سنگدانه‌های با ارزش صیقلی بیش از ۶۰ (مانند ماسه‌سنگها) را سنگدانه‌های با ارزش صیقلی زیاد، بیش از ۵۰ و کمتر از ۶۰ (مانند سنگهای آذرین) را سنگدانه‌های با ارزش صیقلی متوسط و کمتر از ۵۰ (مانند سنگهای آهکی) را سنگدانه‌های با ارزش صیقلی کم می‌نامند. سنگدانه‌های با ارزش صیقلی زیاد را باید برای رویه راههای واقع در مکان‌های پرخطر مانند قوس‌ها، شیب‌ها و تقاطع‌ها مورد استفاده قرار داد.

۷. توانایی سنگدانه در حفظ بافت ریز

مقدار ارزش صیقلی سنگدانه، به تنهایی شاخص مناسبی برای بیان میزان توانایی سنگدانه در حفظ بافت ریز نیست. برای این منظور لازم است از وضعیت عدد آونگی سنگدانه، قبل (صیقل نشده) و بعد (صیقل یافته) از آزمایش صیقل آگاهی حاصل شود. این مطلب اولین بار در تحقیقی توسط لانسیری در دانشگاه پیزای ایتالیا و با تعریف دو متغیر به شرح زیر بیان شد [Ancieri (et. al.), 2005]:

۷-۱ اختلاف عدد آونگی قبل و بعد از آزمایش صیقل (ΔBPN)

این متغیر با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود. یک سنگدانه ممکن است در حالت صیقل نشده با برخورداری از بافت ریز مناسب دارای عدد آونگی بالایی باشد، ولی با توجه به ماهیت

با PRR دارای خطای زیادی است. شکل (۱۶) نمودار خطی مورد نظر را نشان می‌دهد.

۳-۸ رابطه بین PSV با ΔBPN

با انجام تحلیل رگرسیون خطی در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ و بررسی نتایج حاصل به کمک جدول تحلیل واریانس، مقدار P-Value مدل خطی برابر ۰/۰۰۷ و کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد. در نتیجه ارتباط معنی‌دار بین متغیرها مورد تأیید قرار گرفت، ولی ضریب همبستگی بین آنها (۳۳/۴٪) نشان داد که رابطه خطی قابل قبولی بین متغیرها برقرار است. این موضوع تا حدود زیادی قابل پیش‌بینی بود، یعنی کم یا زیاد بودن مقدار ارزش صیقلی با قابلیت سنگدانه در حفظ بافت ریز ارتباط مشخصی ندارد. به طور مثال ماسه‌سنگ SAND-SAR3 با وجود اینکه دارای ارزش صیقلی بیشتری نسبت به ماسه‌سنگ سیلیسی SI-HAV است، ولی مقدار افت عدد آونگی آن بیشتر است. همچنین در گروه سنگهای آذرین نیز با اینکه ارزش صیقلی گابرو از سرباره بیشتر است، مقدار افت عدد آونگی آن بیشتر است.

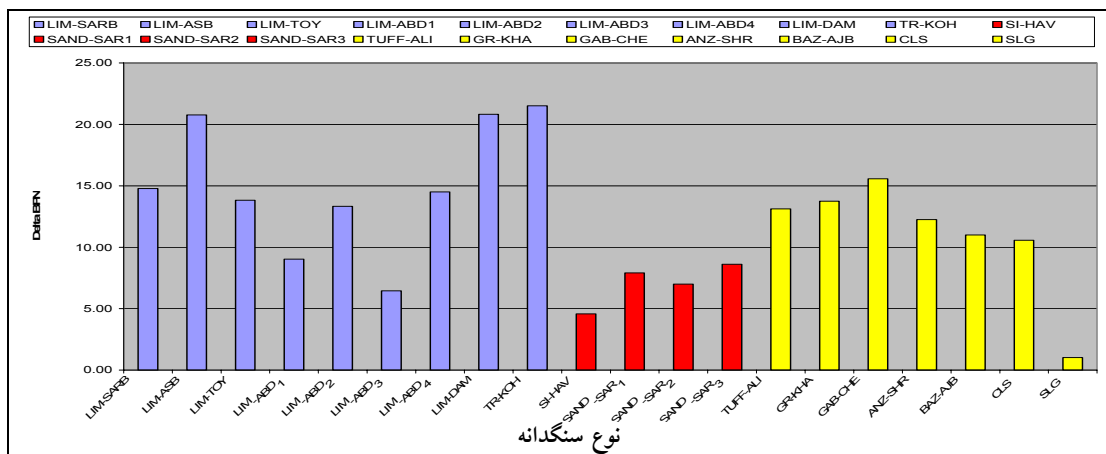
نرمال بودن پذیرفته می‌شود. آزمون نرمالیتیه برای هر یک از متغیرهای PSV، ΔBPN و PRR به کمک نرم‌افزار انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول (۳) ارایه شده است. شکل (۱۵) هیستوگرام نرمال مقادیر ارزش صیقلی را نشان می‌دهد.

۲-۸ رابطه بین PSV و PRR

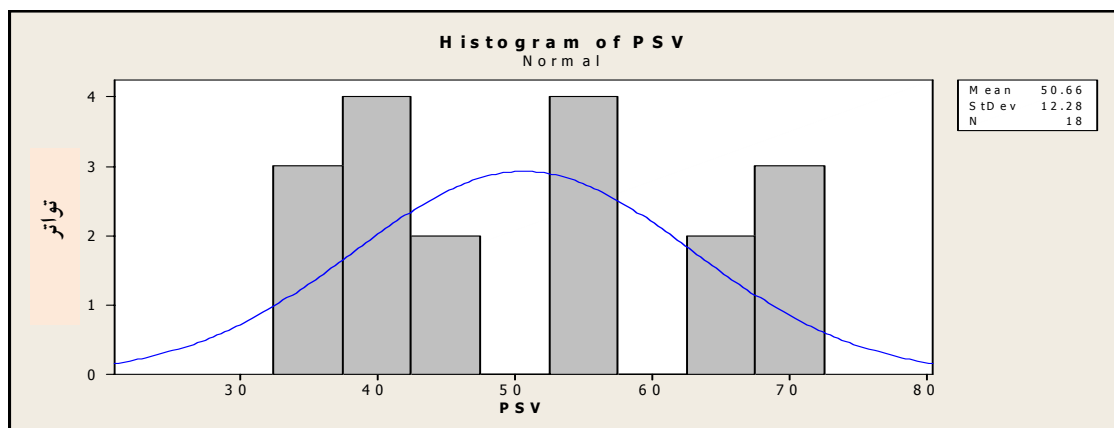
برای بیان رابطه بین متغیرهای مذکور از تحلیل رگرسیون خطی در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ درصد به کمک نرم‌افزار Minitab بهره گرفته شد. نتایج، با روش تحلیل واریانس (ANOVA) و ضریب همبستگی پیرسون مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. به این ترتیب ارتباط خطی به شرح رابطه (۳) با ضریب همبستگی R- $Sq(adj) = 64.7\%$ به دست آمد.

$$PSV = 73.28 - 107.2PRR \quad (3)$$

مقدار P-Value برای متغیرهای مستقل و پاسخ در حد صفر به دست آمد که این به معنی تأیید رابطه معنی‌دار و قابل قبول بین متغیرها با ضریب اطمینان نزدیک به ۱۰۰ درصد است، ولی مقدار ضریب همبستگی به دست آمده نشان می‌دهد که پیش‌بینی PSV



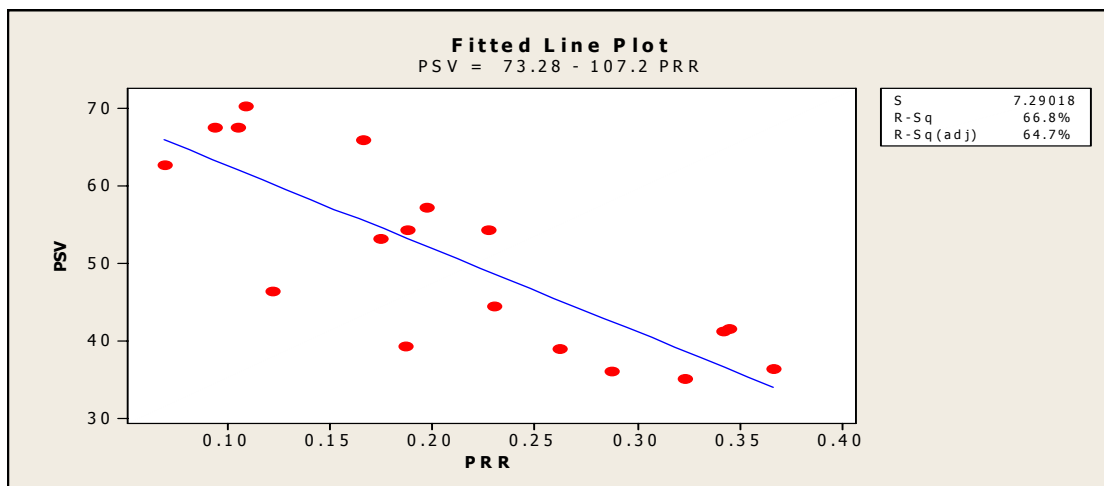
شکل ۱۴. اختلاف عدد آونگی قبل و بعد از انجام آزمایش صیقل (ΔBPN) برای سنگدانه‌های مختلف



شکل ۱۵. هیستوگرام نرمال مقادیر ارزش صیقلی سنگدانه‌ها

جدول ۳. نتایج آزمون نرمالیت متغیرها

متغیر	مقدار P-Value	نتیجه آزمون نرمال
ΔBPN	۰.۰۵۶	نرمال است
PRR	۰.۰۴۹۲	نرمال است
PSV	۰.۱۰۸	نرمال است



شکل ۱۶. نمودار خطی بین متغیرهای PRR و PSV

۹. نتیجه گیری

ارزیابی نسبتاً جامعی که بر روی خصوصیات صیقل پذیری سنگدانه‌های مختلف انجام پذیرفت نتایج متعدد و قابل توجهی داشت که خلاصه آنها در ادامه ارائه می‌شود:

انواع مختلف سنگها به دلیل تفاوت در نوع و سختی ذرات تشکیل دهنده و همچنین نوع ترکیب و پیوند ذرات به یکدیگر مقاومت‌های متفاوتی در برابر صیقلی شدن دارند. حدود ارزش صیقلی برای گروه سنگهای آذرین بین ۵۲ تا ۶۶ و برای گروه ماسه‌سنگها بین ۶۲ تا ۷۰ به دست آمد. وجود تخلخل و کانیهای سخت باعث افزایش ارزش صیقلی در سنگهای آهکی می‌شود. این موضوع در نمونه‌های تراورتن (TR-KOH) و سنگ آهک دامغان (LIM-DAM) مشاهده شد. در گروه سنگهای آذرین کمترین مقدار ارزش صیقلی برای بازالت و بیشترین مقدار برای سنگ توف، نوعی سنگ آذر آواری، حاصل شد. برخی از سنگدانه‌ها با وجود سایش ناشی از عامل ساینده، به جای اضمحلال بافت ریز دارای خاصیت احیای بافت ریز هستند، مانند ماسه‌سنگ سرسلطان و برخی از سنگهای کربناته مانند سنگ آهک معدن عبدال آباد. علت این موضوع به ماهیت کانیهای تشکیل دهنده سنگ و حضور ذرات سخت در ماتریس نرم

بر می‌گردد. در آزمایش صیقل، بخش اعظم صیقلی شدن سنگدانه‌ها در ۳ ساعت دوم آزمایش رخ می‌دهد. همچنین مشخص شد که روند صیقلی شدن گروه سنگهای آذرین از رابطه خطی با شیب منفی تبعیت می‌کند، در حالی که این موضوع برای گروههای دیگر سنگها صادق نیست. مقاومت لغزشی در اثر خیس شدن سطح راه حدود ۱۵ درصد برای مخلوطهای ماسه سنگی، ۱۹ درصد برای مخلوطهای آذرین و ۳۰ درصد برای مخلوطهای آهکی کاهش می‌یابد. مقدار ارزش صیقلی سنگدانه، به تنهایی شاخص مناسبی برای تشخیص میزان توانایی سنگدانه در حفظ بافت ریز نیست.

برای این منظور دو متغیر اختلاف عدد آونگی، قبل و بعد از انجام آزمایش صیقل و نرخ کاهش عدد آونگی مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس حداکثر افت عدد آونگی با میانگین ۱۵ واحد کاهش، متعلق به گروه سنگهای آهکی و کمترین آن با میانگین ۷ واحد کاهش متعلق به گروه ماسه‌سنگهاست. همچنین مشخص شد که بین ارزش صیقلی و نرخ کاهش عدد آونگی رابطه خطی ضعیفی با ضریب همبستگی ۰/۶۴/۷ و شیب منفی برقرار است، به طوری که هرچه سرعت اضمحلال بافت ریز در سنگدانه بیشتر باشد، مقدار ارزش صیقلی آن کمتر است. از طرفی بین ارزش صیقلی با اختلاف عدد آونگی قبل و بعد از انجام آزمایش صیقل هیچگونه رابطه معنی‌داری برقرار نیست.

TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 39-50.

- British Standards Institution (1989) "Method for determination of polished stone value (PSV)", BS 812: Part 114, London.

- Dahir, S. H. (1976) "A review of aggregate selection criteria for improved wear resistance and skid resistance of bituminous surfaces", Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 7, No. 5, Sep. p. 245.

- Ergun, M. and Agar, E. (2000) "Optimization of road surface friction from macro and micro texture point of view", PIARC, IVth International Symposium, , Nantes, France.

- HD 28/04(DMRB 7.3.1) "Skid resistance"

- HD 36/06(DMRB 7.5.1) "Surfacing materials for new and maintenance construction"

- Hosking, J.R.(1976) "Aggregates for skid resistant roads", Report 693, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, United Kingdom.

- Lancieri F., Losa M. and Marradi, A. (2005) "Resistance to polishing and mechanical properties of aggregates for asphalt concrete wearing courses", 3rd International SIIV Congress, Proceedings, Volume 4, pp.162-178, Bari, Italy.

- Ledee, V., Delalande, G. and Dupont, P. (2005) "Skid resistance and aggregates", Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussees, 255, April, May, June.

- Mahmoud, E. M. (2005) "Development of experimental methods for evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage", A thesis submitted to The Office of Graduate Studies of Texas A & M University for the degree of Master of Science.

- National Cooperative Research Program (NCHRP) (1972) "Synthesis of highway practice", NCHRP Synthesis 14, project 20- 5 FY' 70.

- Roe, P.G. and Hartshorne, S.A. (1998) "The polished stone value of aggregates and in-service skidding resistance", TRL Report 322, Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.

-Vincent, C. Janoo and Charles, Korhonen (1999) "Performance testing of hot, mix asphalt aggregates", Special Report 99-20, US Army Corps of Engineers, December 1999.

- Wessex Engineering Ltd. (2001) "Skid Tester; Operating Instructions, Version 4.0", S885Wessex.

1. Microtexture
2. Macrottexture
3. Megattexture
4. Unevenness
5. Polished Stone Value
6. Harsh
7. Accelerated Polishing Machine
8. Circular Track Polishing Machine
9. Projection Method
10. Wehner & Shulze Machine
11. Aggregate Imaging System
12. Uncompacted Voids Content
13. Insoluble Residue in Carbonate Aggregate
14. Percy Sigler

۱۱. مراجع

- ASTM: D3042-03 (2007) "Test method for insoluble residue in carbonate aggregates", Book of ASTM Standards, Volume 04.03: Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, ASTM International, West Conshohocken, United States.

- ASTM: D3319-06, (2007) "Test method for accelerated polishing of aggregates using the British Wheel", Book of ASTM Standards, Volume 04.03: Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, ASTM International, West Conshohocken, United States.

- ASTM: E303-93, (2007) "Test method for measuring surface frictional properties using the British Pendulum Tester", Book of ASTM Standards, Volume 04.03: Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, ASTM International, West Conshohocken, United States.

- ASTM-E660-90, (2007) "Standard practice for accelerated polishing of aggregates or pavement surfaces using a small wheel circular track polishing machine", Book of ASTM Standards, Volume 04.03: Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, ASTM International, West Conshohocken, United States.

- ASTM-E867-06, (2007) "Standard terminology relating to vehicle - pavement systems", Book of ASTM Standards, Volume 04.03: Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, ASTM International, West Conshohocken, United States.

- BS EN 1097-8, (2000) "Tests for mechanical and physical properties of aggregates; Determination of the polished stone value", British - Adopted European Standard.

- Beaton, (1976) "Providing skid resistant pavements", Transportation Research Record, 622,