

## مقایسه روش‌های مختلف تعیین ساینده سنگ‌ها

محمد تقی همزبان<sup>۱</sup>، حسین معماریان<sup>۲</sup>، جمال رستمی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، hamzaban@sut.ac.ir

۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و انرژی، دانشگاه اباتی پنسیلوانیا

(دریافت ۳۰ آبان ۱۳۹۰، پذیرش ۲۸ خرداد ۱۳۹۱)

### چکیده

در حال حاضر، بخش عمده‌ای از فضاهاى زیرزمینی عمرانی و معدنی، بوسیله دستگاه‌های حفاری مکانیزه احداث می‌شوند. همچنین، حفر گمانه‌های ژئوتکنیکی، معدنی و چاه‌های نفت و گاز، حاصل نفوذ مته به داخل سنگ است. کارآیی چنین تجهیزاتی به شدت نیازمند شناخت کامل شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی زمین پیش روست. یکی از پارامترهای مهم در تخمین عمر مته‌ها، هزینه‌ها و ارزیابی کارآیی عملیات حفاری مکانیزه، ویژگی‌های سایشی زمین است. در این مقاله، روش‌های مختلف آزمایش قابلیت ساینده سنگ‌ها به اختصار مرور شده است. در ادامه با معرفی یک سیستم امتیازبندی ساده برای روش‌های مختلف، کارآیی آنها در ارتباط با ارزیابی سایش در دیسک‌های برنده یک TBM برآورد شده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهند که با وجود کاستی‌های قابل توجه در روش‌های ارزیابی ظرفیت سایشی سنگ‌ها، می‌توان آزمایش سرشار را به عنوان یک روش کم هزینه و نسبتاً کارآمد به کار برد. همچنین در صورت درک مناسب این کاستی‌ها، می‌توان در رفع آن‌ها تلاش نموده و نتایج قابل اطمینان‌تری به دست آورد.

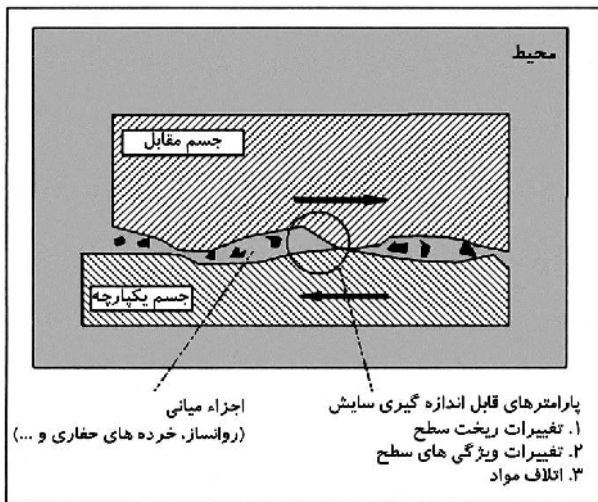
### کلمات کلیدی

سنگ، حفاری مکانیزه، TBM، ظرفیت سایشی، آزمایش سایش، آزمایش سرشار

## ۱- مقدمه

شرایط دما و فشار حاکم دارد. برای مثال در دما و فشار معمول، کوارتز نسبت به فولاد ساینده است اما نسبت به کاربید تنگستن ساینده نمی‌باشد. از آنجا که ساینده‌گی خاصیتی است رفتاری، می‌توان آن را به صورت ظرفیت سایشی تعریف نمود. در حالت کلی، ظرفیت سایشی، ناشی از ویژگی‌های سنگ-شناسی و مکانیک سنگی بوده و پارامترهای زیر به عنوان مهم-ترین عوامل موثر در ظرفیت سایشی سنگ‌ها بیان شده اند [۳]:

- ترکیب کانی‌شناسی (سختی کانی‌ها)؛
- اندازه و شکل دانه‌های تشکیل دهنده؛
- ساختار میکروسکوپی مواد (ترک‌ها، ناهمسانگردی و پیکربندی دانه‌ها)؛
- نحوه اتصالات بین دانه‌ای (خواص مقاومتی سنگ).



شکل ۱: اجزاء مختلف یک تریبو سیستم [۴]

ظرفیت سایشی سنگ‌های مختلف در برابر ابزارهای برنده، بوسیله نرخ سایش<sup>۱</sup> بیان می‌شود که معمولاً به صورت حجم حفر شده سنگ بر حسب واحد برنده مورد استفاده، تعریف می‌گردد. بنابراین می‌توان آن را به عنوان طول عمر برنده نیز در نظر گرفت. نرخ سایش، عاملی اساسی در محاسبه مصرف ابزارها و هزینه‌های سایش آنهاست [۵].

روند عمومی به‌کار رفته برای ارزیابی ظرفیت سایشی سنگ‌ها، اجرای آزمایش و اندازه‌گیری میزان سایش مواد مورد استفاده در آزمایش است. با اینکه آزمایش‌های زیادی در این راستا توسعه یافته‌اند؛ اما مسئله اساسی این است که نتایج حاصل، به شدت وابسته به شرایط و سازوکار انجام آزمایش اند [۳]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سازوکار انجام آزمایش و تشابه آن با سازوکار واقعی سایش، یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که باید در طراحی و انتخاب روش‌های برآورد ظرفیت سایشی سنگ‌ها، مورد توجه قرار گیرد.

سایش<sup>۱</sup> را می‌توان به صورت از دست رفتن و زدوده شدن مداوم و ناخواسته مواد از سطح یک جسم جامد، در اثر کنش-های مکانیکی، مانند تماس و حرکت نسبی میان دو جسم، تعریف نمود [۱]. برهم‌کنش سطوح در تماس به هنگام حرکت نسبی، موضوعی است عمومی که در اکثر طرح‌های مهندسی حضور دارد و می‌توان گفت ماشین یا مکانیزمی وجود ندارد که به آن وابسته نباشد.

علم و فناوری بررسی برهم‌کنش سطوح به هنگام حرکت نسبی، تریبولوژی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. سال‌ها تحقیق در تریبولوژی ثابت کرده است که ویژگی‌های اصطکاکی و سایشی یک ماده مشخص، جزو ویژگی‌های ذاتی ماده نبوده و پارامترهایی رفتاری اند که به شرایط کاربردی، مرتبط می‌شوند. مقادیر کمی اصطکاک و سایش، بستگی به پارامترهایی دارند که می‌توان آنها را به صورت زیر تقسیم‌بندی نمود [۲]:

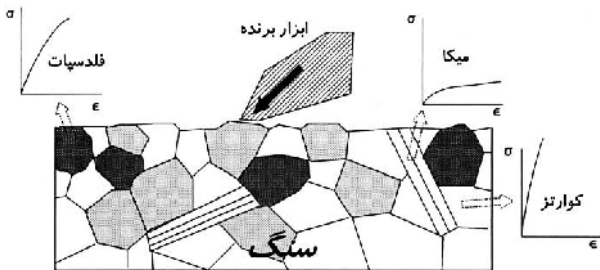
- ساختار سیستم: اجزاء تشکیل دهنده و ویژگی‌های هرکدام؛
- متغیرهای عملیاتی: تنش، سینماتیک<sup>۳</sup>، حرارت و زمان؛
- برهم‌کنش اجزاء: برهم‌کنش متقابل اجزاء تشکیل دهنده سیستم.

بنابراین پدیده سایش را باید در قالب سیستم‌های خاصی تحت عنوان تریبوسیستم<sup>۴</sup>ها بررسی نمود (شکل ۱). در چنین سیستمی، بخشی که در معرض سایش است؛ جسم یکپارچه<sup>۵</sup> و بخش ایجاد کننده سایش، جسم مقابل<sup>۶</sup> خوانده می‌شود. بین این دو بخش، محیط میانی<sup>۷</sup> حضور دارد، که می‌تواند شامل خرده‌های حفاری و روان کننده‌ها باشد. کل چنین سیستمی در یک محیط مشخص، مانند هوا یا آب قرار می‌گیرد. تمامی مواد و فرآیندها در این سیستم با هم برهم‌کنش داشته و تاثیر مشخصی بر سایش جسم یکپارچه دارند. در فرآیند حفر سنگ، جسم یکپارچه، ابزار برنده و جسم مقابل، ماده سنگ موجود در برابر آن است. برهم‌کنش ابزار با سنگ؛ تحت بارها، سرعت‌های دورانی و حضور یا عدم حضور سیال تمیزکننده صورت می‌گیرد [۳].

با اینکه ساینده‌گی<sup>۸</sup> لغتی است عمومی، و برخی از سنگ‌ها به‌عنوان ساینده<sup>۹</sup> توصیف می‌شوند؛ اما مفهوم آن صریح و شفاف نیست. اینکه یک سنگ ساینده باشد یا نه، بستگی به ویژگی-های ابزار برنده (جسم یکپارچه) و سنگ (جسم مقابل)، تحت

دارای رفتار تنش - کرنش خاص خود، تحت نیروهای اعمالی است. بنابراین سختی به دست آمده بستگی به عوامل زیر خواهد داشت:

- **فرآیند برخورد:** هندسه و خواص مکانیکی ابزار، امتداد، طبیعت و بزرگی نیروها، دما و فشار محیط؛
- **سنگ‌شناسی:** راستا و اندازه کانی‌ها، شکل دانه‌ها و حضور یا عدم حضور ریزترک‌ها.



شکل ۲: عوامل موثر در سختی یک نمونه سنگی [۳]

با توجه به موارد فوق، عدم وجود یک روش کلی و استاندارد، در کاربردهای مهندسی، برای تعیین سختی مواد تا حدی قابل توجیه می‌باشد [۳].

مرسوم‌ترین و ساده‌ترین مقیاس برای ارزیابی سختی کانی-ها، مقیاس سختی موس<sup>۱۲</sup> است [۸]. این مقیاس براساس قابلیت هر کانی در ایجاد خراش بر روی کانی‌های دیگر، ارائه شده است. در این مقیاس، کانی‌ها با اعداد یک تا ده رتبه‌بندی شده و کانی قرار گرفته در هر رتبه، توانایی ایجاد خراش بر روی کانی‌های رتبه‌های پایین‌تر را دارد (جدول ۱). باید توجه داشت که این مقیاس تنها برای رتبه‌بندی کانی‌ها ارائه شده است و در آن، اختلاف میان سختی رتبه‌های متوالی را به هیچ عنوان نمی‌توان کمی و قابل اندازه‌گیری در نظر گرفت [۶].

برای برطرف کردن اشکال ذکر شده در مورد مقیاس سختی موس، می‌توان به‌جای آن از مقیاس سختی روزیوال<sup>۱۳</sup> [۹] بهره برد. این مقیاس، مبتنی است بر واکنش کانی‌ها در برابر یک پودر ساینده استاندارد، که در آن، مقدار ۱۰۰۰ به کروندوم<sup>۱۴</sup> نسبت داده شده و سختی بقیه کانی‌ها نسبت به آن سنجیده می‌شود (جدول ۱). در این حالت، اختلاف عددی میان سختی کانی‌های مختلف، به‌طور کمی معنی‌دار خواهند بود. بنابراین، استفاده از سختی روزیوال به جای سختی موس، به عنوان مقیاسی برای برآورد قابلیت سایشی سنگ‌ها، منطقی‌تر است [۶].

در مهندسی تریبولوژی، آزمایش‌های ویکرز<sup>۱۵</sup>، نوپ<sup>۱۶</sup>، برینل<sup>۱۷</sup> و راکول<sup>۱۸</sup>، آزمایش‌های دندان‌گذاری استاتیکی<sup>۱۹</sup> اند، که برای تعیین سختی مواد به‌کار می‌روند [۱۰]. تفاوت میان

روندهای پیش‌بینی ظرفیت سایشی سنگ‌ها، دامنه‌ای وسیع از مقیاس‌ها را پوشش می‌دهند. بر این اساس می‌توان آزمایش‌های مزبور را به صورت زیر تقسیم‌بندی نمود [۵]:

- آزمایش‌های کوچک مقیاس مبتنی بر تعیین سختی؛
- مدل‌های آزمایشی با مقیاس متوسط که بوسیله ابزارهای ساده شده اجرا می‌شوند؛
- آزمایش‌های حفاری صحرایی با مقیاس واقعی و مدل-های آزمایشی تمام مقیاس.

مسلماً هر آزمایش، بسته به مقیاس می‌تواند تاثیر برخی از عوامل را در بر گرفته و تاثیر برخی دیگر را نادیده گیرد. طبقه‌بندی بالا، به‌نوع دیگری نیز ارائه شده است و روش‌های ارزیابی ظرفیت ساینده‌گی سنگ‌ها را به دو گروه به‌شرح زیر تقسیم‌بندی شده‌اند [۶]:

- روش‌های سنگ‌شناسی؛
- روش‌های مکانیکی:
  - روش‌هایی که از نمونه‌های سنگ سالم استفاده می‌کنند؛
  - روش‌هایی که از خرده‌های سنگ استفاده می‌کنند.

در این مقاله، روش‌های مختلف آزمایشی ارزیابی ظرفیت سایشی سنگ‌ها مرور شده و کارایی آنها در ارزیابی سایش به وقوع پیوسته در برنده‌های یک TBM، مورد بحث و مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- روش‌های سنگ‌شناسی

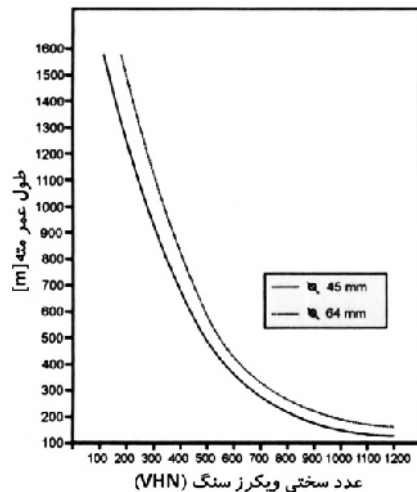
زمین‌شناسان، ساینده‌گی سنگ را بر اساس ساینده‌گی کانی‌های تشکیل دهنده آن، محاسبه می‌کنند. در این روش، درصد کانی‌های تشکیل دهنده سنگ تعیین شده و در ساینده‌گی مربوط به هر کدام، براساس مقیاس‌های موجود، ضرب می‌شود [۷]. متداول‌ترین مقیاس‌های مورد استفاده در این روش‌ها، مقیاس‌های مورد استفاده برای تعیین سختی<sup>۱۱</sup> کانی‌ها می‌باشند.

سختی عموماً به‌عنوان یکی از ویژگی‌های مهم موثر در فرآیند برش و مصرف ابزارهای برنده در نظر گرفته می‌شود. تا به حال تعریف جامعی برای سختی ارائه نشده است. اما معمولاً می‌توان آن را به‌عنوان مقاومت سنگ یا کانی، در برابر ابزار برنده، یا هر جسم دیگری که در آن نفوذ می‌کند، در نظر گرفت. شکل ۲ نشان می‌دهد که مقاومت سنگ در برابر ابزار، بستگی به بافت سنگ و کانی‌های موجود در آن دارد. هر کانی

شکل ۳ طول عمر مته‌های چالزنی را بر حسب عدد سختی ویکرز، برای مته‌های با قطر ۴۵ و ۶۴ میلی‌متر، نشان می‌دهد [۱۲]. در شکل ۴، نیز طول عمر مته‌های چالزنی در سنگ‌های مختلف، بر حسب محتوای کوارتز معادل، ترسیم شده است. کاملاً مشخص است که با افزایش درصد کوارتز معادل، عمر مته کم می‌شود. اما برخی از سنگ‌ها (مانند ماسه‌سنگ) دارای روندهای خاص خود هستند. این امر نشان می‌دهد، با اینکه محتوای کانی‌های ساینده یکی از پارامترهای موثر بر میزان سایش و عمر برنده‌هاست؛ اما پارامترهای تاثیر گذار دیگری نیز وجود دارند [۱۳].

پارامتر دیگری که می‌تواند در این گروه قرار گیرد، اندیس ساینده‌گی سنگ<sup>۳۱</sup> (RAI) است که با ضرب کردن محتوای کوارتز معادل در مقاومت فشاری تک محوره<sup>۳۲</sup> (UCS) به دست می‌آید [۵]. ارتباط طول عمر مته و مقدار RAI را می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد. با مقایسه این نمودار با نمودار شکل ۴، می‌توان دریافت که این پارامتر، نتایج نسبتاً بهتری در پیش‌بینی طول عمر مته‌ها در پی دارد.

آزمایش‌های واجهشی تعیین سختی، همچون چکش اشमित<sup>۳۳</sup> و سختی سنج شور<sup>۳۴</sup>، عموماً به‌عنوان روش‌هایی برای تعیین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک محوره سنگ‌ها شناخته شده‌اند [۱۴]. هر دوی این روش‌ها مبتنی بر اندازه‌گیری پاسخ جهشی برخورد یک جسم فولادی یا الماسی، بر سطح نمونه-های سنگی‌اند. کاربرد این آزمایش‌ها برای ارزیابی قابلیت ساینده‌گی سنگ‌ها بسیار محدود بوده و می‌توان به‌استفاده از ترکیب نتایج حاصل از چکش اشमित و آزمایش سایش تی‌بر<sup>۳۵</sup> برای پیش‌بینی کارایی ماشین‌های تونل‌زنی [۱۵] و استفاده از چکش اشमित نوع M برای ارزیابی قابلیت سایش مته‌ها [۱۶] اشاره نمود.



شکل ۳: طول عمر مته‌های چالزنی بر حسب عدد سختی ویکرز [۱۲]

این روش‌ها، اساساً مربوط به شکل و اندازه دندان‌های مورد استفاده برای بارگذاری است. برای کانی‌ها، معمولاً روش ویکرز کاربرد بیشتری دارد (جدول ۱). سختی ویکرز را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$HV = \frac{\text{بار}}{\text{سطح اثر دندانه}} \quad (1)$$

جدول ۱: مقیاس‌های مختلف سختی کانی‌ها [۳ و ۶]

کانی	سختی موس	سختی روزیوال	سختی ویکرز (MPa)
الماس <sup>۳۰</sup>	۱۰	۱۴۰۰۰۰	-
کروندوم	۹	۱۰۰۰	۲۳۰۰۰
توپاز <sup>۳۱</sup>	۸	۱۷۵	۱۸۵۰۰
کوارتز <sup>۳۲</sup>	۷	۱۲۰	۱۱۰۰۰
فلدسپات (ارتوز) <sup>۳۳</sup>	۶	۳۷	۸۰۰۰
آپاتیت <sup>۳۴</sup>	۵	۶/۵	۵۵۰۰
فلوئوریت <sup>۳۵</sup>	۴	۵	۱۷۵۰
کلسیت <sup>۳۶</sup>	۳	۴/۵	۱۲۵۰
ژیبس <sup>۳۷</sup>	۲	۰/۲۵	۴۰۰
تالک <sup>۳۸</sup>	۱	۰/۰۳	۲۰۰

سایش ابزارهای فولادی (با سختی موس حدود ۵/۵) اغلب توسط کانی‌هایی با سختی بالاتر از فولاد ایجاد می‌شود. همچنین از میان کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌ها، کوارتز (با سختی موس ۷) بیشترین فراوانی را در سنگ‌های مختلف دارد. بنابراین، در بررسی‌ها معمولاً محتوای کانی‌های ساینده یا کوارتز معادل سنگ‌ها، با استفاده از آنالیزهای مقطع نازک یا XRD، تعیین می‌گردد. در این حالت، سختی کوارتز معادل ۱۰۰٪ فرض شده و سختی بقیه کانی‌ها نسبت به آن تعیین می‌شود و با استفاده از رابطه زیر، محتوای کانی‌های ساینده<sup>۳۹</sup> (AMC) یا محتوای کوارتز معادل<sup>۳۰</sup> (EQC) به دست می‌آید [۱۱]:

$$EQC \text{ or } AMC = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \quad (2)$$

که در آن:

$A_i$  درصد ترکیبی کانی  $i$  (٪)

$R_i$  سختی کانی نسبت به کوارتز (٪)

$n$  تعداد کانی‌های موجود در سنگ

در صورتی که از مقیاس موس برای تعیین سختی کانی‌ها استفاده شود، عدد حاصل AMC، و هنگامی که از مقیاس روزیوال استفاده گردد، حاصل EQC خواهد بود.

## ۳- مدل‌های آزمایشی ساده شده

ترکیب‌های آزمایشی بسیار متفاوتی برای مطالعه سایش مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی‌های آزمایشگاهی سایش، معمولاً با مطالعه سازوکارهای سایش و یا شبیه‌سازی فرآیندهای واقعی، انجام گرفته و اطلاعات مفیدی در مورد نرخ سایش و ضریب اصطکاک به دست می‌آید. در هر صورت، کنترل و اندازه‌گیری تمام متغیرهایی که می‌توانند سایش را تحت تاثیر قرار دهند، دارای اهمیت فراوان است. اصطکاک و نرخ سایش، اغلب شدیداً وابسته به شرایط حرکت نسبی اند و تغییرات نسبتاً جزئی در این شرایط، می‌تواند تاثیری اساسی در سازوکار حاکم و نرخ سایش مربوطه ایجاد کند. بنابراین کنترل دقیق و نظارت نزدیک بر شرایط انجام آزمایش، برای دستیابی به نتایج قابل قبول، ضروری خواهند بود [۱۷].

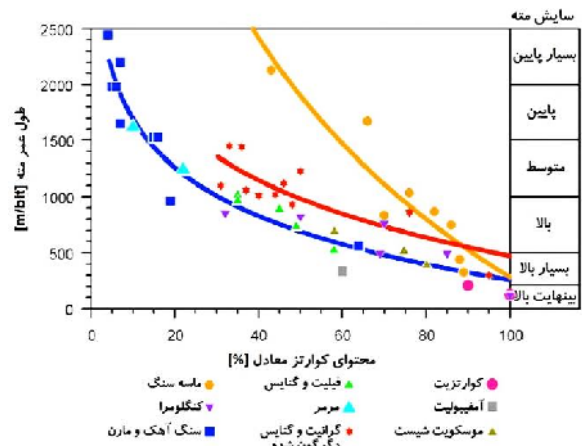
شکل ۷، ترکیب‌های هندسی معمول، در تجهیزات به کار رفته برای انجام آزمایش سایش را نشان می‌دهد. روش‌های به نمایش درآمده در این شکل را می‌توان به دو گروه تقسیم نمود:

- گروهی که سطح لغزش متقارنی دارند و در آنها نرخ سایش در دو سطح، در صورتی که دارای جنس مشابه باشند، باید یکسان باشد.

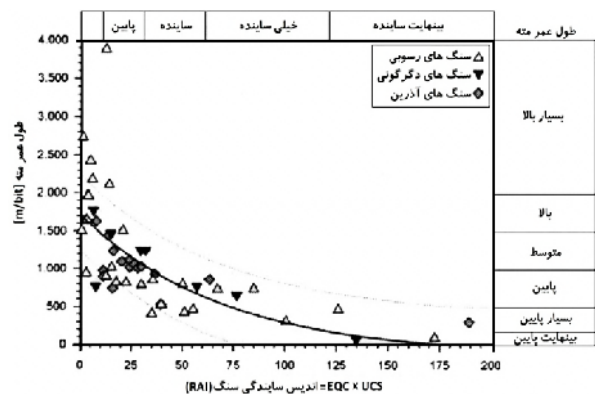
- دسته دوم، که متداول‌ترند، هنگامی به کار می‌روند که با یک سیستم نامتقارن سر و کار داشته باشیم و در آن، دو جسم در حال لغزش، حتی اگر از مواد یکسانی ساخته شده باشند، دارای نرخ‌های سایش متفاوتی خواهند بود.

دستگاه‌هایی که از ترکیب رینگ بر روی رینگ (یا دو دیسک) استفاده می‌کنند، در گروه سطوح لغزش متقارن قرار می‌گیرند. سطح تماس در این حالت می‌تواند تشکیل یک خط (شکل ۷-الف) یا یک صفحه (شکل ۷-ب) را دهد. چنین ابزارهایی هنگامی واقعاً متقارن خواهند بود که هر دو جزء، در حال دوران باشد. برای مطالعه سایش، اغلب از ترکیب‌های متقارن استفاده نمی‌شود [۱۸].

اکثر تجهیزات آزمایشی نامتقارن، از یک پین که بر روی یک دیسک دوار فشرده می‌شود، تشکیل می‌گردند. پین می‌تواند بر روی سطح دیسک (شکل ۷-پ) یا محیط پیرامونی آن (شکل ۷-ت) قرار گیرد. همچنین می‌توان یک بلوک را بر روی رینگ (شکل ۷-ث) قرار داد یا پین را بر روی یک سطح صاف (شکل ۷-ج) بارگذاری نمود. در تمامی این موارد، تماس می‌تواند بر روی سطحی با اندازه اسمی مشخص (مانند پین‌هایی با انتهای صاف بر روی دیسک مسطح)، یا یک خط (یک بلوک

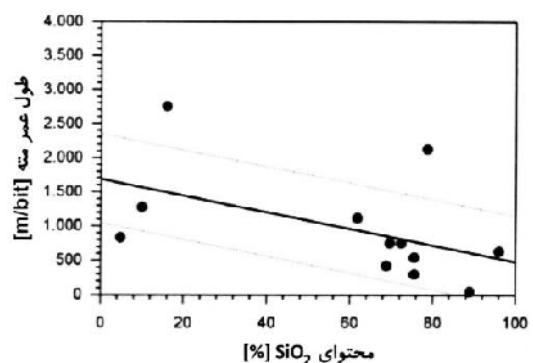


شکل ۴: طول عمر مته‌های چالزنی، بر حسب درصد کوارتز معادل سنگ [۱۳]

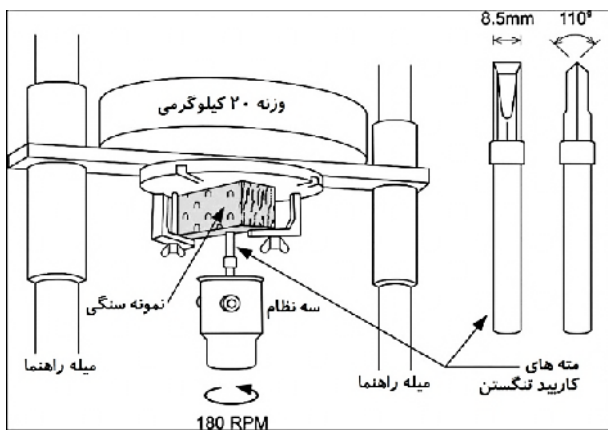


شکل ۵: طول عمر مته بر حسب اندیس ساینده‌گی سنگ (RAI) [۵]

نهایتاً، محتوای سیلیس سنگ‌ها نیز به‌عنوان معیاری برای ساینده‌گی آنها پیشنهاد شده است. میزان  $\text{SiO}_2$  سنگ، بوسیله آنالیزهای شیمیایی و بر روی نمونه‌هایی از پودر سنگ، تعیین می‌شود و نه تنها میزان کوارتز موجود در آن، بلکه مقادیر سایر کانی‌های سیلیکاته همچون فلدسپات‌ها، میکاها و کانی‌های رسی را نیز در بر می‌گیرد [۶]. در شکل ۶، طول عمر مته بر حسب محتوای  $\text{SiO}_2$  حاصل از آنالیزهای XRD برای ۱۲ نمونه سنگی ترسیم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان  $\text{SiO}_2$  ارتباط چندان خوبی با طول عمر مته نشان نمی‌دهد [۵].

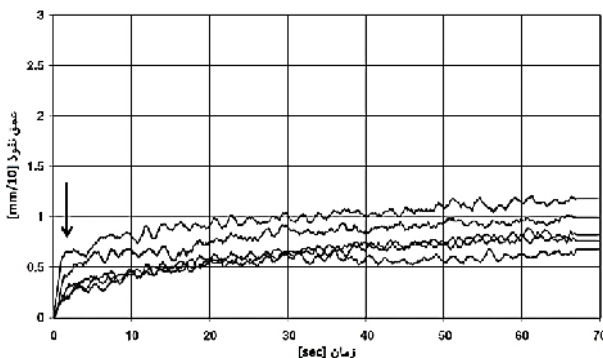


شکل ۶: طول عمر مته بر حسب محتوای  $\text{SiO}_2$  سنگ [۵]



شکل ۸: طرح شماتیک و دستگاه آزمایش چال خوری سیورز - J [۱۹]

و [۲۱]



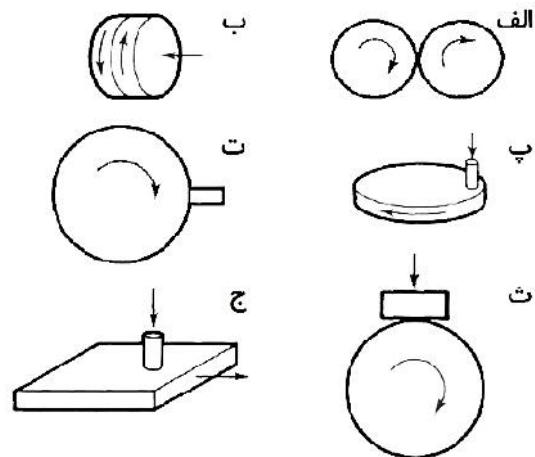
شکل ۹: نمودار عمق نفوذ بر حسب زمان (نقطه شکست نرخ نفوذ با

فلش مشخص شده است) [۲۰]

## ۳-۲- سیستم آزمایشی NTNU

این سیستم در دهه ۱۹۶۰ در دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ<sup>۴۰</sup> (NTNU) و برای ارزیابی قابلیت حفاری ضربه‌ای معرفی شده است [۲۲]. این روش به عنوان روش SINTEF نیز شناخته شده و امروزه به عنوان یکی از روش‌های اصلی پیش‌بینی کارایی ماشین‌های تونل‌زنی به شمار می‌رود. روش NTNU/SINTEF از مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی تشکیل شده است که عبارتند از: آزمایش تردی، آزمایش قابلیت چال خوری سیورز و آزمایش سایش.

صفحه‌ای بر روی رینگ)، و یا یک نقطه (بین با انتهای نقطه‌ای بر روی دیسک) انجام گیرد. در ترکیب‌های نامتقارن، یکی از اجزاء که معمولاً پین یا بلوک است، تحت تاثیر حرکت نمونه قرار می‌گیرد و نرخ سایش بر روی آن اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۷: ترکیب‌های هندسی مورد استفاده در آزمایش‌های سایش. الف و ب) سطوح لغزش متقارن. پ، ت، و ج) سطوح لغزش نامتقارن [۱۸]

۳-۱- آزمایش چال خوری سیورز - J<sup>۳۶</sup>

یکی از روش‌های آزمایشی مستقیم برای تخمین عمر مته، مبتنی است بر اصول آزمایش چال خوری سیورز - J. از این آزمایش برای تعیین سختی سطحی نمونه‌های سنگی نیز استفاده می‌شود. در این آزمایش با استفاده از مته‌ای مینیاتوری به قطر ۸/۵ میلی‌متر که با سرعت ۱۸۰ دور بر دقیقه و به تعداد ۲۰۰ دور دوران می‌کند، چالی مینیاتوری در سنگ حفر می‌شود. بار اعمالی برای حفر سنگ ثابت و معادل ۲۰ کیلوگرم است. میانگین عمق ۴ تا ۸ چال، بر حسب ۰/۱ میلی‌متر، به عنوان مقدار سیورز - J (S<sub>r</sub>) گزارش می‌شود [۱۹]. طرح کلی آزمایش در شکل ۸ به نمایش درآمده است.

داهل و همکاران<sup>۳۷</sup> با ابزاربندی این دستگاه، عمق نفوذ را به صورت همزمان و پیوسته<sup>۳۸</sup> اندازه‌گیری کرده و نمودارهایی را، همانند آنچه در شکل ۹ به نمایش درآمده است، به دست آوردند. آنها چنین استدلال کردند که در سنگ‌های ساینده‌ای چون کوارتزیت<sup>۳۹</sup>، در ابتدای آزمایش نرخ نفوذ بالاست. اما بعد از چند ثانیه، به دلیل سایش مته این نرخ کاهش می‌یابد. وقوع این تغییر در شیب نمودار نفوذ - زمان، به عنوان مبنایی برای ارزیابی عمر موثر مته‌های حفاری معرفی شده است [۲۰].



(شکل ۱۲). این نمونه بر روی گیره بسته شده و سطح بالایی سنگ به صورت افقی قرار می‌گیرد [۳۱]. در هر آزمایش، پنج پین بر روی نمونه کشیده می‌شود. این کار در دو جهت مختلف انجام می‌شود و در نهایت، میانگین ۱۰ اندازه‌گیری صورت گرفته، به عنوان نتیجه آزمایش گزارش می‌شود [۳۲].

پهن شدگی ناشی از سایش نوک پین، با استفاده از یک میکروسکوپ 24X که به میکرومتری با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر مجهز است، اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری قطر پهن شده نوک پین، در دو امتداد عمود بر هم انجام شده و مقدار میانگین آن تعیین می‌شود. با انجام آزمایش و تعیین میانگین پهن‌شدگی نوک پین‌ها، مقدار اندیس سایش سرشار<sup>۵۲</sup> (CAI) توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$CAI = 10d \quad (۵)$$

d قطر پهن‌شدگی سایشی نوک پین بر حسب mm می‌باشد [۳۳]. بر اساس مقادیر به دست آمده برای CAI، ساینده‌گی سنگ‌ها را می‌توان با توجه به جدول ۳ طبقه‌بندی کرد [۳۰].



شکل ۱۱: پین‌های مورد استفاده برای انجام آزمایش سرشار



شکل ۱۲: دستگاه تعیین اندیس سایش سرشار طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه مهندسی زمین دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران

سنگ خراش داده خواهد شد. فاصله میان شیارهای مجاور ایجاد شده، ۰/۵ میلی‌متر بوده و نمونه در کل، ۱۰۰ دور با سرعت دورانی ۲۵ دور بر دقیقه دوران خواهد نمود. کل فاصله-ای که پین به این ترتیب بر روی نمونه طی می‌کند، ۱۶ متر است. پس از پایان آزمایش، کاهش وزن پین تعیین می‌شود. بر روی هر نمونه سنگی ۱۰ آزمایش انجام شده و مقدار میانگین گزارش می‌شود [۲۹].

با انجام این آزمایش بر روی نمونه‌هایی از سنگ مصنوعی (بتن با مقادیر مختلفی از کوارتز به ابعاد متفاوت) و مقایسه مقادیر سایش پین با مقاومت کششی، محتوای کوارتز و ابعاد دانه‌های سنگ‌های مورد بررسی، ارتباطی خطی میان حاصل-ضرب پارامترهای یاد شده و کاهش وزن پین‌های فولادی، به دست آمده است. این حاصل‌ضرب، فاکتور سایش F خوانده می‌شود، که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$F = \frac{Qtz_{eq} \times \phi \times BTS}{100} \quad (۴)$$

که در آن:

$Qtz_{eq}$ ، محتوای کوارتز معادل (%/);

$\phi$ ، قطر متوسط دانه‌ها (mm)

BTS، مقاومت کششی برزیلی (MPa)

F پارامتری معمول برای ارزیابی ساینده‌گی سنگ‌هاست و در جدول ۲، طبقه‌بندی پیشنهادی برای ظرفیت سایشی سنگ‌ها بر اساس مقدار F ارائه شده است.

جدول ۲: طبقه‌بندی سایشی سنگ‌ها بر اساس مقدار F [۳]

رتبه مصرف قلم‌های ساینده	ساینده‌گی	فاکتور سایش شیمازک (F)
100 m <sup>3</sup> /p.p.	ساینده‌گی کم	F < 0.05 N/mm
	ساینده	0.05 < F < 0.1
	ساینده‌گی بالا	0.1 < F < 0.5
10 m <sup>3</sup> /p.p.	بینهایت ساینده	F > 0.5 N/mm

### ۳-۵- آزمایش سرشار<sup>۵۰</sup>

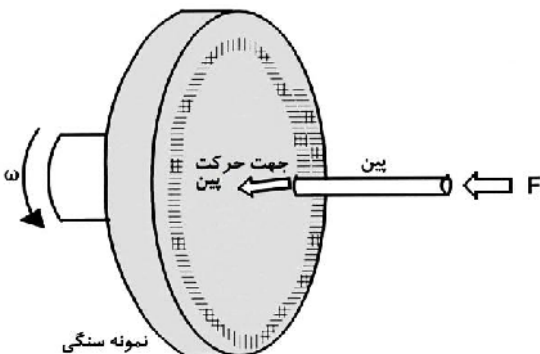
آزمایش سرشار برای نخستین بار توسط انستیتو سرشار<sup>۵۱</sup> فرانسه، در اوایل دهه ۱۹۷۰ معرفی شد [۳۰]. یک پین فولادی استوانه‌ای، که راس آن مخروطی دوار با زاویه راس  $(90 \pm 3)^\circ$  و نوک نقطه‌ای است، برای انجام آزمایش سرشار مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۱۱). پین مزبور، تحت بار استاتیکی 70N (7KgF)، بر روی سطح سنگ قرار می‌گیرد و به فاصله ۱۰ میلی‌متر، بر روی آن کشیده می‌شود. نمونه‌ای سنگ با ابعاد مناسب انتخاب می‌شود، تا بر روی فک‌های گیره محکم گردد



نزدیک‌تر شدن پین به بخش مرکزی دیسک، سرعت خطی نسبی میان پین و دیسک به دلیل کاهش شعاع دوران، افزایش می‌یابد. بنابراین سرعت دوران دیسک به صورت اتوماتیک تغییر می‌کند؛ تا سرعت نسبی میان دیسک و پین، ثابت بماند. آزمایش‌های زیادی با این ترکیب صورت گرفته و تاثیر عوامل زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

- نوع و سختی فولاد پین؛
  - قطر سطح تماس میان پین و دیسک؛
  - سرعت شعاعی حرکت پین بر روی دیسک؛
  - فشار قائم اعمالی بر روی پین؛
  - سرعت مماسی نمونه در زیر پین؛
  - تاثیر صیقل کردن و آماده‌سازی نمونه؛
- خلاصه مهم‌ترین نتایج حاصل از این بررسی‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۳]:

- نیروی قائم اعمال شده بر پین، بیشترین تاثیر را در میزان سایش‌های اندازه‌گیری شده دارد.
- در سرعت‌های بالا، دماهای تولید شده می‌توانند موجب تغییر سختی پین فولادی شوند.
- حرکت پین بر روی سطح دیسک، موجب صیقل خوردن سطح آن در محل شیار ایجاد شده می‌شود. بنابراین، پین نباید بر روی سطح خراشیده شده قبلی بلغزد.
- کاهش قطر پین مورد استفاده، موجب کاهش پراکندگی نتایج می‌شود. در قطرهای پایین‌تر، می‌توان سرعت شعاعی حرکت پین بر روی نمونه را کاهش داد و طول بیشتری از حرکت پین بر روی نمونه به دست آورد.
- زبری سطح نمونه بر نتایج تاثیرگذار است و باید از روندهای یکسانی برای آماده‌سازی نمونه‌ها بهره برد.



شکل ۱۴: اصول اجرای آزمایش پین روی دیسک بوسیله دستگاه تراش [۳۷]

جدول ۳: طبقه‌بندی ساینده‌های سنگ‌ها بر اساس اندیس CAI [۳۴]

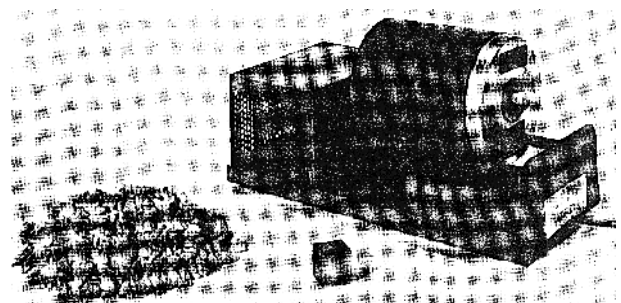
مقدار CAI	توصیف ساینده‌گی
$< 0/3$	غیر ساینده
$0/3 - 0/5$	کمی ساینده
$0/5 - 1/0$	ساینده‌گی متوسط
$1/0 - 2/0$	ساینده
$2/0 - 4/0$	خیلی ساینده
$4/0 - 6/0$	بینهایت ساینده
$> 6/0$	کوارتز

۳-۶- آزمایش سایشی تعدیل شده تی بر<sup>۵۳</sup>

این آزمایش برای بررسی ساینده‌گی دیسکی به ضخامت ۶ میلی‌متر که از مغزه‌ای با قطر ۵۰ میلی‌متر تهیه می‌شود، انجام می‌گیرد. دیسک به تعداد ۸۰۰ دور (۴۰۰ دور در هر رویه) دوران می‌کند. در حالی که بر روی آن چرخ ساینده‌ای با وزن ۲۵۰ گرم بارگذاری شده است. ساینده‌گی سنگ با اندازه‌گیری کاهش وزن چرخ ساینده، که بر حسب میلی‌گرم بیان می‌شود، تعیین می‌گردد. مقادیر به دست آمده از ۰/۳ برای ماسه‌سنگ تا ۵۷ برای سنگ آهک دولومیتی، تغییر می‌کنند [۳۵].

۳-۷- آزمایش مکعب فولادی<sup>۵۴</sup>

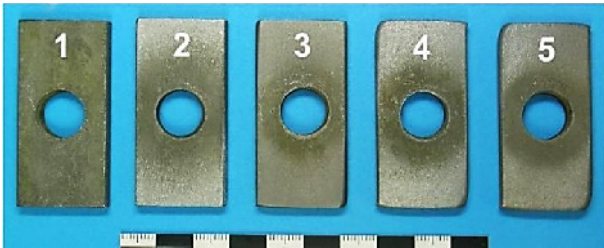
در این آزمایش، یک مکعب فولادی به ضلع یک اینچ، در داخل محفظه‌ای همراه با ۹۰۰ گرم از خرده‌های نمونه سنگی، که در داخل آب و در حالت اشباع قرار دارند، به مدت سه ساعت دوران می‌کند. اتلاف جرم مکعب فولادی به ازاء هر ساعت دوران، که به صورت درصدی از جرم اولیه بیان می‌شود، به عنوان معیاری برای ساینده‌گی سنگ شناخته می‌شود. تجهیزات و نمونه مورد استفاده برای انجام آزمایش، در شکل ۱۳ ارائه شده است [۳۶].



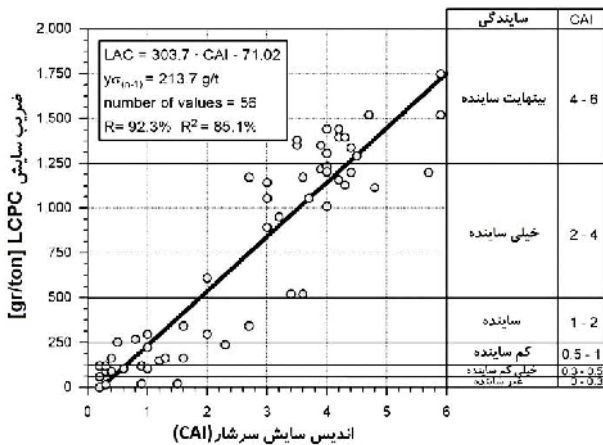
شکل ۱۳: تجهیزات و نمونه مورد استفاده در آزمایش مکعب فولادی [۳۶]

۳-۸- آزمایش پین روی دیسک<sup>۵۵</sup>

اصول آزمایش پین روی دیسک، که بوسیله یک دستگاه تراش اجرا می‌شود، در شکل ۱۴ به نمایش درآمده است [۳۷]. با



شکل ۱۶: پروانه فولادی مورد استفاده در آزمایش LCPC، ۱- قبل از آزمایش، ۲- سنگ آهک (غیر ساینده)، ۳- ماسه سنگ کوارتزی (ساینده)، ۴- دیوریت (خیلی ساینده)، ۵- کوارتز رگه‌ای (بینهایت ساینده) [۳۹]



شکل ۱۷: ارتباط ضریب سایش LCPC و اندیس سایش سرشار (CAI) [۴۰]

### ۳-۱۰- آزمایش سایش مغزه<sup>۵۸</sup>

نمونه‌ای استوانه‌ای از سنگ به طول ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۷۵ میلی‌متر، بر روی ماشین تراش سوار شده و با سرعت ۵۰ دور در دقیقه به دوران در می‌آید. در حین انجام آزمایش، یک قلم قابل تعویض، که با محور مغزه زاویه حدود ۴۵ درجه می‌سازد، بر روی سطح خارجی مغزه قرار گرفته و با سرعت ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر در هر دور، بر روی آن حرکت می‌کند (شکل ۱۸). در این شرایط، مسافتی در حدود ۲۵ تا ۱۰۰ متر از سطح سنگ سائیده می‌شود. سایش را می‌توان با اندازه‌گیری جرم از دست رفته قلم، در واحد طول برش و یا پهن‌شدگی نوک قلم در انتهای آزمایش، تعیین نمود [۴۱]. در این آزمایش می‌توان قلم را با شکل و جنس ابزارهای برنده مورد استفاده در دستگاه‌های حفاری، به کار برد.

### ۳-۹- آزمایش LCPC<sup>۵۶</sup>

آزمایش LCPC توسط مرکزی به همین نام در فرانسه و در دهه ۱۹۸۰ معرفی شده است [۳۸]. سایش سنج LCPC از یک موتور ۷۵۰ واتی تشکیل شده است که به یک پروانه فولادی متصل است. پروانه از جنس فولاد، با سختی راکول ۶۰ تا ۷۵ بوده و دارای ابعاد  $5 \times 25 \times 50$  mm است. این پروانه در داخل یک مخزن استوانه‌ای قرار می‌گیرد که دربرگیرنده نمونه آزمایشی است (شکل ۱۵).

آزمایش بر روی ۵۰۰ گرم از نمونه خشک شده در هوا، با ابعاد ۴ الی ۶/۳ میلی‌متر انجام می‌گیرد. پروانه فولادی با سرعت ۴۵۰۰ دور بر دقیقه و به مدت پنج دقیقه در داخل ظرف نمونه دوران می‌کند. برای تعیین میزان ساینده‌گی نمونه، وزن پروانه قبل و بعد از آزمایش (شکل ۱۶) تعیین می‌شود. ضریب سایشی<sup>۵۷</sup> (LAC) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۳۹]:

$$LAC = \frac{m_0 - m}{M} \quad (۶)$$

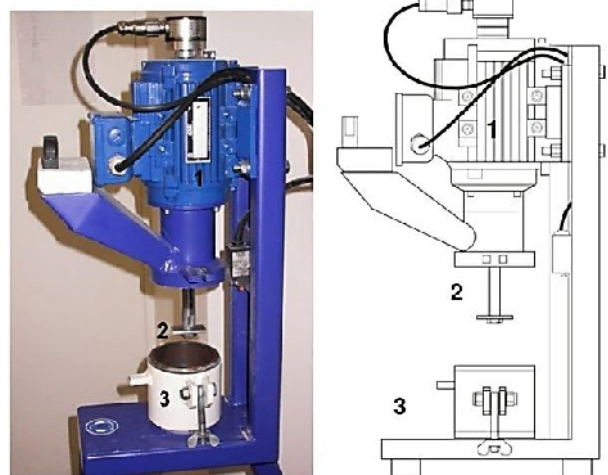
که در آن:

$m_0$ ، وزن اولیه پروانه

$m$ ، وزن پروانه بعد از آزمایش

$M$ ، وزن نمونه

ضریب LAC معمولاً برحسب گرم بر تن نمونه آزمایشی، بیان می‌شود. طبقه‌بندی سایشی سنگ‌ها بر اساس نتایج آزمایش LCPC و ارتباط آن با طبقه‌بندی سرشار را می‌توان در شکل ۱۷ مشاهده کرد [۴۰].



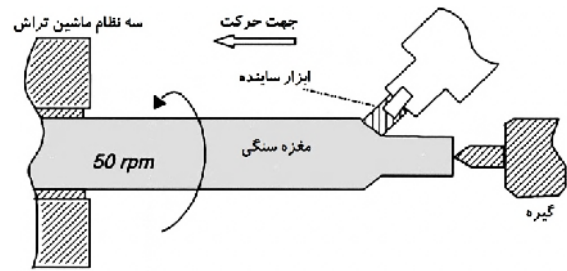
شکل ۱۵: دستگاه آزمایش LCPC، ۱- موتور الکتریکی، ۲- پروانه فولادی، ۳- ظرف نمونه [۳۹]

وضعیت موجود در فرآیند واقعی سایش باشند. به بیان دیگر، برای بررسی سایش در اجزاء هر سیستم، باید آزمایشی متناسب با مواد، سازوکارها و محیط دربرگیرنده آن سیستم، طراحی نمود.

با توجه به موارد یاد شده، در ادامه کارآیی آزمایش‌هایی که تا به حال مرور شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بررسی، ویژگی‌های جسم یکپارچه (بخش در معرض سایش - ابزار برنده) و جسم مقابل (بخش ایجاد کننده سایش - سنگ) به کار رفته در آزمایش، با وضعیتی که به هنگام حفر مکانیزه سنگ، توسط دیسک‌های یک TBM به وجود می‌آید؛ مقایسه می‌شود. در مورد جسم مقابل (سنگ)، تاثیر ترکیب کانی-شناسی، اندازه و شکل دانه‌ها و اتصالات بین‌دانه‌ای (مقاومت مکانیکی) بر نتایج آزمایش، مورد بحث قرار گرفته است. برای جسم یکپارچه (برنده) نیز تشابه هندسه بارگذاری و سازوکار-های حرکت، بررسی شده‌اند. نهایتاً برای سهولت مقایسه کارآیی روش‌های مختلف، بر اساس پارامترهای یاد شده، جدولی از امتیازها برای هر کدام از روش‌های آزمایشی تهیه شده است.

روش‌های پترولوژیکی: تنها پارامتری که در این روش‌ها تعیین می‌شود، سختی کانی‌های تشکیل دهنده سنگ است و عوامل دیگری همچون شکل و اندازه دانه‌های تشکیل دهنده و مقاومت مکانیکی سنگ، مورد توجه قرار نمی‌گیرند. روندهای مختلفی که در شکل ۴، برای طول عمر مته‌های چالزنی بر حسب درصد کوارتز معادل مشاهده می‌شود؛ به خوبی نشان‌گر این است که علاوه بر سختی، پارامترهای دیگری نیز در رفتار سایشی سنگ‌ها موثرند. در این روش‌ها، جسم یکپارچه نیز حضور ندارد و بنابراین، ویژگی‌های هندسی جسم یکپارچه و سازوکارهای حرکت نیز تاثیری بر نتایج حاصل نخواهند داشت. با توجه به موارد یاد شده، در جدول ۴، تنها ستون مربوط به سختی کانی‌ها، دارای امتیاز ۱ بوده و بقیه ستون‌ها امتیاز صفر خواهند داشت. با وجود کاستی‌های یاد شده، این روش یکی از کم هزینه‌ترین و ساده‌ترین روش‌های ارزیابی ویژگی‌های سایشی سنگ‌هاست که می‌تواند در مطالعات اولیه مورد توجه قرار گیرد.

آزمایش چالخوری سیورز -  $\lambda$ : در این آزمایش، از نمونه‌های سنگ سالم استفاده می‌شود. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که سختی کانی‌ها، شکل و اندازه دانه‌ها و مقاومت مکانیکی سنگ، بر نتایج حاصل، تاثیر گذار باشند. بنابراین در جدول ۴، این پارامترها امتیاز ۱ را به خود اختصاص می‌دهند. هندسه

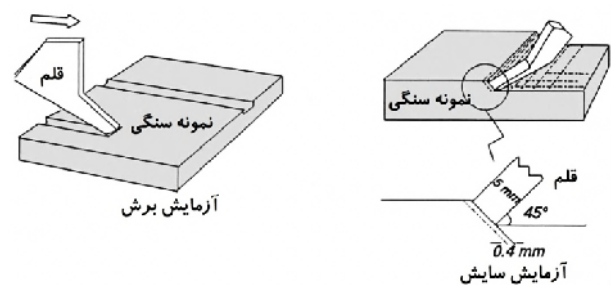


شکل ۱۸: ترکیب مورد استفاده برای انجام آزمایش سایش مغزه [۴۱]

### ۳-۱۱- آزمایش برش بر روی دستگاه فرز<sup>۵۹</sup>

بر روی یک دستگاه فرز، می‌توان آزمایش‌های برش و سایش را به صورت نشان داده شده در شکل ۱۹ انجام داد. عمق شیار ایجاد شده در آزمایش برش، ۵ میلی‌متر و در آزمایش سایش، ۰/۴ میلی‌متر است. نرخ سایش،  $W$ ، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴۲]:

$$W = \frac{\text{حجم از دست رفته پین}}{\text{مسافت لغزش}} \quad (۷)$$



شکل ۱۹: مشخصات آزمایش‌های برش و سایش بر روی دستگاه فرز [۴۲]

### ۴- نقدی بر آزمایش‌های ساینده سنگ‌ها

برخلاف ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، که جزو خواص ذاتی آنها به شمار می‌آیند، ویژگی‌های سایشی سنگ‌ها، همانند مواد دیگر، ویژگی‌هایی رفتاری اند. همان‌گونه که ذکر شد، نرخ سایش به وقوع پیوسته، بستگی به اجزاء تشکیل دهنده سیستم، متغیرهای عملیاتی، برهم‌کنش متقابل اجزاء تشکیل دهنده سیستم و محیط مورد بررسی دارد [۲]. بنابراین، ارزیابی دقیق از سایش به وقوع پیوسته در یک سیستم، باید با در نظر گرفتن تمامی عوامل یاد شده، صورت گیرد.

تنوع زیاد آزمایش‌های ساینده سنگ‌ها، به خوبی نشان‌گر عدم وجود یک روش کلی و مورد قبول متخصصین مکانیک سنگ و حفاری، به‌منظور برآورد ویژگی‌های سایشی آنهاست. دلیل اصلی این امر را می‌توان ناشی از ماهیت رفتاری، و نه ذاتی، سایش دانست. بدون شک، آزمایشی ایده‌آل خواهد بود که اجزاء درگیر، مکانیزه‌های حرکت و محیط انجام آن، مشابه

بر روی پودر سنگ حاصل می‌شود، تنها سختی کانی‌ها بر آن تاثیر گذارند. بنابراین، با توجه به تاثیر دو آزمایش یاد شده در نتیجه نهایی، امتیازهای مربوط به پارامترهای جسم مقابل، مانند آزمایش چال‌خوری سیورز، ۱ خواهند بود. هندسه بارگذاری و سازوکارهای حرکت برنده‌های TBM، تشابهی با آزمایش چال‌خوری ندارند؛ اما در آزمایش AVS، جسم یکپارچه مشابه قطعات مورد استفاده در برنده‌های TBM اند. بنابراین، تشابه هندسه بارگذاری تا حدودی وجود دارد (امتیاز ۱)؛ اما تشابه چندانی میان سازوکار حرکت برنده بر روی سنگ سالم (در شرایط واقعی)، با حرکت آن بر روی پودر سنگ (در شرایط آزمایشی) وجود ندارد و امتیاز مربوط به این پارامتر، صفر منظور می‌شود. بر این اساس، امتیاز مربوط به پارامترهای مربوط به سیستم آزمایشی NTNU را می‌توان در جدول ۴، مشاهده کرد.

بارگذاری و سازوکار حرکت، تشابه چندانی با وضعیت برنده‌های نصب شده بر روی کله برشی یک TBM، نخواهد داشت و امتیاز صفر در برابر آنها ثبت می‌شود (جدول ۴). با این حال، این شرایط، بسیار مشابه مته‌های چالزنی دورانی بوده و می‌توان از این آزمایش، انتظار نتایج خوبی برای بررسی رفتار سایشی سنگ در مقابل مته‌های حفاری دورانی، بویژه مته‌های تیغه‌ای، داشت. اما باید توجه داشت که سازوکار ضربه موجود در روش‌های ضربه‌ای - دورانی، در این آزمایش حضور ندارد.

سیستم آزمایشی NTNU: این آزمایش، ترکیبی از سه آزمایش مختلف بوده و پر هزینه‌تر است. در کاربردهای TBM، اندیس CLI با ترکیب نتایج حاصل از آزمایش چال‌خوری و سایش (AVS) تعیین می‌شود. همان‌گونه که قبلاً بحث شد، پارامترهای مربوط به جسم مقابل، یا سنگ، بر روی آزمایش چال‌خوری تاثیر گذارند. اما از آنجا که مقدار AVS با آزمایش

جدول ۴: سیستم امتیاز بندی مورد استفاده برای ارزیابی کارایی روش‌های آزمایشی مختلف

ملاحظات	امتیاز جسم یکپارچه		امتیاز جسم مقابل			نوع آزمایش
	سازوکار حرکت	هندسه بارگذاری	مقاومت مکانیکی	اندازه و شکل دانه‌ها	سختی کانی‌ها	
ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش. مناسب برای مطالعات اولیه.	۰	۰	۰	۰	۱	۱. روش‌های پترولوژیکی
مناسب برای بررسی سایش در مته-های تیغه‌ای حفاری دورانی.	۰	۰	۱	۱	۱	۲. آزمایش چال‌خوری سیورز - J (۱۹۵۰)
دارای هزینه نسبی بالا، در مقایسه با سایر روش‌های آزمایشی.	۰	۱	۱	۱	۱	۳. سیستم آزمایشی NTNU (۱۹۶۰)
تا حدودی مناسب برای بررسی سایش در اره‌های سنگ‌بری.	۰	۰	۱	۱	۱	۴. آزمایش اره (۱۹۷۰)
	۰	۰/۵	۱	۱	۱	۵. آزمایش شیمازک (۱۹۷۰)
	۰/۵	۰/۵	۱	۱	۱	۶. آزمایش سرشار (۱۹۷۳)
	۰	۰	۱	۱	۱	۷. آزمایش تعدیل شده تی‌بر (۱۹۷۵)
تا حدودی مناسب برای بررسی سایش در آسیاها.	۰	۰	۰	۰	۱	۸. آزمایش مکعب فولادی (۱۹۷۷)
	۰	۰/۵	۱	۱	۱	۹. آزمایش پین روی دیسک (۱۹۸۰)
مناسب برای بررسی سایش در سیستم‌های دوغابی و EPB	۰	۰	۰	۰	۱	۱۰. آزمایش LCPC (۱۹۸۰)
	۰	۰	۱	۱	۱	۱۱. آزمایش سایش مغزه (۱۹۸۷)
داده‌های چندانی در خصوص ارتباط نتایج با شرایط واقعی موجود نیست.	۰/۵	۰/۵	۱	۱	۱	۱۲. آزمایش برش بر روی دستگاه فرز (۱۹۸۸)

جدول ۴، امتیاز ۰/۵ برای پارامترهای جسم یکپارچه در نظر گرفته می‌شود.

آزمایش سایشی تعدیل شده تی‌پر: استفاده از یک دیسک سالم تهیه شده از مغزه سنگی، موجب اعمال تاثیر پارامترهای جسم مقابل، در نتایج به دست آمده، می‌شود و این پارامترها، امتیاز ۱ را در جدول ۴ به خود اختصاص می‌دهند. اما بین هندسه بارگذاری و سازوکار اعمال حرکت مورد استفاده با شرایط واقعی مورد نظر، تشابهی وجود ندارد و امتیاز پارامترهای مربوطه صفر خواهند بود.

آزمایش مکعب فولادی: در این آزمایش، نمونه سنگی به صورت قطعات خرد شده حضور دارد. بنابراین، از میان پارامترهای مربوط به جسم مقابل، تنها سختی کانی‌ها تاثیر گذار بوده و امتیاز ۱ می‌گیرد. همچنین هیچ‌گونه تشابهی میان شرایط جسم یکپارچه حاضر در این آزمایش، با شرایط واقعی وجود ندارد و پارامترهای مربوط به جسم یکپارچه نیز دارای امتیاز صفر خواهند بود. این آزمایش، تاحدودی مشابه آسیاهای مورد استفاده برای کاهش ابعاد قطعات سنگی است. البته باید توجه داشت که در آسیاها نیز، به جای قطعات مکعبی فولادی، از گلوله‌ها و میله‌ها جهت اعمال بار، استفاده می‌شود.

آزمایش پین روی دیسک: شرایط اجرای این آزمایش، تقریباً مشابه آزمایش شیمازک است. بنابراین امتیازهای اختصاص یافته برای این دو آزمایش، یکسان در نظر گرفته می‌شوند (جدول ۴).

آزمایش LCPC: در این آزمایش نیز همانند آزمایش مکعب فولادی، نمونه سنگ مورد نظر، قبلاً به صورت پودری با ابعاد مشخص درمی‌آید. بنابراین، از میان پارامترهای جسم مقابل، تنها پارمتر تاثیر گذار، سختی کانی‌های حاضر خواهد بود و امتیاز ۱ را به خود اختصاص خواهد داد. تشابهی نیز میان هندسه و سازوکار دوران یک پروانه فولادی، با سرعت ۴۵۰۰ دور بر دقیقه، و هندسه و سازوکار حرکت دیسک‌های TBM بر روی سطح سنگ، وجود ندارد و پارامترهای مربوط به جسم مقابل، دارای امتیاز صفر خواهند بود (جدول ۴).

آزمایش سایش مغزه: در این آزمایش نیز به دلیل استفاده از مغزه‌های سنگی سالم، می‌توان تاثیر پارامترهای مربوط به جسم مقابل را به صورت کامل و با امتیاز ۱ در نظر گرفت. بارگذاری بر روی یک سطح استوانه‌ای انجام می‌شود. سازوکار حرکت نیز

آزمایش اره: این آزمایش، بر روی مغزه‌های سالم انجام می‌گیرد. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که پارامترهایی چون سختی کانی‌های سنگ، ابعاد و اندازه دانه‌های موجود در آن و مقاومت مکانیکی، بر نتایج به دست آمده، موثر باشند و امتیاز ۱ را در جدول ۴ به خود اختصاص دهند. اما هیچ تشابهی میان هندسه بارگذاری مورد استفاده در آزمایش و سازوکار حرکت به کار رفته، با شرایط موجود در کله‌های برشی TBM، وجود ندارد. بنابراین پارامترهای یاد شده، در جدول ۴ دارای امتیاز صفر خواهند بود. شاید بتوان از نتایج این آزمایش، در بررسی سایش بر روی اره‌هایی که برای برش و قطعه قطعه کردن سنگ‌های ساختمانی استفاده می‌شوند، بهره برد. اما باید توجه داشت که این ارها نیز اکثراً به شکل گرد و دارای حرکت دورانی اند؛ نه تیغه‌ای با حرکت رفت و برگشتی.

آزمایش شیمازک: در این آزمایش نیز به دلیل استفاده از نمونه‌های سنگ سالم، پارامترهای مربوط به جسم مقابل را می‌توان تاثیر گذار در نظر گرفت و امتیاز ۱ را در جدول ۴ به آنها اختصاص داد. بارگذاری توسط یک پین با زاویه راس ۹۰ درجه صورت می‌گیرد. بنابراین، می‌توان آن را تا حدودی شبیه به هندسه اعمال بار توسط دیسک‌های تیز TBM‌های مورد استفاده در سنگ‌های سخت، دانست و امتیاز ۰/۵ را به آن نسبت داد. اما تشابه چندانی میان سازوکار حرکت حلزونی پین بر روی سطح صیقل شده سنگ و حرکت دیسک‌های TBM، در شرایط واقعی، وجود ندارد و امتیاز مربوطه در جدول ۴، صفر خواهد بود.

آزمایش سرشار: آزمایش سرشار، به خوبی از پارامترهای مربوط به سنگ، تاثیر می‌پذیرد و پژوهش‌های انجام شده توسط مولفین مختلف، نشان داده‌اند که عواملی چون سختی کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، شکل و ابعاد کانی‌ها و دانه‌ها و مقاومت فشاری تک محوره، بر نتایج حاصل از آزمایش سرشار، موثرند. بر این اساس، در جدول ۴، برای کلیه پارامترهای مربوط به جسم مقابل، امتیاز ۱ در نظر گرفته می‌شود. در مورد جسم یکپارچه، میان هندسه بارگذاری و مکانیزم لغزش پین به کار رفته در آزمایش سرشار، با هندسه بارگذاری و مکانیزم حرکت دیسک‌های TBM، تفاوت وجود دارد. با این حال، وضعیت موجود در آزمایش سرشار، حداقل نسبت به اکثر روش‌های آزمایشی دیگر، همخوانی بیشتری با شرایط واقعی ایجاد شده به هنگام حرکت دیسک‌های TBM بر روی سنگ دارد و در

پارامترهای جسم یکپارچه، و ترتیب قرار گیری آزمایش‌ها در این جدول، عوض خواهد شد.

- در مورد ویژگی‌های جسم مقابل یا سنگ، تنها ویژگی-های مربوط به سنگ بکر<sup>۶۲</sup> مورد توجه قرار گرفته است. بدیهی است که در هیچ یک از آزمون‌های آزمایشگاهی، نمی‌توان تاثیر پارامترهایی چون حضور ناپیوستگی‌ها<sup>۶۳</sup> و موقعیت فضایی آنها را، که مربوط به توده سنگ<sup>۶۴</sup> اند، مشاهده کرد.

- بر اساس نتایج بررسی‌های انجام شده، سیستم NTNU، آزمایش سرشار و آزمایش برش بر روی دستگاه فرز، دارای بیشترین کارایی و آزمایش‌های پترولوژیکی، مکعب فولادی و LCPC، دارای کمترین کارایی می‌باشند.

- امتیازهای مشابه به دست آمده توسط آزمایش‌های مختلف را نباید به معنی یکسان بودن عمل کرد آنها انگاشت. برای مثال، با اینکه آزمایش‌های چال‌خوری سیورز، اره، تی‌بر و سایش مغزه، همگی امتیازهای مربوط به جسم یکپارچه را به صورت کامل کسب می‌کنند؛ اما بسته به سازوکارهای موجود در آزمایش، هر یک از پارامترهای مربوط به جسم یکپارچه، تاثیر متفاوتی بر نتایج حاصل از آزمایش خواهد داشت. بنابراین در شرایط مشابه، این آزمایش‌ها ممکن است نتایج متفاوتی را ارائه کنند.

- از میان سه آزمایشی که دارای بالاترین امتیازند، روش NTNU خود شامل سه آزمایش جداگانه است. بنابراین اجرای آن نیازمند هزینه و زمان نسبتاً بیشتری است. همچنین دسترسی به تجهیزات انجام آن نیز دشوارتر است. آزمایش برش بر روی دستگاه فرز، با استفاده از تجهیزات بسیار متداول (دستگاه فرز معمولی) و انجام تغییرات اندکی بر روی آن، قابل انجام است. اما این آزمایش، روشی نسبتاً جدیدتر بوده و ارتباط کمی چندانی میان نتایج حاصل از آن و مقادیر واقعی سایش بر روی ابزارهای برنده، در دسترس نمی‌باشد. بر این اساس می‌توان گفت از میان سه آزمایش هم رده مورد بحث، آزمایش سرشار به دلیل تجهیزات مورد نیاز نسبتاً ساده و توسعه روابط کمی متعدد، میان نتایج آزمایش و مصرف واقعی ابزارهای برنده مختلف، کارایی بالاتری دارد.

از دوران مغزه و حرکت همزمان جسم یکپارچه بر روی سطح آن صورت می‌گیرد. بنابراین، وضعیت جسم مقابل حاضر در این آزمایش، تشابه چندانی با شرایط واقعی نخواهد داشت و پارامترهای مربوط به جسم یکپارچه، در جدول ۴، دارای امتیاز صفر خواهند بود.

**آزمایش برش بر روی دستگاه فرز:** پارامترهای مربوط به جسم مقابل، همانند سایر روش‌های آزمایشی که از نمونه‌های یکپارچه استفاده می‌کنند، بر نتایج به دست آمده موثر و دارای امتیاز ۱ اند. هندسه بارگذاری تاحدودی مشابه برنده‌های قلمی نصب شده بر روی کله‌های برشی‌اند تا برنده‌های دیسکی. چنین برنده‌هایی بیشتر در سنگ‌های نرم کاربرد دارند تا سنگ‌های سخت. بنابراین، امتیاز ۰/۵ به این پارامتر اختصاص می‌یابد. سازوکار حرکت نیز تا حدودی مشابه سازوکار حرکت برنده‌های TBM، بویژه برنده‌های کناری است و این پارامتر نیز دارای امتیاز ۰/۵ خواهد بود. با وجود این تشابه‌ها، داده‌های چندانی در خصوص ارتباط نتایج حاصل از این آزمایش، و سایش‌های به‌وقوع پیوسته در شرایط واقعی، در دسترس نبوده و می‌توان گفت که این آزمایش تا به حال، چندان مورد توجه نبوده است.

جهت مقایسه کارایی روش‌های آزمایشی مختلف با یکدیگر، می‌توان از مجموع امتیازهای تخصیص یافته برای پارامترهای مختلف هر آزمایش، بهره برد. جهت بررسی دقیق‌تر، پارامترهای مربوط به جسم مقابل (سنگ) و جسم یکپارچه (ابزار برنده یا معادل آن، در آزمایش) جداگانه محاسبه می‌شوند. همچنین مجموع امتیاز پارامترهای جسم یکپارچه، در ۱/۵ ضرب می‌شوند تا هر دو بخش، وزن یکسانی در مجموع کلی داشته باشند. این جمع‌بندی را می‌توان در جدول ۵ مشاهده کرد. با توجه به جدول مزبور، می‌توان نکات زیر را در خصوص روش‌های آزمایشی مختلف، نتیجه‌گیری نمود:

- جدول ۵، کارایی روش‌های مختلف را در بررسی وقوع سایش در برنده‌های دیسکی TBM‌های مورد استفاده در سنگ‌های سخت، رده‌بندی می‌کند. در صورتی که کاربردهای دیگری چون TBM‌های محیط‌های خاکی، ماشین‌های کله‌گاو<sup>۶۰</sup>، دستگاه‌های معدن‌کاری پیوسته<sup>۶۱</sup> (CM)، سیستم‌های مختلف حفر چال و ... مورد نظر باشند؛ وضعیت امتیازبندی، به‌ویژه برای

سایش، توجه به اتفاقات به وقوع پیوسته بر روی هر دو جسم، می‌تواند اطلاعات کامل‌تری از فرآیند به وقوع پیوسته، فراهم کند.

بر اساس امتیازبندی صورت گرفته، می‌توان گفت که در میان آزمایش‌های مورد بررسی، آزمایش سرشار احتمالاً دارای بیشترین کارایی در ارزیابی ظرفیت سایشی سنگ- هاست که تاثیر تمامی پارامترهای مربوط به جسم مقابل را در بر داشته و بخش مهمی از پارامترهای مربوط به جسم یکپارچه را نیز شامل می‌شود. سرعت و بارهای اعمالی، به هنگام اجرای آزمایش به راحتی قابل تغییراند و مکانیزم لغزش پین بر روی نمونه را می‌توان تا حدودی، نسبت به سایر آزمایش‌ها، نزدیک به مکانیزم حرکت دیسک بر روی سنگ در نظر گرفت. در جدول ۶، تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج آزمایش سرشار خلاصه شده است. کاربرد گسترده این آزمایش در ارتباط با تخمین سایش و عمر برنده‌ها و دقت بالای روابط موجود در این زمینه، گواهی بر این کارایی نسبتاً بالاتر می‌باشند [۴۴] و [۴۵]

- با مرور جدول ۵ می‌توان دریافت که در آزمایش‌های مورد بحث، تاثیر جسم مقابل (نمونه سنگ) بر نتایج آزمایش، نمود بیشتری دارد تا تاثیر جسم یکپارچه (ابزار برنده). به گونه‌ای که در بیش از نصف آزمایش‌ها، جسم یکپارچه یا اصلاً حضور ندارد (روش‌های پترولوژیکی) و یا عمل‌کردی متفاوت با شرایط واقعی دارد (سیورز، اره، تی‌بر، سایش مغزه، مکعب فولادی و LCPC). آزمایش شیمازک و پین روی دیسک، تنها یک چهارم کل امتیازهای مربوط به جسم یکپارچه را به دست آورده‌اند. در بهترین حالت، این نسبت برای آزمایش‌های NTNU، سرشار و برش بر روی دستگاه فرز، یک دوم است. بنابراین در آزمایش‌های مرور شده، توجه اساسی معطوف به ویژگی‌های سنگ بوده؛ و عوامل مرتبط با ابزار برنده، از جمله سازوکار حرکت و هندسه بارگذاری، چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند.
- در میان آزمایش‌های مورد بحث، غیر از روش‌های پترولوژیکی، که نتیجه آزمایش بر اساس پارامترهای مربوط به جسم مقابل به دست می‌آید؛ در بقیه آزمایش‌ها، نتیجه نهایی بر اساس سنجش‌های انجام شده بر روی جسم یکپارچه، حاصل می‌شود. در صورتی که با توجه به ماهیت رفتاری و برهم‌کنشی پدیده

جدول ۵: امتیازهای به دست آمده در ارزیابی کارایی روش‌های آزمایشی مختلف

ردیف	نوع آزمایش	امتیاز جسم مقابل	امتیاز جسم یکپارچه	مجموع امتیاز
۱	سیستم آزمایشی NTNU	۳	۱/۵	۴/۵
۲	آزمایش سرشار	۳	۱/۵	۴/۵
۳	آزمایش برش بر روی دستگاه فرز	۳	۱/۵	۴/۵
۴	آزمایش شیمازک	۳	۰/۷۵	۳/۷۵
۵	آزمایش پین روی دیسک	۳	۰/۷۵	۳/۷۵
۶	آزمایش چال خوری سیورز - J	۳	۰	۳
۷	آزمایش اره	۳	۰	۳
۸	آزمایش تعدیل شده تی‌بر	۳	۰	۳
۹	آزمایش سایش مغزه	۳	۰	۳
۱۰	روش‌های پترولوژیکی	۱	۰	۱
۱۱	آزمایش مکعب فولادی	۱	۰	۱
۱۲	آزمایش LCPC	۱	۰	۱

بارهای وارد بر پین، مجدداً بر روی کناره‌های آن توزیع می‌شوند. بنابراین مقادیر CAI، باز کمتر از میزان مورد انتظار به دست می‌آیند [۳۱ و ۴۶].

**عدم ارائه اطلاعاتی در مورد تنش‌های اعمالی به پین:** آزمایش سرشار در حال حاضر هیچ اطلاعاتی در مورد نیرو و انرژی اعمالی به ابزارهای برنده، سطوح تنش ایجاد شده در نوک پین و تغییرات این پارامترها به هنگام کند شدگی پیشرونده نوک پین و تاثیر خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مختلف بر آنها، فراهم نمی‌کند و تنها معیاری برای ساینده‌گی سنگ‌ها و طبقه‌بندی آنها بر این اساس، ارائه می‌کند.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، آزمایش‌های مرسوم مورد استفاده برای ارزیابی ظرفیت سایشی سنگ‌ها مرور شدند. در ادامه با معرفی یک سیستم امتیازبندی ساده، کارایی نسبی روش‌های مختلف آزمایشی مقایسه گردید. تعداد قابل توجهی از این آزمایش‌ها، به خوبی از ویژگی‌های جسم مقابل تاثیر می‌پذیرند؛ اما عمل‌کرد جسم یکپارچه در اکثر این آزمایش‌ها، متفاوت با شرایط واقعی است. بر این اساس، در طراحی و توسعه روندهای آزمایشی جدید، تشابه سازوکار واقعی فرآیند حفر با سازوکار آزمایش دارای اهمیت بسیار زیادی است. در ارزیابی نتایج حاصل از آزمایش نیز باید تغییرات به وقوع پیوسته در جسم مقابل و جسم یکپارچه، هر دو مورد توجه قرار گیرند. در حالی که در آزمایش‌های مرسوم، نتیجه آزمایش تنها با تکیه بر سنجش‌هایی که اکثراً بر روی جسم یکپارچه صورت می‌گیرند، گزارش می‌شود. چنین روندی نمی‌تواند اطلاعات کاملی از فرآیند برهم-کنشی سایش ارائه دهد.

بر اساس امتیازبندی‌های ارائه شده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که آزمایش سرشار در کنار سادگی و هزینه نسبتاً کم، دارای کارایی نسبی بالاتری در ارزیابی ظرفیت سایشی سنگ‌ها است. با این حال، بررسی بیشتر این آزمایش، نشان می‌دهد که روش سرشار نیز روندی ایده‌آل برای تخمین ظرفیت سایشی سنگ‌ها نبوده و انجام بررسی‌ها و اصلاحات بیشتری بر روی آن، جهت دستیابی به نتایجی قابل اطمینان‌تر، ضرورت دارند.

با این وجود، آزمایش سرشار کاستی‌ها و نقاط ضعفی نیز دارد که می‌توان آنها را به شرح زیر خلاصه نمود:

**تعدد تجهیزات و روش‌های انجام آزمایش:** در حال حاضر برای انجام آزمایش سرشار، سه نوع دستگاه مختلف در دسترس است. از سویی آزمایش را می‌توان بر روی سطوح اره‌بر یا شکسته انجام داد و زبری سطح نمونه، یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر روی نتایج حاصل از آزمایش است. با اینکه جنس و سختی پین‌های فولادی مورد استفاده، تاثیر شدیدی بر نتایج حاصل از آزمایش دارد؛ با این حال مولفین و مراکز آزمایشگاهی مختلف، از پین‌هایی با سختی متفاوت (56 HRC ~ 54 و 43 HRC ~ 40) برای انجام آزمایش بهره می‌برند [۳۳، ۴۴، ۴۶، ۴۷، ۴۸].

**تاثیر دقت و تجربه اپراتور بر نتایج به دست آمده:** روند انجام آزمایش سرشار در حال حاضر به گونه‌ای است که پارامترهایی چون طول آزمایش و سرعت انجام آن، مستقیماً توسط اپراتور کنترل می‌شوند و دقت و تجربه، تاثیر قابل توجهی در کنترل آنها دارد. دقت و چگونگی اندازه‌گیری پهن-شدگی نوک پین نیز می‌تواند منبع خطای بزرگی باشد. هر یک از این عوامل، می‌توانند باعث تغییرات زیادی در نتایج به دست آمده شوند و سبب پراکندگی نتایج گردند [۴۴].

**مکانیزم سایش پین:** در حدود ۷۰ درصد سایش نوک پین، تنها در یک میلی‌متر اولیه لغزش اتفاق می‌افتد که احتمالاً ناشی از شکستن نوک پین، طی فاز اولیه فرو روی و گسترش سریع سایش باشد. با افزایش ابعاد نوک پهن شده پین، فشار وارد بر آن کاهش خواهد یافت و با ادامه لغزش در طول ۹ میلی‌متر باقیمانده، تنها ۳۰ درصد افزایش در قطر پهن شده نوک پین اتفاق می‌افتد که به نظر می‌رسد ارتباط بیشتری با خواص ساینده سنگ داشته باشد [۴۶ و ۴۹].

**محدوده کاربرد آزمایش:** آزمایش سرشار تمایز کافی میان سنگ‌های سخت (مانند گرانیت، کوارتزیت و گنایس) ایجاد نمی‌کند. زیرا ابزار آزمایش، توان ایجاد برش بر روی چنین سنگ‌هایی را ندارد. بر روی سطوح سخت، پین تمایل به لغزیدن دارد. بنابراین زبری سطح در میزان سایش رخ داده، تعیین کننده خواهد بود و معمولاً مقادیر CAI، کمتر از میزان مورد انتظار حاصل می‌شوند. در سنگ‌هایی که دارای سیمان نرم هستند؛ پین مخروطی، در داخل نمونه نفوذ می‌کند و



جدول ۶: عوامل موثر بر نتایج آزمایش سرشار

عوامل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی	
کانی‌های سختی کانی‌های تشکیل دهنده	افزایش سختی کانی‌های تشکیل دهنده موجب افزایش اندیس سایش سرشار می‌شود. اما سختی کانی‌های سنگ، لزوماً معادل با ساینده‌گی آن نمی‌باشد [۳۱، ۴۶، ۴۹، ۵۰ و ۵۱].
اندازه دانه‌ها	افزایش اندازه دانه‌ها، سبب افزایش اندیس سرشار می‌گردد [۵۱، ۵۲ و ۵۳].
گردی دانه‌ها	حضور دانه‌های گوشه‌دار موجب افزایش اندیس سایش سرشار می‌شود. تاثیر یاد شده هنگامی که دانه‌های سنگ توسط پین بریده می‌شوند، کاهش می‌یابد [۷ و ۵۲].
مقاومت سنگ	رابطه‌ای مستقیم و نسبتاً خطی مابین اندیس سایش سرشار و مقاومت سنگ وجود دارد [۵۱ و ۵۲].
تنش‌های محصور کننده	با افزایش تنش‌های محصور کننده، اندیس سایش سرشار افزایش می‌یابد. این افزایش در سنگ‌هایی که تخلخل بالاتری دارند، بیشتر است [۵۴].
عوامل تکنیکی	
سختی پین‌های فولادی	افزایش سختی پین‌های فولادی موجب کاهش اندیس سایش سرشار می‌شود. پراکندگی نتایج به دست آمده نیز به هنگام استفاده از پین‌های سخت‌تر، کمتر است [۳۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶ و ۴۷].
زبری سطح مورد آزمایش	اندیس سرشار به دست آمده بر روی سطوح شکست طبیعی سنگ، مقداری بیش از اندیس به دست آمده بر روی سطوح اره‌بر دارد [۴۴، ۴۶ و ۴۹].
طول آزمایش	افزایش طول آزمایش، تا حدودی موجب افزایش اندیس سایش سرشار می‌شود. اما بخش عمده‌ای از پهن‌شدگی نوک پین، در بخش‌های اولیه لغزش رخ داده و با پیشروی لغزش، نرخ پهن‌شدگی سایشی کاهش می‌یابد [۴۶ و ۴۹].
سرعت آزمایش	به نظر می‌رسد که حرکت کندتر پین، تا حدودی سبب افزایش اندیس سرشار می‌شود [۴۴].

International Symposium on Weak Rock, Tokyo, Japan, 585-594.

## مراجع

- [7] Deketh H. J. R., Genske P. N. W.; 1995; "Rock properties affecting the sensitivity of prediction equations for rock cutting tool wear"; Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Japan, 19-21.
- [8] Klein C., Hurlbut S., 1985, "Manual of mineralogy", John Wiley & Sons, New York, 596pp.
- [9] Rosiwal A., 1896, "New research findings on the hardness of minerals and rocks", Verhandlungen der Konigl. Geol. Reichsanstalt, Vol. 17 & 18, 475-491.
- [10] ASTM A833-84, 1996, "Standard practice for indentation hardness of metallic materials by comparison hardness Testers".
- [11] Thuro K.; 1996; "Drillability prediction – geological influences in hard rock drill and blast tunnelling"; Geol Rundsch, 426-437.
- [12] Plinninger R. J., Spaun G., Thuro K.; 2002; "Predicting tool wear in drilling and blasting"; Tunnels & Tunnelling International, April 2002.
- [1] Zum Gahr K. H.; 1987; "Microstructure and wear of materials"; Elsevier, Amsterdam, 560 pp.
- [2] Stolarski T. A.; 2000; "Tribology in machine design"; Butterworth – Heinemann, Oxford, 298 pp.
- [3] Verhoef P. N. W.; 1997; "Wear of rock cutting tools"; Balkema, Rotterdam, 327pp.
- [4] DIN 50302; 1979; "Wear definitions, system analysis of wear occurrences, classification of the wear field"; Deutsches Institute fur Normung, Berlin, 8pp.
- [5] Plinninger R. J., Spaun G., Thuro K.; 2002; "Prediction and classification of tool wear in drilling and blasting tunnelling"; Engineering Geology for Developing Countries, Proceedings of 9<sup>th</sup> congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Durban, South Africa, 2226-2236.
- [6] West G.; 1981; "A review of rock abrasiveness testing for tunnelling"; Proceedings of the

- [26] NTH, 1983, "*Hard rock tunnel boring*", Project report 1-83, Norwegian Institute of Technology, Div. of Construction Engineering, Trondheim, 94pp.
- [27] Nilsen B., Dahl F., Holzhauser J., Raleigh P.; 2007; "*New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunnelling*"; 2007 RETC Proceedings, 104-116.
- [28] Fowell R. J.; 1970; "*A simple method for assessing the machineability of rocks*"; Tunnels and Tunnelling, Vol. 2, 251-253.
- [29] Schimazek J., Kantz H., 1970, "*The influence of rock composition on cutting velocity and chisel wear of tunnelling machines*", Glukauf, Vol. 106, 274-278.
- [30] Cerchar, 1973, "*Cerchar tests for the measurement of hardness and abrasivity of rocks*", Centre Study Research, French Coal Industry, Document 73-59: 1-10.
- [31] West G.; 1989; "*Rock abrasiveness testing for tunneling*"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 26, 151-160.
- [32] Rostami J.; 2005; "*CAI testing and its implications*"; Tunnels & Tunnelling International, October, 43-45.
- [33] Michalakopoulou T.N., Anagnostou V.G., Bassanou M.E., Panagiotou G.N.; 2006; "*The influence of styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value*"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 43, pp: 321-327.
- [34] Mathier J. F., Gisiger J. P.; 2003; "*Abrasivity of Icelandic basalts*"; ISRM Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 809-811.
- [35] Tarkoy P. J., Hendron A. J.; 1975; "*Rock hardness index properties and geotechnical properties for predicting tunnel boring machine performance*"; Report for the National Science Foundation, Urbana, University of Illinois.
- [36] West G., McCaul C., Horning J. E.; 1977; "*Concrete blocks for horizontal drilling trials*"; TRRL Tunnels Division Working Paper, Transport and Road Research Laboratory.
- [37] Paschen D., 1980, "*Petrographic and geomechanical characterization of Ruhr area carboniferous rocks for the determination of their*
- [13] Thuro K., Plinninger R. J.; 2003; "*Hard rock tunnel boring, drilling and blasting: rock parameters for excavatability*"; ISRM Technology Roadmap for Rock Mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 1-7.
- [14] ISRM, 1978, "*Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks*", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, 89-97.
- [15] Tarkoy P. J., 1973, "*Predicting tunnel boring machine (TBM) penetration rates and cutter costs in selected rock types*", Proceedings of 9<sup>th</sup> Canadian Rock Mechanics Symposium, Montreal, 263-274.
- [16] Janach W., Merminod A., 1982, "*Rock abrasivity test with a modified Schmidt hammer*", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 19, 43-45.
- [17] Hutchings I. M.; 1992; "*Tribology, friction and wear of engineering materials*"; St Edmundsbury Press Ltd., London, England, 271pp.
- [18] Bhushan B.; 2001; "*Modern tribology handbook*"; CRC Press, Ohio, USA, 1421pp.
- [19] Sievers H., 1950, "*Die bestimmung des bohrwiderstandes von gesteinen*", Gluckauf, Vol. 86, 776-784.
- [20] Dahl F., Grov E., Breivik T.; 2007; "*Development of a new direct test method for estimating cutter life, based on the Sievers' J miniature drill test*"; Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, 106-116.
- [21] SINTEF; 2009; "*Photographs of drillability test methods, equipment and methodology*"; available on Web.
- [22] Selmer-Olsen R., Lien R., 1960, "*Bergartens borbarhet og sprengbarhet*", Tenknisk Ukeblad, Vol. 34, 3-11.
- [23] Matern N. von., Hjelmer A., 1943, "*Forsok med pagrus, Statens Vaginstitut*", Vol. 65.
- [24] Nilsen B., Ozdemir L.; 1993; "*Hard rock tunnel boring prediction and field performance*"; RETC Proceedings, 833-852.
- [25] Lien R., 1961, "*An indirect test method for estimating the drillability of rocks*", PhD thesis, NTH Dept. of Geology, 90pp.

- properties influencing the cerchar abrasivity index (CAI) value*"; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 40, 259-263.
- [50] Suana M., Peters T.; 1982; "*The Cerchar abrasivity index and its relation to rock mineralogy and petrography*"; Rock Mechanics, Vol. 15, 1-7.
- [51] Yarali O., Yasar E., Bacak G., Ranjith P. G.; 2008; "*A study of rock abrasivity and tool wear in coal measures rocks*"; International Journal of Coal Geology, Vol. 74, 53-66.
- [52] Jager W.; 1988; "*An investigation into the abrasive capacity of rocks*"; Memoirs of the Centre of Engineering Geology in the Netherlands, Vol.52, Delft University of Technology.
- [53] Reinking M. W.; 1989; "*Linear cutting tests in artificial sand-clay mixtures to study the influence of brittleness on abrasive wear of cutting tools*"; Memoirs of the Centre of Engineering Geology in the Netherlands, Vol.75, Delft University of Technology.
- [54] Alber M.; 2008; "*Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools*"; Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23, 351-359.
- wear behavior*", PhD dissertation, Technische Universität Clausthal, 202pp.
- [38] AFNOR P18-579, 1990, "*Essai d'abrasivité et de broyabilité*".
- [39] Thuro K., Singer J., Kasling H.; 2007; "*Determining abrasivity with the LCPC test*"; available on Web.
- [40] Thuro K., Singer J., Kasling H., Bauer M.; 2006; "*Soil abrasivity assessment using the LCPC testing device*"; Felsbau, Vol. 24, 37-45.
- [41] Roxborough F. F., 1987, "*The role of some basic rock properties in assessing cuttability*", Proceedings of Tunnels-Wholly Engineered Structures, IE Australia.
- [42] Sman R. M. van der, 1988, "*Investigation into the concept of a test apparatus for chisel wear*", Faculty of Mechanical and Marine Engineering, Delft University of Technology, 38pp.
- [43] Balci C., 2009, "*Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: A case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey*", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, 423-435.
- [44] CSM, 2009, "*CSM computer model for TBM performance prediction*", Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines, 13p, Available on Web.
- [45] Johnson S. T., Fowell R. J.; 1986; "*Compressive strength is not enough*"; Proceedings of the 27th US Symposium on Rock Mechanics, Tuscaloosa, USA, 840-845.
- [46] Al-Ameen S. I., Waller M. D.; 1994; "*The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar abrasive index*"; Engineering Geology, Vol. 36, 293-301.
- [47] Buchi E., Mathier J. F., Wyss C. H.; 1995; "*Rock abrasivity - a significant cost factor for mechanical tunnelling in loose and hard rock*"; Tunnel, Vol. 95, 38-44.
- [48] Plinninger R. J., Kasling H., Thuro K.; 2004; "*Wear prediction in hard rock excavation using the Cerchar abrasiveness index (CAI)*"; EUROCK 2004 & 53<sup>rd</sup> Geomechanics Colloquium.
- [49] Plinninger R. J., Kasling H., Thuro K., Spaun G.; 2003; "*Testing conditions and geomechanical*

#### زیر نویس ها

- <sup>1</sup> wear
- <sup>2</sup> tribology
- <sup>3</sup> cinematic
- <sup>4</sup> tribosystem
- <sup>5</sup> solid body
- <sup>6</sup> counter body
- <sup>7</sup> interfacial medium
- <sup>8</sup> abrasiveness
- <sup>9</sup> abrasive
- <sup>10</sup> wear rate
- <sup>11</sup> hardness
- <sup>12</sup> Moh's scale of hardness
- <sup>13</sup> Rosiwal
- <sup>14</sup> corundum
- <sup>15</sup> Vickers
- <sup>16</sup> Knoop
- <sup>17</sup> Brinell
- <sup>18</sup> Rockwell
- <sup>19</sup> static indentation
- <sup>20</sup> diamond
- <sup>21</sup> topaz
- <sup>22</sup> quartz
- <sup>23</sup> orthoclase feldspar
- <sup>24</sup> apatite
- <sup>25</sup> fluorite
- <sup>26</sup> calcite

- 
- 27 gypsum  
28 talc  
29 abrasive mineral content  
30 equivalent quartz content  
31 rock abrasivity index  
32 uniaxial compressive strength  
33 Schmidt hammer  
34 Shore scleroscope  
35 Taber  
36 Sievers' J miniature drill test  
37 Dahl et al  
38 real time  
39 quartzite  
40 Norwegian University of Science and Technology  
41 abrasivity value  
42 steel abrasivity value  
43 soil abrasivity test  
44 drilling rate index  
45 bit wear index  
46 cutter life index  
47 hacksaw test  
48 Schimazek  
49 wear factor F  
50 Cerchar test  
51 Laboratoire du Centre d' Etudes et Recherches des  
Charbonnages de France  
52 Cerchar abrasivity index  
53 modified Taber abrasion test  
54 the steel cube test  
55 pin on disk test  
56 Laboratoire Central des Ponts et Chaussees  
57 LCPC abrasivity coefficient  
58 core abrasion test  
59 cutting test on shaper  
60 road header  
61 continuous miner  
62 intact rock  
63 discontinuities  
64 rock mass