بررسی عوامل سنگ‌شناسی مؤثر در میزان سایندگی کانی‌ها به‌کمک دستگاه LCPC

آرش‌هاشم‌نژاد*، محمد غفوری، غلامرضا لشکری‌پور، صادق طریق‌ازلی؛
دانشگاه فردوسی مشهد، گروه زمین‌شناسی مهندسی

تاریخ: دریافت ۹۱/۸/۱ **پذیرش** ۹۲/٤/۸

چکیده

یکی از آزمایش‌هایی که برای بررسی خصوصیات سایندگی دانه‌های خاک استفاده می‌شود، آزمایش LCPC است. دستگاه آزمایش LCPC برای اندازه‌گیری سایش ذرات در حد پبل‌های ریز (٦/۳-٤ میلی‌متر) طراحی شده است. در این پژوهش برای بررسی تأثیر عوامل سنگ‌شناسی در مقدار سایش کانی‌ها، تعدادی از مهم‌ترین کانی‌های ساینده از نقاط مختلف ایران جمع‌آوری شده است. در ابتدا مقادیر سایش و شکنندگی این کانی‌ها مطابق با سه استاندارد AFNOR P۱۸-۵۵۳، AFNOR P۱۸-۵۷۹ و AFNOR P۱۸-۵٦۰ که به‌ترتیب مربوط به مراحل آماده‌سازی نمونه برای آزمایش، روش آزمایش و آنالیز اندازهٔ دانه‌ها به‌کمک الک‌های آزمایشگاهی است، اندازه‌گیری شده است. در ادامه تأثیر عوامل سنگ‌شناسی مؤثر بر میزان سایش نمونه که شامل پنج پارامتر زاویه‌داری، درجهٔ اشباع محیط، شکل، اندازه و پتروگرافی دانه‌ها است بررسی شده است. میزان اثرگذاری این عوامل بر سایندگی نمونه بر اساس استاندارد NF ISO ۵۷۲۵ که مربوط به کاربرد آمار، دقت روش آزمون، تعیین تکرارپذیری و قابلیت تولید مجدد روشی استاندارد با آزمایش‌های درون آزمایشگاهی (بر پایه شاخص طبقه‌بندی X۰٦-۰٤۱) است، بررسی شده است. در انتها پس از کسب اطمینان از تأثیر معنی‌دار این عوامل بر سایش کانی‌ها، با استفاده نرم‌افزار SPSS میزان سایندگی برای انواع کانی‌های با سختی کم‌تر از هفت در مقیاس موس پیش‌بینی شده است.

واژه‌های کلیدی: سایش، دستگاه LCPC، عوامل سنگ‌شناسی، کانی‌های ساینده، استاندارد AFNOR P۱۸-۵۷۹

* **نویسنده مسئول** Arash.hashemnejad@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

مقدمه

ساینده‌گی از جمله مسائل مهم در پروژه‌های حفاری است. این امر سبب سایش و خوردگی ابزار و قطعات ماشین‌های حفاری و افزایش هزینه‌ها و کاهش قابل توجه در بازده فرآیند حفاری می‌شود [۱]، [۲].

به‌طورکلی بررسی‌های گسترده‌ای دربارهٔ حساسیت و پیش‌بینی سایش و خوردگی در مورد سنگ‌ها وجود دارد ، اما در مورد دانه‌های خاک و تأثیر آن‌ها بر روی ماشین‌های حفار (TBM) تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است [۲].

محققان این موضوع را که در حفاری تونل‌های سنگی، ساینده‌گی نقشی اصلی را هم از جهت هزینه‌ها، هم از جهت برنامه‌های زمان‌بندی ایفا می‌کند، پذیرفته‌اند، اما مسئلهٔ ساینده‌گی در آبرفت‌ها و خاک‌های دانه‌درشت مثل گراول‌ها و ماسه‌ها تا دههٔ گذشته چندان مهم به نظر نمی‌رسید [۲]. اما تحقیقات سال‌های اخیر نشان داد که این مسئله در خاک‌ها می‌تواند مشکلی بزرگی را در عمل‌کرد TBMهای سپردار یا ابزار حفار مربوط به تونل‌های بزرگ ایجاد کند (مانند تحقیقات ازلی و معمری،۲۰۱۲ [۳]).

میزان ساینده‌گی سنگ توسط عوامل محدود و شناخته شده‌ای کنترل می‌شود [٤]، [٥]، [٦]، در حالی‌که در خاک‌ها عوامل متعددی هم‌چون نوع کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ دانه‌های خاک، توزیع دانه‌بندی، شکل و گردشدگی ذرات خاک تنها به‌عنوان گوشه‌ای از عوامل سنگ‌شناسی مؤثر در سایش تأثیرگذارند [۱]، [۲]، [۷]، [۸]، از همین رو پیش‌بینی مقادیر واقعی سایش خاک در حین حفاری از یک سو به‌دلیل پیچیدگی‌های موجود در خصوصیات زمین‌شناسی و از دیگر سو به‌دلیل فقدان بررسی‌های دقیق ژئوتکنیکی غالباً دچار مشکلات عدیده‌ای بوده است و تا به امروز انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ و یا انجمن ژئوتکنیک هیچ روش استانداردی را برای ینی میزان ساینده‌گی خاک پیشنهاد نکرده است [۲]. از مهم‌ترین بررسی‌های انجام شده با دستگاه LCPC می‌توان به بررسی‌های بوخی (۱۹۹۵) "بررسی ساینده‌گی دانه‌های خاک" [۹]، پلنیگر و همکاران (۲۰۰٤) "پیش‌بینی سایش ابزار آلات حفاری" [۱۰]،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

نیلسن و همکاران (۲۰۰۶) "بررسی تأثیرات در سایش دانه‌ها" [۱۱] و پترا دراکر (۲۰۱۱) "بررسی ارزش ضریب سایندگی LCPC" [۱۲] اشاره کرد.

آزمایش LCPC و طبقه‌بندی مقادیر LAC

دستگاه آزمایش سایش[۱] (LCPC) در کتاب استانداردهای کشور فرانسه به‌شمارهٔ P۱۹-۵۷۹ (۱۹۹۰) شرح داده شده است (۱۹۹۰، P۱۸-۵۷۹ نرمالیزیشن فرانکویس[۲]) [۱۳]. این دستگاه طبق استاندارد موجود برای اولین بار در ایران و در دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شده است. این دستگاه دارای موتور ۷۵۰ وات است که شفت خروجی از گیربکس را با سرعت ۴۵۰۰rpm می‌چرخاند. در انتهای شفت قطعه فلزی مستطیل شکل و یک‌بار مصرف به‌نام ایمپلر[۳] قرار می‌گیرد. این قطعه فلز از جنس فولاد دارای کلاس ۱۲XC فرانسه و سختی ROCKWELL-B در محدودهٔ ۶۰ تا ۷۵ (HBR ۷۵-۶۰) است (شکل ۱). برای اندازه‌گیری میزان سایش نمونه‌ها لازم است تا وزن ایمپلر قبل و بعد از آزمایش با دقت gr ۰/۰۱ اندازه‌گیری شود. میزان کاهش وزن ایمپلر در هر آزمایش معیاری برای اندازه‌گیری ضریب سایندگی نمونه (رابطه ۱) و درصد مواد عبوری از الک ۱/۶ میلی‌متری نیز معیاری برای اندازه‌گیری میزان شکنندگی نمونه (رابطه ۲) است.

$$LAC(orA_{BR}) = \frac{m_{۰} - m}{M} = ۲۰۰۰ \times (m_{۰} - m) \qquad (۱)$$

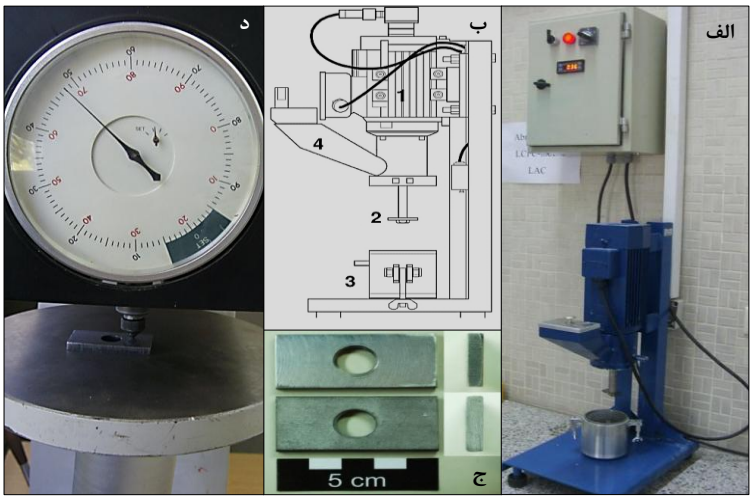
$$LBC(orB_{R}) = ۱۰۰ \frac{m_{۱/۶}}{M} \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۱) ضرایب $m_{۰}$ و m به‌ترتیب وزن ایمپلر قبل و پس از آزمایش بر حسب گرم است و M وزن کل نمونه آزمایش شده بر حسب تن است. در رابطهٔ (۲) نیز $m_{۰/۶}$ وزن ذرات کوچک‌تر از ۱/۶ میلی‌متر بر حسب گرم و M نیز وزن نمونه آزمایش شده بر حسب گرم است.

۱. Laboratoire Central des Ponts et Chaussess
۲. Normalisation Françoise
۳. Impeller

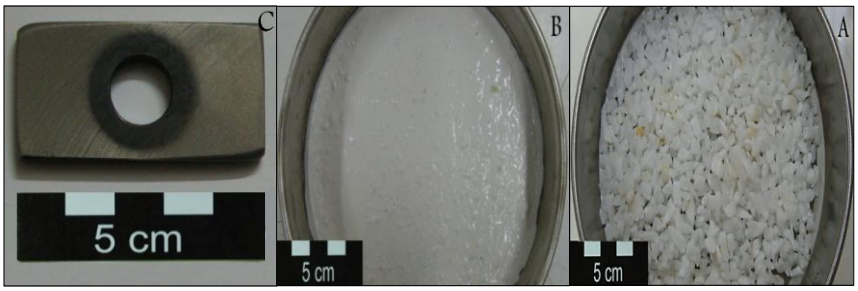
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]



شکل ۱. الف) دستگاه سایش LCPC (دانشگاه فردوسی مشهد)، ب) شکل شماتیک دستگاه LCPC (۱. موتور،۲. ایمپلر ۳. ظرف نمونه،٤. فانل تیوب(Funnel Tube)،)، ج:) نمونه ایمپلر و د) اندازه‌گیری سختی راکول (HRB ٦٨)

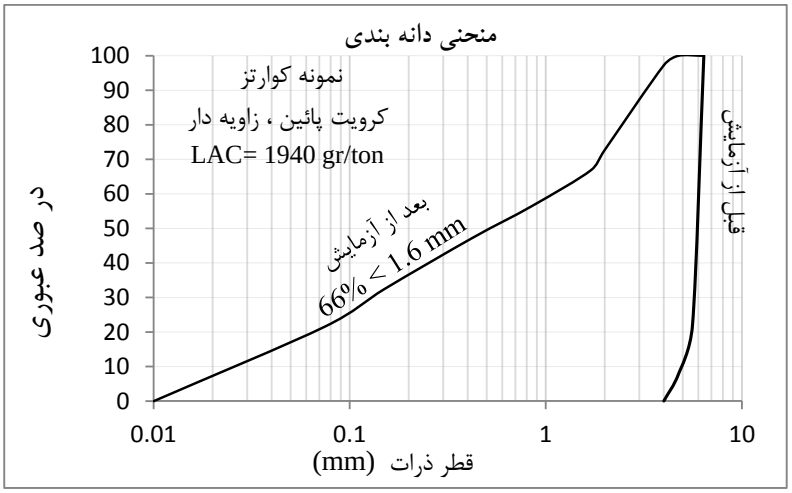
براساس استاندارد کشور فرانسه، در هر بار آزمایش مقدار gr ۲ $\pm$ ۵۰۰ نمونه از طریق فانل تیوب وارد ظرف نمونه می‌شود تا شفت و ایمپلر متصل به آن به‌مدت ۵ دقیقه با سرعت ٤٥٠٠rpm بچرخد. در شکل ۲ نمونه ای از مراحل انجام آزمایش و ایمپلر مورد آزمایش نشان داده شده است. هم‌چنین پس از آزمایش برای مشخص شدن ضریب شکنندگی، منحنی دانه‌بندی نمونه قبل و پس از آزمایش آن‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است ترسیم می‌شود.



شکل ۲. A وB) نمونه کوارتز قبل و پس از آزمایش LCPC (آزمایش تأثیر آب)، C) ایمپلر استفاده شده پس از آزمایش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]



شکل ۳. نمونه‌ای از منحنی دانه‌بندی قبل و بعد از آزمایش LCPC

در جدول ۱ رده‌بندی پتانسیل سایش ابزار بر اساس مقادیر آزمایش سایش LCPC همراه با برخی از مثال‌ها برای سنگ و خاک آورده شده است.

جدول ۱. رده‌بندی ساینده‌گی خاک و سنگ بر اساس مقادیر LAC (پلینینگر[۱] و رستنر[۲] ۲۰۰۸) [۱۴]

مقدار LAC (gr/ton)	توصیف ساینده‌گی	پتانسیل سایش ابزار	سنگ نمونه یا ترکیب خاک	خاک
۰ –۵۰	غیرساینده	خیلی کم	چوب، زغال	رس سیلتی و سیلت رس‌دار، ماسه کربناتی
۵۰–۱۰۰	خیلی کم	کم	سیلتستون، گلسنگ، مارن	
۱۰۰–۲۵۰	کم	متوسط	اسلیت، ماسه سنگ ریز دانه با میان‌لایه‌های رس، دولومیت، مرمر	گراول غنی از کربنات
۲۵۰–۵۰۰	متوسط	زیاد	سنگ آهک ماسه‌دار و ماسه سنگ، فیلیت و شیست (کم کوارتز)	ماسه غنی از کریستال و کوارتز
۵۰۰–۱۲۵۰	زیاد	خیلی زیاد	ماسه سنگ کوارتزی، آندزیت، بازالت، میکا شیست،آمفیبولیت سست	گراول غنی از کریستال و کوارتز، خاک‌های دانه‌ریز دارای کوارتز یا گراول کریستالی، پیل و کوبل
۱۲۵۰–۲۰۰۰	خیلی زیاد	بینهایت زیاد	کوارتز رگه‌ای، کوارتزیت،گرانیت، دیوریت، سینیت، گنیس، اکلوژیت، آمفیبولیت سخت	

۱. Plinninger ۲. Restner

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

مواد و روش

در این پژوهش برای بررسی تأثیر پارامترهای سنگ‌شناسی بر سایش دانه‌های خاک از کانی‌هایی با سختی ۳ تا ۷ در مقیاس موس استفاده شده است. زیرا از یک سو کانی‌های با سختی کم‌تر از ۳ در گروه کانی‌های غیرساینده قرار می‌گیرند [٦]، و از دیگر سو مقادیر بسیار ناچیزی از کانی های با سختی بیش‌تر از ۷ در محیط‌های حفاری زمین‌های خاکی وجود دارد. در جدول ۲ نام و مکان نمونه‌های جمع‌آوری شده آورده شده است. در شکل ٤ نیز تعدادی از این نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۲. نمونه‌های بررسی شده در این پژوهش و محل برداشت آن‌ها

کانی	محل برداشت	کانی	محل برداشت
کلسیت	معدن قزلقان	**فلوریت**	معدن کمر مهدی (طبس)
مرمریت	همدان	**باریت**	بچه دره (بجنورد)
آندالوزیت	همدان	**ژیپس**	رباط سفید (تربت جام)
گارنت	همدان	**زئولیت**	جنوب تهران
آهن	معدن چغارت (یزد)	**کوارتز، ارتوز و مسکویت**	پگماتیت‌های مشهد
سلستیت	کرمان	**شیشه طبیعی**	میمه اصفهان
دولومیت	کرمان	**آراگونیت**	جاده میامی (مشهد)

شکل ٤. تعدادی از نمونه‌های آماده شده برای آزمایش؛ A) کلسیت، B) ارتوز و C) کوارتز

هم‌چنین چنان‌که در جدول ۳ نشان داده شده است برای بررسی تأثیر اندازهٔ دانه‌ها بر روی سایش در هر یک از انواع نمونه‌های تهیه شده (شکل ٤)، از هفت نوع دانه‌بندی استفاده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

جدول ۳. انواع دانه‌بندی استفاده شده برای بررسی تأثیر اندازه بر روی سایش

	دانه بندی ۱	دانه بندی ۲	دانه بندی ۳	دانه بندی ٤	دانه بندی ٥	دانه بندی ٦	دانه بندی ۷
d_{min}	٤/۰ mm	٤/۰ mm	٤/٦ mm	٥/۰ mm	٥/٤ mm	٦/۰ mm	٦/۳ mm
d_{max}	٤/۰ mm	٤/٦ mm	٥/۰ mm	٥/٤ mm	٥/۸ mm	٦/۳ mm	٦/۳ mm
$D_{۱۰}$	٤/۰ mm	٤/۳ mm	٤/۷ mm	٥/۱ mm	٥/٥ mm	٦/۱ mm	٦/۳ mm
$D_{۳۰}$	٤/۰ mm	٤/٤ mm	٤/۸ mm	٥/۲ mm	٥/٦ mm	٦/۲ mm	٦/۳ mm
$D_{٦۰}$	٤/۰ mm	٤/٥ mm	٤/۹ mm	٥/۳ mm	٥/۷ mm	٦/۳ mm	٦/۳ mm

نتایج و بحث

ساده‌ترین روش برای انتخاب مدل مناسب برای داده‌های حاصل از آزمایش استفاده از ضریب $R^۲$ است. این ضریب به‌عنوان معیاری برای توجیه تنوع متغیر وابسته در اثر متغیرهای مستقل مرسوم است؛ یعنی $۰ \leq R^۲ \leq ۱$. اما مقدار بزرگ‌تر $R^۲$ الزاماً به معنی خوب بودن مدل رگرسیون نیست؛ زیرا افزودن یک متغیر به مدل همیشه $R^۲$ را صرف‌نظر از این‌که متغیر اضافه شده در مدل مشارکت داشته باشد یا نه افزایش خواهد داد. بنا بر این ممکن است مدل‌های دارای مقادیر بزرگ‌تر $R^۲$ برای پیش‌بینی یا برآورد مدل ضعیف باشند. از این‌رو در این تحقیق از آماره‌های آزمون t و فیشر (F) برای مدل‌سازی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. به‌طور کلیبرای آزمون مدل، دو فرض وجود دارد:

الف) فرض آزمون: جهت فرض آزمون دو شرط وجود دارد:

$$H_۰ : \alpha = ۰ \qquad H_۰ : \beta = ۰$$
$$H_۱ : \alpha \neq ۰ \qquad H_۱ : \beta \neq ۰ \tag{۳}$$

ب) آزمون فرض: آزمون فرض بر اساس توزیع t و F انجام می گیرد. آماره‌های آزمون عبارتند است از:

$$F = \frac{MS_R}{MS_{RES}} = \frac{(n-۲)R^۲}{۱-R^۲} \tag{٤}$$

$$MS_R = \frac{SS_R(SS_Y)}{۱}, \qquad MS_{\mathrm{Res}} = \frac{SS_{\mathrm{Res}}(SS_e)}{n-۲} \tag{٥}$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

$$SS_T = SS_R + SS_{\mathrm{Res}} \quad (٦)$$

SS_T: واریانس کل، SS_R: واریانس تبیین شده یا به‌عبارتی دیگر سهم مدل (میزان واریانس متغیر پاسخ که با متغیر کنترل تبیین می‌شود) و SS_{Res}: واریانس تبیین نشده (مقدار واریانس که با مدل قابل تبیین نیست؛ واریانس خطا).

ناحیهٔ قبول فرض H۰:

$$\left\{\begin{matrix} -t_{۱} - \alpha / ۲(n-۲) < T < t_{۱} - \alpha / ۲(n-۲) \\ F < F_{\alpha}(۱, n-۲) \end{matrix}\right\} \rightarrow AH_{۰} \quad (۷)$$

رد فرض صفر به منزلهٔ معناداری مدل مورد نظر است. بنا بر این در صورت معنی‌داری تمامی مدل‌های بررسی شده (بالاتر بودن مقادیر F مدل‌های بررسی شده از مقادیر F جدول استاندارد توزیع)، مدلی مناسب‌تر است که F بالاتری داشته باشد.

سختی موس

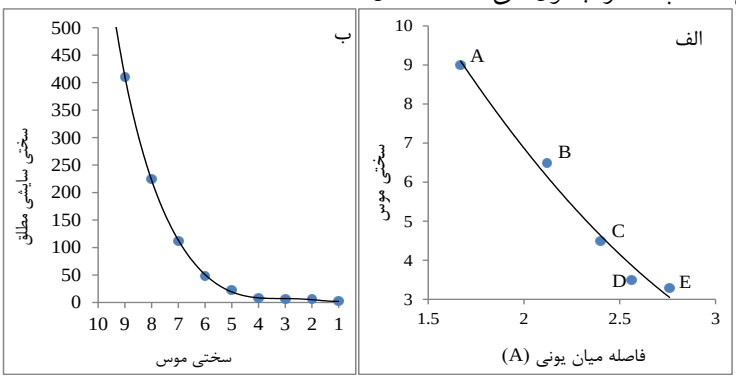
مقاومت سطح یک کانی در برابر خراشیده شدن، سختی آن کانی است. برآورد سختی در واقع بررسی واکنش یک ساختار بلوری به تنش وارده، بدون ایجاد گسیختگی در آن جسم است [۱٦]. در موادی با پیوند فلزی (همانند ایمپلر) که می‌توانند به‌طور پلاستیکی جریان پیدا کنند، خراشیدگی باعث ایجاد یک شیار می‌شود و واکنش مواد شکننده دارای پیوندهای یونی و یا کووالانسی (همانند نمونه‌های آزمایش شده) به آزمون سختی ایجاد شکستگی است. در شکل ۵ الف اثر اندازهٔ یونی در ساختارهایی با پیوند یونی بررسی شده است. همهٔ مواردی که در این شکل نشان داده شده است ساختاری یک‌سان دارند و پیوند آن‌ها را می‌توان یونی در نظر گرفت. در ارتباط دادن سختی یک ساختار بلوری به پیوندهای آن، باید توجه داشت که مقاومت کلی ساختار، ترکیبی از همهٔ پیوندها است در حالی‌که سختی همان ساختار، نمودی از ضعیف‌ترین پیوند است. برای مثال در نمونه‌های سیلیکاته انتخابی برای این پژوهش که همگی بر مبنای آرایش‌های گوناگون چهاروجهی $SiO_۲$ هستند سختی می‌تواند از ۳، مثلاً در مسکوویت تا ۷ در کوارتز، تغییر یابد. اگر سختی مطلق کانی‌های موجود در جدول موس

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

به‌صورت آن‌چه که در شکل ۵ ب نشان داده شده است ترسیم شود دلیل این امر به‌سادگی مشخص خواهد شد.

به‌کمک نرم‌افزار SPSS مدل تأثیرگذاری سختی موس بر مقدار LAC محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در جدول‌های ٤ تا ٦ نشان داده شده است.



شکل ۵. الف) منحنی سختی در برابر فاصلهٔ بین یونی، ب) مقایسهٔ سختی موس و سختی سایشی مطلق [۱۵]

جدول ٤. خلاصه مدل‌ها و برآورد عوامل ممکن از تأثیر سختی موس بر سایش (خروجی نرم افزار SPSS)

متغیر وابسته : LAC (gr/ton)

معادله	خلاصه مدل					برآورد پارامترها			
	R^2	F	درجهٔ آزادی ۱	درجهٔ آزادی ۲	معیار تصمیم	ثابت	B۱	B۲	B۳
Linear	۰/۹۳۹	۳۲۳	۱	۱۵	۰/۰۰۰	-۷۷۸	۳٤۲/۸		
Log.	۰/۸٤۳	۱۱۲	۱	۱۵	۰/۰۰۰	-۱۱٤٤	۱۳۲۸		
Inverse	۰/۷۰۷	۵۰	۱	۱۵	۰/۰۰۰	۱۸۸۳	-٤۳۹٦		
Quad.	۰/۹۸۷	۷۸۲	۲	۱٤	۰/۰۰۰	۲۰۲	-۱۵۵	۵۵	
Cubic	۰/۹۸۸	۵۰٤	۳	۱۳	۰/۰۰۰	٤۰۰	-۳۱۰	۹۲	-۲/۷
Comp.	۰/۹۵۰	۳۹۸	۱	۱۵	۰/۰۰۰	٤۰	۱/۷٦۸		
Power	۰/۹۷٦	۸٦۸	۱	۱۵	۰/۰۰۰	۱۸	۲/۳٦۳		
S	۰/۹٤۸	۳۸۱	۱	۱۵	۰/۰۰۰	۸	-۸/٤		
Growth	۰/۹۵۰	۳۹٦	۱	۱۵	۰/۰۰۰	۳	۰/۵۷۰		
Exp.	۰/۹۵۰	۳۹۸	۱	۱۵	۰/۰۰۰	٤۰	۰/۵۷۰		
Logistic	۰/۹۵۰	۳۹۸	1	۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰	۰/۵٦٦		

متغیر مستقل سختی موس است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

جدول ۵. جدول تحلیل واریانس مربوط به معادلهٔ انتخابی از جدول ٤ (خروجی نرم‌افزار SPSS)

معیار تصمیم	آمارهٔ آزمون F	میانگین مربعات	درجهٔ آزادی	مجموع مربعات	
۰/۰۰۰	۸٦۸/۳۵۵	۹/٦٦٦	۱	۱۹/٦٦٦	رگرسیون
		۰/۰۲۳	۱۳	۰/٤۷٦	باقی‌مانده
			۱٤	۲۰/۱٤۲	مجموع

متغیر مستقل سختی موس است

جدول ٦. جدول ضرایب رابطهٔ استخراج شده از جدول ٤ (خروجی نرم‌افزار SPSS)

معیار تصمیم	آمارهٔ آزمون t	ضرایب استاندارد شده	ضرایب استاندارد نشده		
		Beta	Std. Error	B	
۰/۰۰۰	۲۹/٤٦۸	۰/۹۸۸	۰/۰۸۰	۲/۳٦۳	ln(Mohs Hardness)
۰/۰۰۰	۸/٦۸۸		۲/۰٦۲	۱۷/۹۱۸	(Constant)

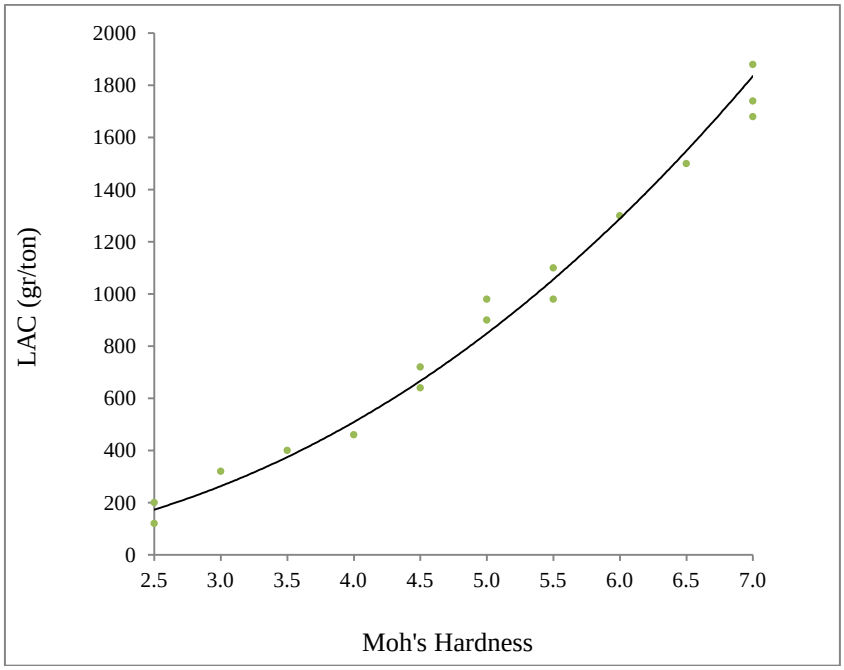
متغیر وابسته ln(LAC (gr/ton)) است

چنان‌که در جدول ٤ مشاهده می‌شود، معادلهٔ توانی دارای بالاترین مقدار F است؛ از همین رو بهترین خط برای پوش سایش نمونه‌ها است. لازم به توضیح است که مقدار ضریب F که از جدول استاندارد تعیین شده برابر با ۱٤/۸۲ است. به‌عبارت دیگر رابطهٔ معنی‌داری از لحاظ آماری بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد. برای هر دو ضریب رابطه مقدار معیار تصمیم (sig.) کم‌تر از ۰/۰۵ است. هم‌چنین از آن‌جاکه مقدار آمارهٔ آزمون t به‌دست آمده از جدول ضرایب بیش‌تر از مقدار t به‌دست آمده از جداول استاندارد است بنا بر این ضرایب رابطه از لحاظ آماری معنی‌دار و قابل تأیید هستند.

نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها و جدول‌های ٤ تا ٦، در شکل ٦ نشان داده شده است. لازم بذکر است این شکل تنها برای دانه‌های کروی، زاویه‌دار، با اندازهٔ ۵/٦ میلی‌متری و در شرایط خشک مورد تأیید است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]



شکل ٦. محدودهٔ مقادیر LAC در برابر سختی موس

زاویه‌داری دانه‌ها

زاویه‌داری پارامتری است که تنها در دانه‌های حجیم(دانه‌های کروی شکل یا دوکی‌شکل) قابل بررسی است. برای بررسی تأثیرات این عامل بر میزان سایش، چنان‌که در شکل۷ به‌صورت شماتیک نشان داده شده است، نمونهٔ کانی‌های مورد آزمایش در ٦ گروه مختلف از نظر زاویه‌داری آماده سازی شده‌اند.

شکل ۷. انواع زاویه‌داری دانه‌های استفاده شده در این تحقیق [۱۵]

میزان اثرگذاری زاویه‌داری بر سایش در شکل ۸ الف نشان داده شده است. در این شکل زاویه‌داری از شماره ۱ تا ٦ به‌ترتیب معرف دانه‌های خیلی گردشده، گردشده، نیمه گردشده،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

نیمه زاویه‌دار، زاویه‌دار و خیلی زاویه‌دار است. چنان‌که در این شکل نشان داده شده است، برای مثال در دانه‌های با سختی ۷ در مقیاس موس، تغییرات زاویه‌داری از حالت ٦ (خیلی زاویه‌دار) به حالت ۱ (خیلی گردشده) سبب کاهش ۰/۱ میزان سایش می‌شود. با فرض این‌که میزان سایش نمونه در حالت خیلی زاویه‌دار برابر ۱۷٤۰ گرم در تن باشد آنگاه:

$$\frac{LAC_{Ang=۱}}{LAC_{Ang=۶}} = ۰/۹ \rightarrow \frac{LAC_{Ang=۱}}{۱۷۴۰} = ۰/۹ \rightarrow LAC_{Ang=۱} = ۰/۹ \times ۱۷۴۰$$
$$\approx ۱۵۶۰ gr/ton$$

درجهٔ اشباع

تأثیر تزریق آب بر میزان سایش نمونه را به ٤ مرحله می‌توان تقسیم کرد:

مرحلهٔ اول از ابتدای تزریق آب:

- جلوگیری از خردشدگی سریع دانه‌ها در اثر کاهش تماس اصطکاکی میان دانه و مته.
- جلوگیری از سایش و خردشدگی دانه‌ها در اثر تماس با یک‌دیگر و قبل از برخورد با مته.
- شستشوی دائم سطح ابزار برشی و جلوگیری از انباشت خاکه در سطح آن(افزایش سایش).

مرحلهٔ دوم از رطوبت ۳۵ در صد به بعد:

- اثر نرم‌کنندگی خاک.
- اثر خنک‌کنندگی ایمپلر.

مرحلهٔ سوم از رطوبت ٦۰ درصد به بعد:

- اثر گرم شدگی آب.

مرحلهٔ چهارم از رطوبت ۷۵ درصد تا رطوبت ۱۰۰ درصد:

- تولید کف و معلق شدن دانه‌ها در کف حاصل.

در مراحل اول و سوم مجموع تأثیرات در جهت افزایش سایش و در مراحل دوم و چهارم مجموع تأثیرات در جهت کاهش مقدار سایش است. لازم به ذکر است که تأثیرات هر کدام از این مراحل به‌صورت تجمعی بر تأثیرات مرحلهٔ قبلی وارد می‌شود. تأثیرات درجهٔ اشباع محیط بر ساینده‌گی در شکل ۸ ب نشان داده شده است. با توجه این شکل بیش‌ترین افزایش در میزان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

سایش در محدودهٔ ۳۰ تا ٤۰ درصد اشباع‌شدگی نمونه است. برای مثال در درجهٔ اشباع ۳۵ درصدی محیط بافرض این‌که مقدار سایش برای یک کانی با سختی ۷ در مقیاس موس (برای مثال کانی کوارتز) برابر ۱۷٤۰ گرم در تن باشد، مقدار سایش نهایی در رطوبت ۳۵ درصد بدین‌صورت قابل اندازه‌گیری است:

$$\frac{LAC_{W=۳۵}}{LAC_{W=۰}} = ۱/۳۷ \rightarrow \frac{LAC_{W=۳۵}}{۱۷۴۰} = ۱/۳۷ \rightarrow LAC_{W=۳۵} = ۱/۳۷ \times ۱۷۴۰ \approx ۲۳۸۰ gr/ton$$

شکل دانه‌ها

شکل دانه‌ها از دیگر عوامل تأثیرگذار بر میزان سایش است. به‌طور کلی دانه‌ها را از نظر شکل می‌توان به ۳ دستهٔ کلی تقسیم کرد: دانه‌های حجیم (با کرویت زیاد و کرویت کم)، مسطح و سوزنی. حال برای این‌که بتوانیم از پارامتر شکل به‌عنوان یک متغیر مستقل آماری استفاده کنیم ناچار به‌تبدیل این پارامتر کیفی به پارامتری کمی هستیم. برای انجام این تبدیل از اندیس‌شکل[۱] که به‌صورت تجربی در این پژوهش تعریف شده است، استفاده می‌شود. چنان‌که در رابطهٔ ۸ دیده می‌شود، این عدد حاصل جمع دو نسبت طول به عرض (L/W) و طول به ضخامت (L/T) است.

$$Shapeindex = \frac{L}{W} + \frac{L}{T} L\left(\frac{T+W}{W.T}\right) \qquad (۸)$$

با توجه به رابطهٔ ۸ اندیس‌شکل برای دانه‌های حجیم با کرویت زیاد، حجیم با کرویت کم، مسطح و سوزنی به‌ترتیب برابر ٤،۳،۲ و ۵ است. نتیجه تأثیرات شکل بر روی سایش در شکل ۸ ج نشان داده شده است. با توجه به این شکل در دانه‌های با سختی ۷ در مقیاس موس، تغییر شکل از حالت کروی (با اندیس‌شکل برابر ۲) به سوزنی (با اندیس‌شکل برابر ۵) سبب کاهش مقدار سایش به‌میزان ۰/۱ می‌شود. مهم‌ترین دلیل آن‌را نیز می‌توان در شکنندگی سریع‌تر و تحمل‌پذیری کم‌تر دانه‌ها در برخورد با ایمپلر و از ای‌نرو بازگشت کم‌تر انرژی برخوردی از دانه‌ها به ایمپلر دانست. با فرض این‌که میزان سایش نمونه با اندیس شکل ۲ برابر ۱۷٤۰ گرم در تن باشد آن‌گاه:

۱. Shape index

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

$$\frac{LAC_{sh.index=۵}}{LAC_{sh.index=۲}} = ۰/۹ \rightarrow \frac{LAC_{sh.index=۵}}{۱۷۴۰} = ۰/۹ \rightarrow LAC_{sh.index=۵}$$
$$= ۰/۹ \times ۱۷۴۰ \approx ۱۵۶۰ gr/ton$$

اندازهٔ دانه‌ها

برای بررسی اثرگذاری اندازهٔ دانه‌ها بر میزان سایش، نمی‌توان از محدودهٔ اندازهٔ دانه‌ها که پارامتری کیفی است استفاده کرد، بنا بر این برای تبدیل این پارامتر کیفی به پارامتری کمی، برای هر گروه دانه‌بندی(جدول ۳) از ضریب اندازهٔمؤثر[1] که در این پژوهش به‌صورت تجربی به‌دست آمده است، استفاده می‌شود(رابطهٔ ۹). در جدول ۷ مقادیر محاسبه شده این عدد برای تمامی گروه‌های دانه‌بندی، آورده شده است.

$$Ef.Size = ۰/۱\left(\frac{d_{\min} + D_{۱۰}}{۲}\right) + ۰/۲\left(\frac{D_{۱۰} + D_{۳۰}}{۲}\right) + ۰/۳\left(\frac{D_{۳۰} + D_{۶۰}}{۲}\right) + ۰/۴\left(\frac{D_{۶۰} + D_{\max}}{۲}\right) \quad (۹)$$

در این رابطهٔ $D_{۱۰}$ ، $D_{۳۰}$ و $D_{۶۰}$ به‌ترتیب قطر ذرات کم‌تر از ۱۰ ، ۳۰ و ٦۰ درصد و d_{min} و d_{max} به‌ترتیب قطر حداقل و حداکثری ذرات مورد آزمایش است.

جدول۷. مقادیر اندازهٔ مؤثر در هر گروه دانه‌بندی

	دانه بندی ۱	دانه بندی ۲	دانه بندی ۳	دانه بندی ٤	دانه بندی ٥	دانه بندی ٦	دانه بندی ۷
اندازهٔ مؤثر	٤/۰ mm	٤/٤ mm	٤/۸ mm	٥/۲ mm	٥/٦ mm	٦/۰ mm	٦/۳ mm

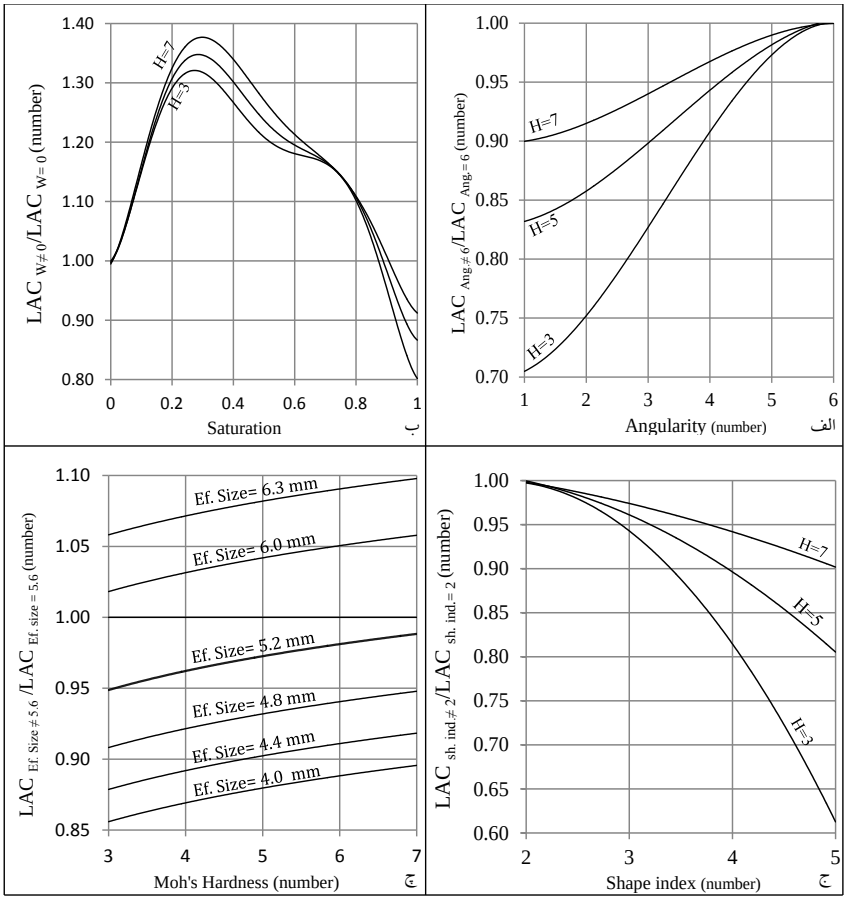
افزایش اندازهٔ مؤثر دانه‌ها (رابطهٔ ۹) سبب افزایش حداقل یک‌بعدی و حداکثر سه‌بعدی در ابعاد دانه‌ها و در نتیجه افزایش قدرت دانه‌ها در برابر برخورد می‌شود، هم‌چنین در اثر این افزایش ابعاد، جابه‌جایی دانه‌ها نسبت به یک‌دیگر سخت‌تر می‌شود، این دو عامل سبب بازگشت هر چه بیش‌تر نیروی برخورد ایمپلر و دانه‌ها به خود ایمپلر و در نتیجه سایش بیش‌تر ایمپلر می‌شود. چنان‌که در شکل ۸ چ نشان داده شده است تغییرات اندازهٔ مؤثر در دانه‌های با سختی ۷ در مقیاس موس، از ٤ میلی‌متر به ٦/۳ میلی‌متر سبب افزایش ۰/۱ در مقدار سایش اولیه می‌گردد. یعنی:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

$$\frac{LAC_{Ef.size=۶/۳}}{LAC_{Ef.size=۵/۶}} = ۱/۱ \rightarrow \frac{LAC_{sh.index=۵}}{۱۷۴۰} = ۱/۱ \rightarrow LAC_{sh.index=۵}$$
$$= ۱/۱ \times ۱۷۴۰ \approx ۱۹۲۰ gr/ton$$

لازم به‌ذکر است از آن‌جاکه نتایج اولیهٔ آزمایش‌های آزمایشگاهی برای اندازهٔ مؤثر ۵/٦ میلی‌متری محاسبه شده است، این اندازه به‌عنوان مبنای محاسبات مد نظر قرار گرفته و در شکل۸ چ قرار ندارد.



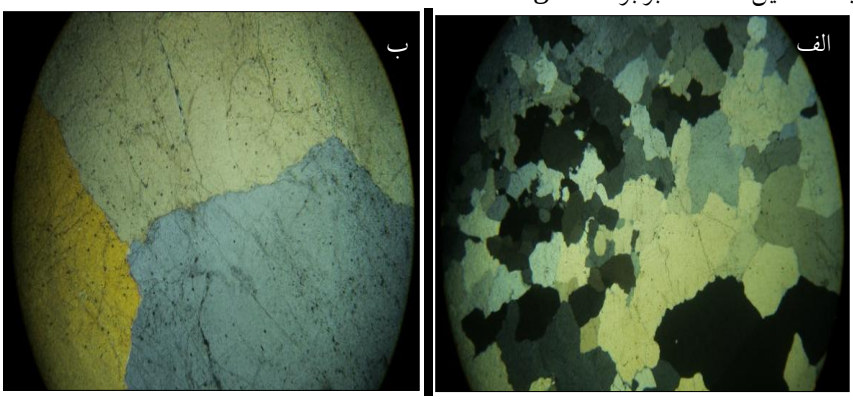
شکل ۸. منحنی‌های مقادیر میانگین تأثیر عوامل سنگ‌شناسی بر میزان سایش، الف) تأثیرات زاویه‌داری بر میزان سایش نمونه، ب)تأثیرات درجهٔ اشباع بر میزان سایش نمونه (آب با دمای ۲۵ و pH خنثی)، ج) تأثیرات شکل دانه‌ها بر میزان سایش نمونه، چ) تأثیرات اندازهٔ دانه‌ها بر میزان سایش نمونه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

پتروگرافی

در پژوهش‌های پتروگرافی می‌توان فابریک دانه‌ها (آرایش، تماس‌ها و جهت‌یابی دانه‌ها و ارتباط دانه‌ها) را برای بررسی استحکام پیوندهای میان ذرات سنگی بررسی کرد. هرچند عامل پتروگرافی تأثیر کم‌تری نسبت به‌سایر عوامل ذکر شده دارد و عملاً در کارهای عمرانی چندان مهم نیست، اما در محدوده فعالیت‌های آزمایشگاهی پارامتری مهم شمرده می‌شوند؛ برای مثال در شکل ۹ که مربوط به دو نمونهٔ کوارتز با بلورهایی با اندازهٔ میکروسکوپی متفاوت است، سایندگی در نمونهٔ با بلورهای بزرگ‌تر(در شرایط آزمایش یک‌سان) بیش‌تر است. این میزان اختلاف برابر ۳ واحدِ سایش است و از آن‌جاکه هر واحدِ سایش مضربی از عدد ۲۰ است (رابطهٔ ۱) این اختلاف برابر ٦۰gr/ton است.



شکل ۹. نمونه‌هایی از تفاوت بافت میکروسکوپی در سنگ‌هایی از یک جنس؛ الف) کوارتز رگه (منطقه خواجه مراد مشهد)، ب) کوارتز رگه (منطقهٔ طرق مشهد)، (بزرگ‌نمایی هر دو تصویر X۱۰ است)

شکنندگی

از آن‌جاکه در آزمایش سایش LCPC ایمپلر با سرعت زیاد به دانه‌های مورد آزمایش برخورد می‌کند، نیروی زیادی را به دانه‌ها منتقل می‌کند. همین نیروی زیاد، مهم‌ترین دلیل خردشدگی دانه‌ها است و تفاوت در مقادیر شکنندگی نمونه‌ها به‌میزان انرژی برگشت داده شده از سطح دانه به ایمپلر مربوط می‌شود. این میزان (نیروی برگشت داده شده از سطح دانه به ایمپلر) با شکنندگی نمونه نسبت عکس دارد. یعنی هر چقدر نیروی برگشت داده شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

بیش‌تر باشد شکنندگی نمونه کم‌تر خواهد بود و چون مقدار انرژی انعکاس یافته از سطح نمونه را می‌توان با چکش اشمیت اندازه‌گیری کرد، مقادیر بالاتر سختی اشمیت نمونه‌ای نسبت به نمونهٔ دیگر نشانه‌ای بر کم‌تر بودن میزان‌شکنندگی آن نمونه (در صورت برابر بودن سایر پارامترهای آزمایش) است. بیش‌تر بودن میزان شکنندگی نمونه به معنی تولید بیش‌تر ذرات ریزتر از ۱/٦ میلی‌متری است. این ذرات می‌توانند سبب افزایش چسبندگی مخلوط حفاری شده در جبهه کار شوند.

از آن‌جاکه هدف اصلی از انجام آزمایش‌های LCPC اندازه‌گیری مقادیر سایش نمونه است، نتایج تأثیرات پارامترهای تأثیرگذار بر شکنندگی به‌صورت خلاصه در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی بر شکنندگی نمونه و نتایج آن (منظور از ک. ش. کاهش شکنندگی است)

پارامتر	تأثیرات	نتیجه
آب	جلوگیری از قفل‌شدگی دانه‌ها در یک‌دیگر (کاهش اصطکاک بین دانه‌ای) دفن‌شدگی دانه‌ها در گل حاصل از خردایش دانه‌ها خنثی‌سازی قسمتی از نیروی پیش‌ران دستگاه و جلوگیری از وارد شدن این نیرو به خاک	ک. ش. با افزایش آب
گرد شدگی	جلوگیری از قفل‌شدگی دانه‌ها در یک‌دیگر و لغزش راحت‌تر آن‌ها بر روی هم در هنگام چرخش ایمپلر کاهش سطح تماس دانه‌ها با یک‌دیگر در هنگام چرخش ایمپلر	ک. ش. با افزایش گردشدگی
شکل دانه	کاهش توان دانه‌ها در تحمل نیروی برخوردی با ایمپلر و دیگر دانه‌ها (به‌سمت دانه‌های غیرکروی) تغییر تعداد شکست‌های لازم برای رسیدن دانه به اندازهٔ ۱/٦ میلی‌متری (به‌سمت دانه‌های غیرکروی)	ک. ش. به سمت دانه‌های کروی‌تر
اندازه	تغییر تعداد شکست‌های لازم برای رسیدن دانه به اندازهٔ ۱/٦ میلی‌متری تغییر در توان دانه‌ها در تحمل نیروی برخوردی با ایمپلر و دیگر دانه‌ها تغییر در شدت قفل شدگی دانه‌ها در یک‌دیگر (لغزش راحت‌تر دانه‌ها در اندازه‌های کوچک‌تر)	عموماً ک. ش. با افزایش اندازه

نتیجه‌گیری

چنان‌که نشان داده شد عوامل تأثیرگذار بر روی سایش بسیار متنوع هستند. این تنوع سبب نوعی آشفتگی در پیش‌بینی میزان سایش مواد توسط افراد مختلف شده است. در این مقاله به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

تعدادی از عوامل تأثیرگذار بر روی سایش اشاره شده است که نقش مهمی در مسئلهٔ سایش دارد. در نگاهی کلی می‌توان سختی موس را عامل اصلی تفاوت در میزان سایش دانه‌های مختلف دانست. هم‌چنین با استفاده از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، می‌توان با برقراری یک رگرسیون چهار متغیره با تعداد ترکیب‌های ممکن پانزده $(\sum_{i=1}^{4}\binom{4}{1}=15)$، میان عوامل تأثیرگذار بر روی مقادیر اولیه سایش نمونه که شامل شکل، اندازه، زاویه‌داری و درجهٔ اشباع است، مقادیر سایش پیش‌بینی شده را تا حد امکان به مقادیر واقعی نزدیک کرد. علاوه بر آن با انجام بررسی‌های پتروگرافی می‌توان فابریک دانه‌ها (آرایش، تماس‌ها و جهت‌یابی دانه‌ها و ارتباط دانه‌ها) را برای بررسی استحکام پیوندهای میان ذرات سنگی به‌طور دقیق بررسی کرد و از این طریق یک پیش‌بینی قابل قبول از میزان سایش نمونه به‌دست آورد.

هم‌چنین با توجه به بررسی‌های انجام شده، شکنندگی نمونه به‌میزان مقاومت نمونه در برابر برخورد وابسته است و پارامترهای سنگ‌شناسی مانند زاویه‌داری، شکل، اندازه و درجهٔ اشباع محیط می‌تواند تغییراتی را در مقدار اولیهٔ آن بوجود آورد. به‌طورکلی افزایش آب، گرد شدگی و اندازهٔ دانه‌ها سبب کاهش میزان‌شکنندگی نمونه می‌شود. تأثیرات شکل بر روی شکنندگی نمونه نیز در دانه‌های حجیم کم‌ترین و در دانه‌های سوزنی بیش‌ترین میزان شکنندگی را (در صورت برابر بودن سایر شرایط آزمایشگاهی) دارند.

منابع

1. Thuro K., Singer J., Käsling H., Bauer M., "Soil abrasiveness assessment using the LCPC testing device", Felsbau 24 (2006) 37-45.
2. Thuro K., Singer J., "Determining abrasiveness with the LCPC Test", Proceedings of the 1st Canada– U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver B.C. (2007).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

3. Tarigh azali S., Moammeri H., "EPB-TBM tunneling in abrasive ground, Esfahan Metro Line 1", WTC ITA-AITES 2012 World Tunnel Congress, Thailand (2012).

4. Thuro K., Plinninger R. J., "Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting", ISRM-Technology road maps for rock maps, south African institude of mining and metallurgy (2003).

5. Plinninger R. J., Käsling H., Thuro K., "Wear Prediction in hardrock excavation", 53rd Geomechanics colluqium (2004).

6. Thuro K., "Drillability prediction - Geological influences in hard rock and blast tunneling", Geol. Rundsch و 86, (1997) 426-37.

7. Festl, J., "The LCPC test-A possibility to determine soil abrasivity?", Bachelor thesis. Technical university of munchen (2006).

8. Frenzel Ch., Käsling H., Thuro K., "Factors Influencing Disc Cutter Wear", Geomechanics and Tunneling, 1(1) (2008).

9. Buchi E., Mathier J., Wiss Ch., "Rock abrasivity-a significant cost factor for mechanical tunnelling in loos and hard rock", Tunnel International, 5 (1995) 38-44.

10. Plinninger R. J., Spaun G., Thuro K., "Predicting tool wear in drill and blast", Tunnel and Tunnelling International, 4 (2002) 38-41.

11. Nilsen B., Dahl F., Holzhäuser J., Raleigh P., "New test methodology for estimating the abrasiveness", 56rd Geomechanics colluqium (2007) 124-136.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]

12. Drucker P., "Validity of the LCPC abrasivity coefficient through the example of a recent Danube gravel", Geomechanics and Tunnelling, 4, No. 6. (2011) 41-50.

13. Normalisation Française P18-579, "granulates: Essai d'abrasivite et de broyabilite", AFNOR Association Française de normalisation, Paris (1990).

14. Plinninger R. J., Restner W., "A Commented Overview of Abrasiveness Testing Methods", Geomechanik und Tunnelbau, 1. Heft 1 (2006).

15. Tucker M. E., "Sedimentary petrology- An introduction", 3rd ed. Blackwell Publishing (2001) 360.

16. Klein C., Hurlbut C., "Manual of Mineralogy", John Wiley & Sons, Volume 1 (1997) 267-273.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.8.6]