

# ارزیابی نشست و پدیده شکست ذرات مصالح سنگریزه ضعیف در دستگاه ادومتر با مقیاس متوسط

حمیدرضا رحمانی<sup>۱</sup>، علی کمک‌پناه<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

a-panah@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۸/۶/۵]

تاریخ دریافت: [۹۷/۴/۳۰]

## چکیده

مصالح سنگریزه‌ای مصالحی هستند که کاربرد فراوانی در پروژه‌های عمرانی مانند سدها، راهسازی، اسکله‌ها و ... دارند. با توجه به گسترش روزافزون استفاده از این مصالح آزمایش‌ها و مطالعات شناسایی زیادی نیز روی این مصالح انجام گرفته است. معمولاً این مطالعات روی سنگریزه‌های متوسط و قوی که دارای مقاومت فشاری بالای ۵۰ مگاپاسکال هستند، انجام گرفته است. امروزه به دلیل کاهش هزینه و حفاظت از محیط زیست استفاده از سنگریزه‌های نرم و ضعیف که دارای مقاومت فشاری پایین تر از ۵۰ مگاپاسکال است، افزایش یافته است. هنوز مطالعات کامل و جامعی روی سنگریزه‌های نرم انجام نگرفته است و نیاز به کسب اطلاعات بیشتر در زمینه رفتار این مصالح در شرایط مختلف است. با توجه به اینکه ابعاد سنگریزه‌های قابل استفاده در محل ممکن است خیلی بزرگتر از ابعاد دستگاههای آزمایشگاهی باشد، بنابراین مقیاس کردن و هماهنگی نتایج بدست آمده از آزمایشگاه و محل از نکات مهم در مورد مصالح سنگریزه است. در این پژوهش رفتار مصالح سنگریزه‌ای ضعیف در شرایط مختلف در دستگاه ادومتر با مقیاس متوسط بررسی شده است. نتایج این مطالعات نشان دهنده این است که حضور آب باعث افزایش نشست و همچنین افزایش پدیده شکست ذرات می‌شود. بیشترین مقدار کرنش و تغییر شکل برای نمونه‌ها در اولین روز بارگذاری اتفاق می‌افتد و در هر روز بارگذاری، بیشترین مقدار تغییر شکل در چند ساعت اولیه اتفاق می‌افتد.

**کلمات کلیدی:** شکست ذرات، مصالح سنگریزه ضعیف، ادومتر با مقیاس متوسط

## ۱- مقدمه

از سنگریزه‌های ضعیف و نرم در سدهای سنگریزه‌ای هستند. آزمایش‌ها و مطالعات گذشته بیشتر بر روی مصالح سنگریزه‌ای مقاوم انجام گرفته است و در مورد مصالح سنگریزه‌ای ضعیف و نرم مطالعات کمتری انجام شده است.

سدهای سنگریزه‌ای از پرکاربردترین نوع سدها هستند. با توجه به اینکه سنگریزه‌های موجود در همه مناطق از نوع پرمقاومت برای ساخت سد نیست، بنابراین ناگزیر به استفاده

نسبت به آزمایش سه محوری است. ژینگ و همکاران [4] در مقاله‌ای به بررسی ساخت سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی با سنگ‌های ضعیف پرداخته‌اند، و به مزیت‌های استفاده از سنگ ضعیف در سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی اشاره نمودند، ولی این نکته را ذکر کرده‌اند که رفتار سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی ساخته شده توسط سنگ‌های ضعیف کاملاً شناخته شده نیست. جان [5] در مقاله‌ای به بررسی خواص مهندسی سنگ‌های نرم استفاده شده در سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی پرداخته است. با توجه به اینکه استفاده از سنگ‌های نرم به عنوان مصالح اصلی سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی رشد چشمگیری داشته است و احتمال ساخت سدهای با ارتفاع بالای ۱۰۰ متر با سنگریزه‌های ضعیف وجود دارد، بررسی بیشتر خواص مصالح سنگ ضعیف از اهمیت بالایی برخوردار است.

ژانگ و همکاران [6] به بررسی رفتار سنگریزه‌های سنگ لای نرم تحت آزمایش تحکیم و هوازگی پرداخته‌اند از نتایج این پژوهش می‌توان به این نکته اشاره نمود که با افزایش تنش محوری در آزمایش تحکیم، خرد شدن ذرات افزایش می‌یابد و هوازگی در چند سیکل اول باعث افزایش خرد شدن دانه‌ها می‌شود ولی بعد از چند سیکل تاثیر زیادی در شکست ذرات ندارد.

با مطالعه رفتار سدهای ساخته شده با مصالح سنگریزه ضعیف در کشورهای دیگر و با توجه به اینکه در کشور ایران سدهایی با سنگریزه‌های ضعیف که دارای مقاومت فشاری پایین‌تر از ۵۰ مگاپاسکال هستند، ساخته نشده است و همچنین اطلاعات در مورد رفتار این مصالح وقتی تحت تنش‌های بالا قرار می‌گیرند، بسیار کم است. در این پژوهش به بررسی رفتار مصالح سنگریزه ضعیف برای ساخت سدها پرداخته شده است و آزمایش‌ها در دستگاه ادمتر با مقیاس متوسط برای بررسی پدیده خرد شدن دانه تحت تنش‌های بالا و همچنین تغییر شکل سد تحت این پدیده که از مهمترین مباحث سدهای سنگریزه‌ای بود، انجام شده است.

از نکات مثبت ساخت سدهای سنگریزه‌ای می‌توان به این مطلب اشاره کرد که در شرایط مختلف فونداسیون و محل‌های مختلف قابل اجرا است و معمولاً مصالح ساخت ارزان و طبیعی از منابع معدن محلی حتی سنگ‌های ضعیف نیز قابل استفاده است. سدهای سنگریزه‌ای و خاکی تنها انتخاب واقعی برای شرایط سخت آب و هوایی و زمین شناسی هستند. برای طراحی و ساخت سدهای سنگریزه‌ای دو انتخاب وجود دارد: ۱- سد سنگریزه‌ای با هسته رسی یا آسفالتی ۲- سد سنگریزه‌ای با رویه بتنی. به دلیل مسائل اقتصادی، مصالح سنگی ضعیف نیز مانند مصالح سنگی قوی استفاده می‌شوند. سدهای ریخته شده<sup>۱</sup> نیازمند سنگ قوی و سخت و ذرات بزرگ و مقاومت فشاری محدود نشده بالا (بالتر از ۸۰ مگاپاسکال) می‌باشد، ولی برای سدهای سنگریزه‌ای که در لایه‌بندی ریخته و کوبیده می‌شود نیاز به سنگ‌های خیلی قوی و سخت نیست و سنگریزه‌های با مقاومت فشاری پایین نیز می‌تواند استفاده شود [1].

ویتنبرگ و همکاران [2] به بررسی استفاده از سنگریزه‌های ضعیف در ساخت سدها پرداخته‌اند و نمونه‌هایی کاربردی برای طراحی و ساخت سدها با استفاده از سنگریزه‌های ضعیف ارائه نموده‌اند. نتیجه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که خاک و سنگریزه‌های نرم می‌توانند به طور گسترده در ساخت سدها استفاده و باعث کاهش هزینه و زمان ساخت سد می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد اگر سنگ ضعیف در ساخت سد استفاده شود و خوب متراکم شود، مشخصات مقاومت آن با مقاومت سنگریزه‌های سنگ قوی معادل خواهد بود.

بران [3] به بررسی استفاده از سنگریزه‌های نرم در سد اورتو<sup>۲</sup> قبرس پرداخته است که خاصیت مهندسی مصالح مانند نفوذپذیری و مقاومت برشی بین مقادیر خاکریز و سنگریز سخت قرار دارد. مقاومت فشاری تک محوری بین ۲۰ تا ۲۵ مگاپاسکال برای مصالح خشک است. یافته‌ها نشان می‌دهد پارامترهای مقاومت برشی اندازه‌گیری شده در آزمایش برش مستقیم بیشتر از آزمایش سه محوری است و نشان دهنده شرایط نزدیک کرنش صفحه‌ای برای آزمایش برش مستقیم

1 Dumped

2 Evreto

## ۲- پارامترهای مهم در مصالح سنگریزه

### ۱-۲- شکست ذرات در مصالح سنگریزه‌ای

به طور کلی خرد شدن اجزاء تشکیل دهنده (دانه‌های) یک محیط دانه‌ای در اثر تنش‌های وارد شده را شکست ذرات می‌نامند. این مهم در بسیاری از توده‌های خاکی-سنگریزه‌ای مانند سدهای سنگریزه‌ای و همینطور در بسیاری از آزمون‌های شناسایی (آزمایش‌های متداول) انجام گرفته بر روی نمونه‌های آنها تحت فشارهای معمول مشاهده شده است. این پدیده توسط پژوهشگران متعددی در چارچوب آزمون‌های آزمایشگاهی مختلف، مانند آزمایش سه محوری، تحکیم و فشاری یک بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است و برخی از آنها پارامترهای مناسبی برای بیان این پدیده با عنوان فاکتور شکست ذرات<sup>۳</sup> ارائه کرده‌اند.

مارشال [7] برای اولین بار به طور جامع به مطالعه شکست ذرات در آزمون سه محوری پرداخت و با ساخت دستگاه سه محوری فشاری بزرگ مقیاس، توانست پدیده شکست در ذرات مصالح سنگریزه را به طور مطلوبی مورد بررسی قرار دهد. نتیجه نهایی این مطالعات در جمله‌ای به صورت ذیل از طرف ایشان جمع بندی شده است:

" به نظر می‌رسد خرد شدن ذرات عامل بسیار مهمی است که روی مقاومت برشی و قابلیت فشردگی مصالح دانه‌ای تاثیر می‌گذارد و این پدیده در شرایط مختلف تنش‌های اعمالی مانند مرحله اعمال فشار همه جانبه در آزمایش سه محوری و یا در مرحله بارگذاری انحرافی در این آزمون، بر روی پارامترهای یاد شده تاثیرگذار است."

نشانه شکست ذرات نمایش دهنده درجه شکست ذرات مصالح است. نشانه شکست ذرات به چهار روش طبقه بندی می‌شود [8]:

الف- براساس تفاوت منحنی دانه‌بندی قبل و بعد از آزمایش

ب- براساس نشانه واحد مانند  $B_{10}$ ،  $B_{15}$  و ...

ج- براساس افزایش سطح ذرات

د- براساس روش اجزاء مجزا<sup>۴</sup>

در بیشتر کارهای پژوهشی انجام شده در مورد پارامتر شکست ذرات از فاکتور ارائه شده توسط مارشال [7] که با نماد  $B_g$  نمایش داده می‌شود و براساس تفاوت درصد مانده روی هر الک قبل و بعد از آزمایش به روش زیر به دست می‌آید.

$$B_g = \frac{1}{2} (|f_o(D) - f_f(D)|) \quad (1)$$

که در این رابطه  $f_o(D)$  درصد باقیمانده روی هر الک قبل از انجام آزمایش و  $f_f(D)$  درصد باقیمانده روی هر الک بعد از انجام آزمایش می‌باشد (شکل ۱).

شکل ۱. چگونگی محاسبه پارامتر شکست ذرات ( $B_g$ ) [7]

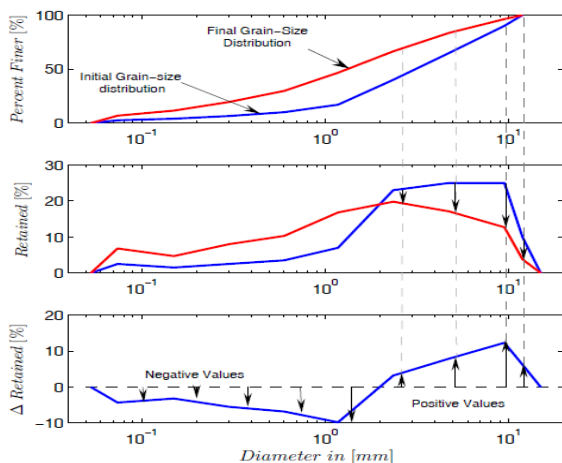


Fig. 1.  $B_g$  calculation method [7]

### ۲-۲- مصالح سنگریزه ضعیف

سنگ‌های نرم مصالحی هستند که در طبیعت به فراوانی وجود دارد و چند نکته مهم در مورد آنها وجود دارد: اول اینکه همه آنها رفتار نسبتاً نامطلوب (مانند مقاومت کم، شکسته شدن، جدا شدن، پلاستیسته بالا، فرو نشستن، هوازگی سریع) از خود نشان می‌دهند. دوم اینکه سنگ‌های نرم دارای مقاومت متوسط بین خاک و سنگ سخت هستند و در بعضی از موارد خیلی نرم‌تر، از آن هستند که با تجهیزات مکانیک سنگ آزمایش شوند. سوم مشکل نمونه‌برداری و پژوهش در محل

شکل (۲) نمایی از دستگاه مشاهده می‌شود. اجزای اصلی دستگاه عبارتند از:

۱- قاب اصلی دستگاه که ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر و عرض ۱۴۰ سانتی‌متر دارد.

۲- استوانه سلول که حاوی سنگ‌های زهکش و سلول حاوی نمونه که از جنس فولاد زنگ نزن به قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر است.

۳- اهرم بارگذاری که بار وزنه‌های اعمالی را به نمونه داخل سلول منتقل می‌کند و ضریب اهرم دستگاه ۲۰ است.

۴- جک پیچی که برای تراز کردن اهرم بارگذاری تعبیه شده است.

۵- قاب بارگذاری قائم که بار وزنه‌ها را از طریق اهرم بارگذاری به نمونه‌ها منتقل می‌کند. ظرفیت بارگذاری دستگاه ۳۰۰ کیلوگرم است که با احتساب ضریب اهرم ۶ تن قابلیت بارگذاری بر روی سلول وجود دارد.

۶- داده‌ها به وسیله جابه‌جایی سنج دیجیتال<sup>۵</sup> و ثبت کننده داده‌ها<sup>۶</sup> قرائت شده است [11].

شکل ۲. دستگاه ادومتر مقیاس متوسط

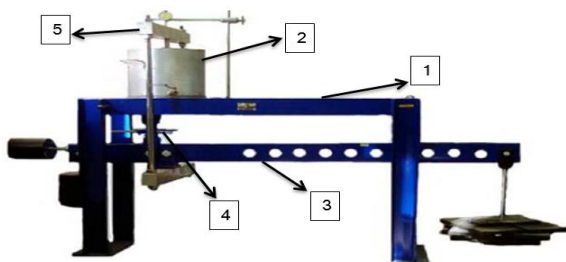


Fig. 2. Medium-scale oedometer apparatus

#### ۲-۴- دستگاه لوس آنجلس

اگرچه این آزمایش برای تعیین مقاومت سایشی دانه‌های سنگی است، اما به نظر می‌رسد که مقاومت سایشی ارتباط نزدیکی با سایر ویژگی‌های مقاومتی سنگ به ویژه شکست ذرات داشته باشد. عموماً دسترسی به این دستگاه ساده است

است و چهارم بعضی از انواع سنگ‌های نرم خیلی به سختی در طبقه بندی ژئومکانیک سیستم‌های معمول قرار می‌گیرند و به همین دلیل، سنگ‌های نرم خیلی کم مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند و اطمینان کمی در خواص آنها برای کارهای مهم مهندسی وجود دارد. معمولاً برای استفاده از این سنگ‌ها، پارامترهای محافظه‌کارانه بالا برای اطمینان از ایمنی کافی در نظر گرفته می‌شود که برخلاف اصول اقتصاد مهندسی است [9].

استفاده از سنگ‌های ضعیف در خاکریز و در سدهای سنگریزه‌ای و خاکی با تردید روبه‌رو است، لیکن کارهای موفق برای حالتی که مشخصات سنگ به خوبی مشخص شده و در طراحی در نظر گرفته شده، انجام شده است. در این مورد کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ دنیا در گزارش مخصوصی به عنوان «سنگ‌های ضعیف و شیل در سدها» [10]، گزارش چند نمونه ساخت سد با مصالح ضعیف و مشخصات آنها آورده شده است. در این بولتن مصالح سنگی که برای ساخت سدها استفاده می‌شود طبق جدول (۱) براساس مقاومت فشاری نمونه‌های مغزه‌گیری شده، دسته‌بندی شده است.

جدول ۱. رده‌بندی مصالح سنگی سدها

Class	Description	Uniaxial Compressive Strength(MN/ m <sup>2</sup> )
A	Very high strength	Over 200
B	High strength	100 - 200
C	Medium strength	50 - 100
D	Low strength	25 - 50
E	Very low strength	Less than 25

Table 1. Classification of rock material in dams [10]

در این بولتن، دسته بندی C, D, E در رده بندی سنگریزه‌های ضعیف قرار می‌گیرد.

#### ۲-۳- دستگاه ادومتر مقیاس متوسط

برای انجام آزمایش‌های ادومتر روی مصالح سنگریزه‌ای مورد مطالعه، دستگاه ادومتری با مقیاس متوسط استفاده شد. در

5 LVDT  
6 Data Logger

با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری براساس روش استاندارد جامعه بین المللی مهندسين مکانیک سنگ<sup>۷</sup> [14] روی چند نمونه از هر نوع مصالح، میانگین مقاومت فشاری مصالح هر معدن مشخص شد که در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. مقاومت فشاری سنگ‌های نمونه برداری شده

Sampling location	uniaxial compressive strength(MPa)	
	Dry	Saturate
Spillway 1	23.5	16.5
Spillway 2	45.5	39.2
Spillway 3	80.4	68.7
Spillway 4	26.3	24.1
Riprap A	12.6	8.2
Riprap D	15.5	12.9

Table 2. Uniaxial compressive strength of sampled rocks

با توجه به مقاومت فشاری به دست آمده و هماهنگی با دستورالعمل بولتن ۱۳۴ کمیسیون بین المللی سدهای بزرگ دنیا [10] که در جدول (۱) ارائه شد، مصالح محل سرریز ۱ و سرریز ۲ به ترتیب که در رده D و E جدول شماره (۱) قرار می‌گیرند، به عنوان مصالح مورد آزمایش انتخاب شدند. همچنین مصالح انتخابی در آزمایشگاه مکانیک سنگ برای تعیین نوع سنگ مورد بررسی قرار گرفت و مصالح محل سرریز ۱ در دسته بندی سنگ های داسیت<sup>۸</sup> و مصالح محل سرریز ۲ در دسته بندی سنگ های آندزیت<sup>۹</sup> قرار می‌گیرد. سپس با مراجعه به سایت سد از محل‌های انتخاب شده نمونه برداری برای انجام آزمایش‌ها انجام شد (شکل ۴).

شکل ۴. نمونه برداری از مصالح



Fig. 4. Sampling of materials

بنابراین در صورت مشخص بودن روابطی می‌توان با نتایج این آزمایش، به برآوردهایی از سایر پارامترها دست یافت. آزمایش‌های مربوط به این پژوهش، مطابق استاندارد شماره ۴۴۸ ایران به نام تعیین سایش مصالح سنگی درشت دانه با استفاده از ماشین لوس آنجلس [12] انجام شده است.

### ۲-۵- مصالح مورد استفاده در پژوهش

برای انتخاب مصالح در راستای هدف این پژوهش به ساختگاه سد نهب مراجعه شد. سد نهب در استان قزوین، ۳۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان تاکستان و ۱ کیلومتری پایین دست روستای نهب واقع شده است. ارتفاع این سد ۴۶ متر از پی و طول تاج سد ۲۱۵۶ متر، و در مرحله ساخت بدنه است [13].

### ۳- مراحل انجام آزمایش

#### ۳-۱- انتخاب مصالح برای آزمایش

برای انتخاب مصالح موردنیاز با مراجعه به شرکت مدیریت منابع آب ایران و دریافت اطلاعات سدهای در حال ساخت کشور که امکان نمونه برداری برای انجام آزمایش‌ها وجود داشته باشد و پس از بررسی و امکان سنجی برداشت نمونه سد نهب انتخاب شد و سپس با مراجعه به سایت سد و برداشت نمونه‌های سنگریزه در منابع قرضه ریپ رپ و همچنین محل حفاری سرریز نمونه‌های سنگ شامل ۶ نوع مصالح از نقاط مختلف برای انجام آزمایش‌ها نمونه برداری شد. در شکل (۳) سنگ‌های نمونه برداری شده نمایش داده شده است.

شکل ۳. سنگ‌های نمونه برداری شده برای تعیین مقاومت



Fig. 3. Rock samples for resistance determination

7 ISRM  
8 Dacite  
9 Andesite

$$RD = \frac{\frac{1}{(\gamma_d)_{min}} - \frac{1}{\gamma_d}}{\frac{1}{(\gamma_d)_{min}} - \frac{1}{(\gamma_d)_{max}}} * 100\% \quad (2)$$

مقدار دانسیته خشک نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳. وزن مخصوص خشک استفاده شده مصالح

Material	$\gamma_d$ (Kg/m <sup>3</sup> )
Dacite	1585
Andesite	1855

Table 3. dry density of materials used in tests

۳-۴- مراحل انجام آزمایش ادمتر مقیاس متوسط

آزمایش‌های ادمتر مقیاس متوسط در سه وضعیت مختلف انجام شد:

الف) وضعیت خشک: در این حالت، مصالح به صورت خشک و بدون حضور آب در سلول ریخته و متراکم شده و تحت تنش قائم قرار داده می‌شوند.

ب) وضعیت مرطوب: مصالح با آب مخلوط شده و درصد رطوبت با توجه به توصیه کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ دنیا [1]، ۲۰ درصد در نظر گرفته می‌شود و در سلول ریخته شده و در حضور آب، نمونه متراکم می‌شود. پس از ریخته شدن کل نمونه و پر شدن سلول، با باز کردن شیر استوانه سلول، آب از داخل نمونه خارج و سپس تنش به نمونه اعمال می‌شود.

ج) وضعیت غرقاب: در این حالت، مانند حالت مرطوب نمونه ساخته می‌شود و بارگذاری اولیه مانند حالت مرطوب انجام می‌شود. پس از اتمام مراحل بارگذاری، در شرایطی که بارگذاری بدون تغییر می‌ماند، کل استوانه سلول از آب پر و به مدت هفت روز تنش حداکثر به نمونه اعمال می‌شود.

برای جلوگیری از اصطکاک مصالح با دیواره سلول از گریس برای نقش روان‌کنندگی استفاده می‌شود و به جداره داخلی سلول آغشته می‌شود. برای ساخت نمونه‌ها با توجه به بیشینه اندازه دانه‌ها، لایه‌ها ۵ سانتی‌متری در نظر گرفته شده و سلول در ۵ لایه متراکم می‌شود. برای تراکم از چکش برقی که روی آن صفحه‌ای که هم قطر با دیواره داخلی سلول است استفاده شد. برای هر لایه مصالح موردنیاز توزین شده و عمل تراکم

۲-۳- تعیین منحنی دانه‌بندی برای انجام آزمایش‌ها

برای انتخاب منحنی دانه‌بندی اصلی، منحنی دانه‌بندی سدهای سنگریزه مختلف که از مصالح شکسته شده ناشی از انفجار معدن اجرا شده بودند و در مراجع ارائه شده بود یک منحنی دانه‌بندی به عنوان دانه‌بندی مرجع انتخاب شد [15]. با توجه به اینکه قطر سلول آزمایش ۱۵ سانتی‌متر است و بیشینه اندازه دانه‌های نمونه باید بین  $\frac{1}{5}$  تا  $\frac{1}{8}$  قطر سلول آزمایش باشد [16]، در این پژوهش از نسبت  $\frac{1}{6}$  استفاده شده است. برای به دست آوردن منحنی دانه‌بندی از روش جاگذاری<sup>۱۰</sup> با استفاده از روش لاو [17] استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی مرجع و دانه‌بندی مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل (۵) نمایش داده شده است.

شکل ۵. منحنی دانه‌بندی استفاده شده

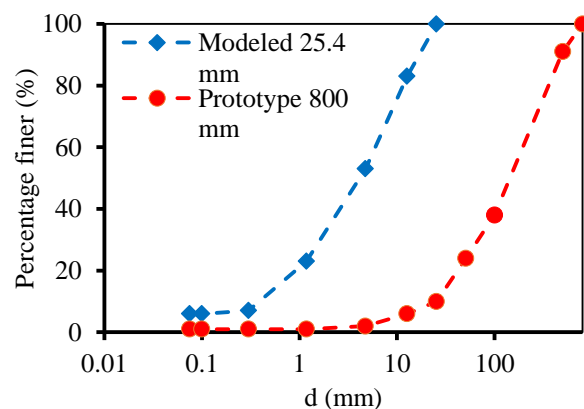


Fig. 5. Gradation of materials

۳-۳- تعیین وزن مخصوص مصالح سنگریزه

برای انجام آزمایش‌ها و تراکم نمونه‌ها نیاز به مقادیر بیشینه و کمینه وزن مخصوص خشک مصالح سنگریزه است. برای تعیین بیشینه دانسیته از روش استاندارد مربوطه [18] و برای تعیین بیشینه دانسیته از روش استاندارد تعیین بیشینه وزن مخصوص خاک و تعیین دانسیته نسبی با استفاده از میز لرزان [19] استفاده شده است.

برای ساخت نمونه، با در نظر گرفتن کمینه و بیشینه دانسیته به دست آمده، با توجه به مراجع [20-21] مقدار دانسیته نسبی<sup>۱۱</sup> برابر ۸۷ درصد با رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود:

10 Scalping  
11 Relative Density

در شکل (۵) منحنی دانه‌بندی برای مصالح داسیت قبل از متراکم نمودن مصالح و همچنین بعد از متراکم نمودن مصالح برای دو حالت تراکم خشک و همچنین تراکم با ۲۰ درصد رطوبت نمایش داده شده است.

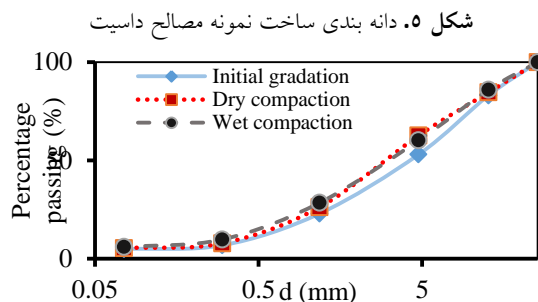


Fig. 5. Gradation of Dacite after compaction

همچنین در شکل (۶) تفاوت درصد مانده مصالح روی الک‌های مختلف در شرایط قبل و بعد از آزمایش برای مصالح داسیت که بر اثر متراکم نمودن مصالح در دو حالت خشک و مرطوب به وجود آمده است، نمایش داده شده است.

شکل ۶. تغییرات درصد مانده روی هر الک در مرحله ساخت نمونه مصالح داسیت نسبت به دانه بندی اولیه

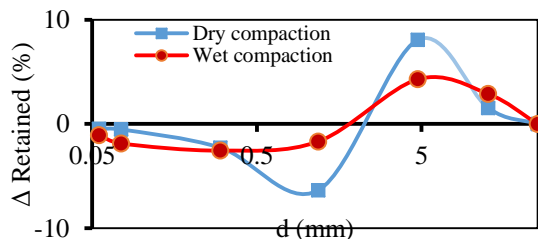


Fig. 6. ΔRetained Dacite material after compaction

مقدار پارامتر شکست ذرات برای مصالح داسیت و آندزیت که در مرحله ساخت نمونه و متراکم نمودن به وجود آمده است بر اساس رابطه مارشال در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵. شکست ذرات در مرحله ساخت نمونه

Specimen condition	$B_g$	
	Dacite	Andesite
Dry	6.95	3.51
Wet	6.45	4.17

Table 5.  $B_g$  factor of material after specimen compaction

۴-۱-۲- شکست ذرات بعد از بارگذاری نمونه در ادومتر به هنگام انجام آزمایش‌ها و مراحل بارگذاری نیز پدیده شکست ذرات در مصالح وجود دارد و در این قسمت به بررسی این پدیده در مصالح مورد آزمایش پرداخته شده

انجام می‌شود تا ضخامت مورد نیاز هر لایه تامین شود. برای به دست آوردن تغییر مکان قائم از حسگر جابه‌جایی که به سیستم قرائت داده‌ها متصل است استفاده می‌شود.

بارگذاری در هفت روز انجام می‌گیرد و بعد از گذشت ۲۴ ساعت بار افزایش داده می‌شود. روند بارگذاری برای مصالح داسیت و آندزیت در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴. مقادیر بارگذاری نمونه‌ها

Day	Vertical stress(kPa)	
	Dacite	Andesite
1	320	375
2	640	750
3	960	1125
4	1280	1500
5	1600	1875
6	1920	2250
7	2240	2625

Table 4. Vertical stress on specimens

مصالح قبل و بعد از انجام آزمایش‌ها، دانه‌بندی می‌شوند و با توجه به منحنی دانه‌بندی، پارامتر شکست ذرات محاسبه می‌شود.

### ۳-۵- مراحل انجام آزمایش لوس آنجلس

در انجام آزمایش لوس آنجلس، با توجه به هدف پژوهش که بررسی شکست ذرات است، مقدار ۵ کیلوگرم مصالح را با توجه به دانه‌بندی به دست آمده برای آزمایش ادومتر مشخص نموده و آزمایش لوس آنجلس برای مصالح مورد نظر انجام می‌شود. برای انجام آزمایش از ۱۲ گلوله فلزی استفاده شده و تعداد دوران دستگاه ۵۰۰ دور انتخاب شده است.

## ۴- نتایج آزمایشات

### ۴-۱- نتایج پارامتر شکست ذرات

#### ۴-۱-۱- شکست ذرات در ساخت نمونه

به هنگام ساخت نمونه و متراکم کردن مصالح برای رسیدن به درصد تراکم مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها پدیده شکست ذرات در مصالح اتفاق می‌افتد. در این قسمت به بررسی این پدیده در مصالح مورد آزمایش پرداخته می‌شود.

بررسی کرنش محوری به وجود آمده در نمونه در مدت زمان بارگذاری به تفکیک روزهای بارگذاری در مصالح داسیت و آندزیت نشان دهنده این است که برای مصالح داسیت بیشترین مقدار کرنش و تغییر شکل در اولین روز بارگذاری اتفاق می‌افتد و مقدار کرنش در سه روز انتهایی از روز دوم تا چهارم بیشتر است و این شرایط در هر دو حالت خشک و مرطوب اتفاق می‌افتد. برای مصالح آندزیت بیشترین مقدار کرنش و تغییر شکل در اولین روز بارگذاری اتفاق می‌افتد و مقدار کرنش با گذشت زمان در روزهای انتهایی آزمایش کاهش می‌یابد و کمترین مقدار کرنش در روز هفتم اتفاق می‌افتد. این شرایط تقریباً در هر دو حالت خشک و مرطوب اتفاق می‌افتد.

در شکل (۸) نمودار تغییر شکل به وجود آمده در نمونه در مدت زمان بارگذاری در مصالح نوع داسیت و آندزیت برای شرایط غرقاب نمایش داده شده است و این شرایط بعد از اتمام مراحل بارگذاری در شرایط مرطوب و با افزایش آب به سلول اتفاق می‌افتد و تغییر شکل‌های نمایش داده شده فقط برای مرحله غرقاب است. مقدار تغییر شکل نسبت به مرحله مرطوب افزایش زیادی ندارد.

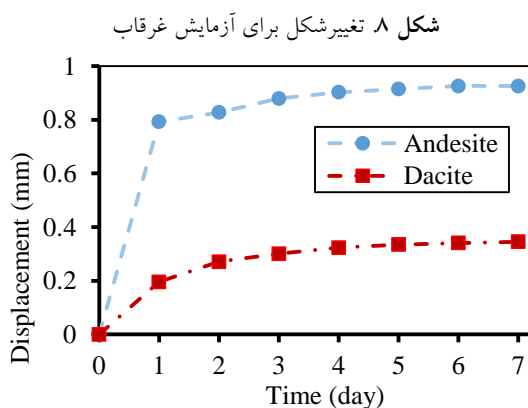


Fig. 8. Deformation of material for saturation test

بررسی کرنش محوری به وجود آمده در نمونه در مدت زمان بارگذاری در مصالح داسیت و آندزیت برای شرایط غرقاب نشان دهنده این است که برای هر دو نوع مصالح بیشترین مقدار کرنش در روز اول اتفاق می‌افتد. همچنین در چهار روز اول بیشترین مقدار کرنش اتفاق می‌افتد و در روزهای آخر آزمایش مقدار کرنش خیلی کم شده است.

است. مقدار پارامتر شکست ذرات برای مصالح نوع ۱ و ۲ بعد از انجام آزمایشات و بارگذاری نمونه‌ها بر اساس رابطه مارشال در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶. شکست ذرات انجام آزمایش‌های ادومتر

Specimen condition	$B_g$	
	Dacite	Andesite
Dry	10.05	5.05
Wet	10.15	6.15
Saturate	11.02	6.28

Table ۶.  $B_g$  factor after oedometer tests

3-1-4- شکست ذرات آزمایش لوس آنجلس

مقدار پارامتر شکست ذرات برای مصالح نوع ۱ و ۲ بعد از انجام آزمایش لوس آنجلس بر اساس رابطه مارشال در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷. شکست ذرات آزمایشات لوس آنجلس

Material	$B_g$
Dacite	24.55
Andesite	16.51

Table 7.  $B_g$  factor after Los Angeles tests

۲-۴- نشست و تغییر شکل نمونه‌ها

در شکل (۷) نمودار تغییر شکل به وجود آمده در نمونه در مدت زمان بارگذاری در مصالح داسیت و آندزیت برای شرایط خشک و مرطوب نمایش داده شده است. با توجه به شکل نشست نمونه مرطوب بیشتر از نمونه خشک است و نشان دهنده این است که حضور آب باعث افزایش نشست و همینطور افزایش پارامتر شکست ذرات می‌شود که در جدول (۷) ارائه شد.

شکل ۷. تغییر شکل برای آزمایش خشک و مرطوب

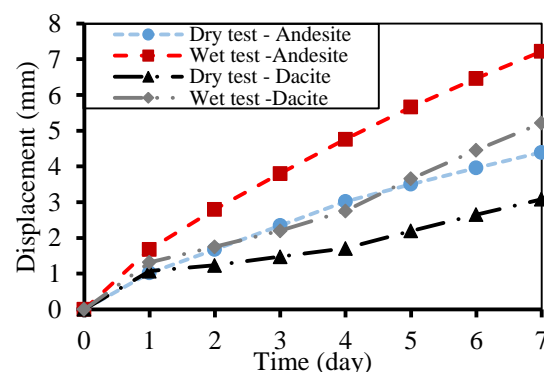


Fig. 7. Deformation for dry and wet tests



از آب اضافه شده به خود ذرات جذب می‌شوند و به این دلایل با شکست کمتری نسبت به حالت خشک به تراکم مورد نظر می‌رسند و بنابراین پارامتر شکست ذرات کاهش می‌یابد ولی برای مصالح آندزیت وجود آب تاثیر زیادی روی اصطکاک سطحی و سهولت حرکت ذرات نسبت به یکدیگر ندارد و چون جذب آب مصالح آندزیت پایین است و مقدار آب کمی توسط دانه‌ها جذب می‌شود و چون در مرحله تراکم زهکشی هم در نمونه اتفاق نمی‌افتد مقدار انرژی لازم برای تراکم نمونه به دلیل وجود آب به عنوان ماده اضافی افزایش می‌یابد و این افزایش انرژی باعث افزایش شکست ذرات در مصالح آندزیت برای حالت مرطوب نسبت به حالت خشک می‌شود.

برای شرایط انجام آزمایش‌ها (بارگذاری و اعمال تنش)، در مصالح داسیت و آندزیت با افزودن آب (شرایط مرطوب) پارامتر شکست ذرات نسبت به شرایط خشک افزایش می‌یابد. برای مصالح داسیت در نمونه‌های خشک نسبت افزایش پارامتر شکست ذرات برای شرایط انجام آزمایش به شرایط ساخت نمونه افزایش چندانی ندارد ولی در نمونه‌های مرطوب این افزایش زیاد است و در آزمایش‌ها غرقاب نیز شکست ذرات افزایش کمی نسبت به آزمایش‌های مرطوب دارد. برای مصالح آندزیت در نمونه‌های خشک و مرطوب، نسبت افزایش پارامتر شکست ذرات در شرایط انجام آزمایش نسبت به شرایط ساخت نمونه زیاد است و در نمونه‌های غرقاب نیز شکست ذرات افزایش کمی نسبت به نمونه‌های مرطوب دارد. با توجه به مقاومت فشاری تک محوری مصالح داسیت و آندزیت در شرایط خشک و اشباع که در جدول شماره (۲) ارائه شده است می‌توان به این نکته اشاره نمود که اشباع شدن باعث کاهش مقاومت مصالح داسیت و آندزیت می‌شود و به همین علت پارامتر شکست ذرات افزایش می‌یابد.

با مقایسه نتایج بین آزمایش‌های ادومتر و لوس آنجلس برای شرایط خشک و مرطوب می‌توان به این نکته اشاره نمود همانطور که در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) مشاهده می‌شود، شکل ذرات پس از انجام آزمایش کاملاً با یکدیگر متفاوت است و ذرات پس از انجام آزمایش ادومتر تیز گوشه هستند ولی بعد

### ۳-۴- نشست و تغییر شکل در هر دوره بارگذاری

برای بررسی مقدار نشست و تغییر شکل اتفاق افتاده در هر روز بارگذاری، نمودار تغییر شکل برای روزهای اول و چهارم و هفتم بارگذاری برای شرایط خشک و مرطوب مصالح داسیت در شکل (۹) نمایش داده شده است.

شکل ۹. تغییر شکل در هر روز آزمایش خشک و مرطوب داسیت

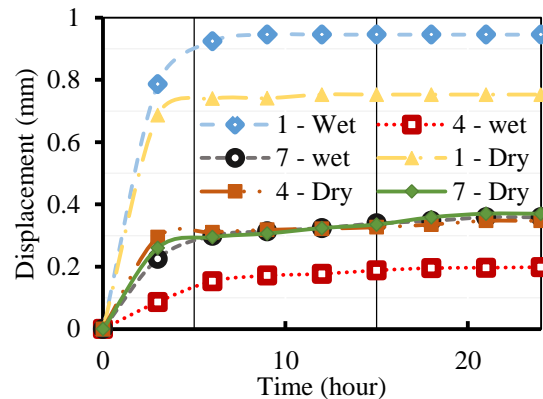


Fig. 9. Deformation of Dacite material at different hours each day

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود برای تمامی روزهای مشخص شده بیشترین مقدار تغییر شکل در سه ساعت اولیه اتفاق می‌افتد و بعد از ۹ ساعت مقدار تغییر شکل به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد و در ساعات انتهایی مقدار تغییر مکان نزدیک به صفر و یا صفر، و رفتار مصالح آندزیت نیز مانند رفتار مصالح داسیت است.

### ۵- بررسی نتایج

برای مقایسه شکست ذرات در شرایط مختلف از نتایجی که در جدول‌های (۲، ۵، ۶ و ۷) ارائه شده است استفاده می‌شود. برای شرایط ساخت نمونه، در مصالح داسیت که مصالح ضعیف تری است با افزایش آب مقدار شکست ذرات کاهش می‌یابد ولی برای مصالح آندزیت که مصالح مقاوم تری است با افزایش آب مقدار شکست ذرات افزایش می‌یابد که برای این تفاوت رفتار می‌توان به این نکته اشاره نمود که مصالح داسیت در حضور آب به عنوان ماده روان کننده که باعث کاهش اصطکاک سطحی شده و راحت تر نسبت به هم حرکت می‌کنند و همچنین به دلیل جذب آب زیاد ذرات مقدار زیادی

مرحله بارگذاری آزمایش مرطوب انجام می‌گیرد و بیشترین مقدار تغییر شکل در روز اول به دلیل افزایش آب انجام می‌گیرد و نشست در این آزمایش‌ها ناشی از دو عامل افزایش آب و زمان است که نشست‌ها در روزهای دوم تا هفتم به دلیل عامل زمان است و حدود ۶۵ الی ۸۰ درصد نشست‌های آزمایش غرقاب مربوط به افزایش آب و بقیه نشست مربوط به عامل زمان است.

با بررسی نشست‌های اتفاق افتاده در هر مرحله روزانه بارگذاری (۲۴ ساعت) که در شکل (۹) ارائه شده است نیز می‌توان گفت دو عامل افزایش بار و زمان روی تغییر شکل‌های هر مرحله تاثیرگذار است که تغییر شکل اولیه که در سه ساعت اولیه اتفاق می‌افتد ناشی از بارگذاری و تغییر شکل‌هایی که در ساعات بعدی اتفاق می‌افتد ناشی از عامل زمان و تغییر شکل‌های رئولوژیکی هستند و تغییر شکل ناشی از بارگذاری حدود ۷۰ الی ۸۰ درصد تغییر شکل کل است و تغییر شکل‌های ناشی از زمان و تغییر شکل‌های رئولوژیکی حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد تغییر شکل در هر روز را باعث می‌شود.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی نشست و پدیده شکست ذرات در سنگریزه‌های ضعیف پرداخته شده است. از نتایج این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- پدیده شکست ذرات مصالح دارای سه سازوکار است: (۱) شکستگی زاویه‌ای که در لبه‌ها و گوشه‌های ذرات که ناشی از نیروهای تماسی بین ذرات است. (۲) ترک خوردن ذرات که به دلیل گسترش ترک‌های داخلی یا در ذرات باریک در اثر تغییرات تنش اتفاق می‌افتد. (۳) فروپاشی ذرات که در سنگ‌های ضعیف یا تنش‌های وارد شده خیلی بالا اتفاق می‌افتد. بنابراین شکست ذرات در مرحله ساخت نمونه ناشی از شکستگی زاویه‌ای که در لبه‌ها است و شکست ذرات در مرحله بارگذاری آزمایش ادمتر ناشی از ترک‌خوردگی و فروپاشی ذرات تحت بارگذاری است.

از انجام آزمایش لوس آنجلس به دلیل سایشی بودن ماهیت آزمایش ذرات به شکل گردگوشه و فاقد هرگونه تیزی در ذرات هستند.

شکل ۱۰. شکل ذرات پس از آزمایش ادمتر



Fig. 10. Material after Oedometer test

شکل ۱۱. شکل ذرات پس از آزمایش لس آنجلس



Fig. 11. Material after Los Angeles test

ولی به عنوان یک راهنمای اولیه می‌توان ضرایب پیشنهادی زیر را برای نتایج دو آزمایش در نظر گرفت.  
شرایط خشک:

$$(B_g)_{Los\ Angles} = (2.5 \sim 3.2)(B_g)_{Oedometer} \quad (۳)$$

شرایط مرطوب:

$$(B_g)_{Los\ Angles} = (2.4 \sim 2.6)(B_g)_{Oedometer} \quad (۴)$$

برای نشست و کرنش نمونه‌ها که در شکل (۷) ارائه شده است همان‌گونه که در مطالعات قبلی دیده شده افزایش آب باعث نشست بیشتری در نمونه‌های آزمایش می‌شود. تغییر شکل‌ها در آزمایش خشک فقط به دلیل پدیده شکست ذرات در مراحل بارگذاری مصالح است ولی تغییر شکل‌ها در آزمایش مرطوب به دلیل پدیده شکست ذرات و حضور آب است که با بررسی نتایج آزمایش‌ها به این نکته می‌توان اشاره نمود که سهم آب در تغییر شکل‌های آزمایش ادمتر مصالح داسیت و آندزیت بین ۴۵ الی ۶۰ درصد متغیر است و بقیه تغییر شکل ناشی از پدیده شکست ذرات هستند. همچنین تغییر شکل‌ها و کرنش‌ها در آزمایش‌های غرقاب که در شکل (۸) نمایش داده شده است و افزایش آب بعد از آخرین

- [8] Xiao, Y., Liu, H., Zhang, W., Liu, H., Yin, F., & Wang, Y., 2016. Testing and modeling of rockfill materials: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3), 415-422.
- [9] Kanji, M.A., 2014. Critical issues in soft rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(3), pp.186-195.
- [10] ICOLD, 2008. Weak Rocks and shales in Dams-Bulletin134.
- [11] Komak Panah, A., Aghamajidi, M., 2010, The creep of rockfill materials in large scale oedometer with the aspect of particle breakage and Los Angeles test, *Civil Engineering Journal of Modares*, vol. 10, No. 1, pp. 103-114. (In Persian)
- [12] ASTM C535, 2003, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- [13] Absaran Consulting Engineers, 2010. Nohob Storage Dam Studies, Qazvin Regional Water Authority. (In Persian)
- [14] ISRM, 2000. Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials.
- [15] Honkanandavar, N.P, Sharma, K.G., 2014. Effect of particle breakage on stress-strain-volume change behaviour of alluvial rockfill material. *Proceeding of Indian Geotechnical Conference*.
- [16] Marachi, N. D., 1969. Strength and Deformation. Characteristics of Rockfill Materials. Report No. TE-69-5 to State of California Department of Water Resources.
- [17] Lowe, 1964. Shear strength of coarse embankment dam materials. Proc. 8<sup>th</sup> *International Congress on Large Dams*, 3, 745-761.
- [18] ASTM D4254, 2016. Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation relative density.
- [19] ASTM D4253, 2016, standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table.
- [20] Gupta, A., 2005. Effect of particle size and confining pressure on breakage and strength parameters of rockfill materials. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 14.
- [21] Gupta, A. K., 2009. Effect of particle size and confining pressure on breakage and strength parameters of rockfill materials. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14(Bund. H), 1-12.

۲ - وجود آب در آزمایش‌های ادومتر دارای سه سازوکار است: (۱) روان‌کنندگی که باعث می‌شود ذرات راحت‌تر نسبت به هم حرکت کنند و شکستگی زاویه‌ای کاهش یابد و در مرحله تراکم مصالح داسیت این عامل مشاهده شده است. (۲) جذب انرژی توسط آب در مرحله تراکم که برای مصالح با تخلخل کمتر که جذب آب کمتری دارد این پدیده اتفاق می‌افتد و برای رسیدن به تراکم نیاز به انرژی بیشتر و شکست ذرات بیشتر است که در مصالح آندزیت اتفاق می‌افتد. (۳) نرم‌شدگی مصالح در حضور آب که وقتی مصالح ضعیف تحت تاثیر تنش قرار می‌گیرد اضافه شدن آب باعث نرم‌شدگی مصالح می‌شود و تغییر شکل‌های نمونه‌ها خیلی افزایش می‌یابد که در مصالح آندزیت و داسیت مورد آزمایش مشاهده شد.

۳ - در هر مرحله بارگذاری تغییر شکل اتفاق افتاده در ساعات اولیه ناشی از بار وارد شده است که عمده تغییر شکل را شامل می‌شود و تغییر شکل‌های بعدی تحت بار ثابت ناشی از عامل زمان است که با افزایش زمان نرخ افزایش تغییر شکل به کندی است.

## References

## ۷- مراجع

- [1] ICOLD, 1993. Rock material for Rockfill Dams-Review and Recommendation-Bulletin 92.
- [2] Vitenberg, m & Melnik, V, 1982. Influence of soft rock-fill material as dam embankment. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- [3] Brown, a. J., 1989. Discussion: Use of soft rockfill at Evretou Dam, Cyprus. *Géotechnique*, 39(3), pp.563-564.
- [4] Xing, H.-F. et al., 2006. Construction of Concrete-Faced Rockfill Dams with Weak Rocks. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(6), pp.778-785.
- [5] FU Jun, Z.X., 2008. Engineering Properties of Soft Rock Materials Used in Concrete Face Dams. *Journal of Yangtze river scientific research institue*, 4.
- [6] Zhang, B.Y., Zhang, J.H. & Sun, G.L., 2012 . Particle breakage of argillaceous siltstone subjected to stresses and weathering. *Engineering Geology*, 137-138, pp.21-28.
- [7] Marsal, R., 1967. Large scale testing of rockfill material. *Journal of the soil mechanics and foundation division*, 93, pp.27-43.

## Settlement and Particle Breakage of Weak Rockfill Materials in Medium Scale Oedometer

Ali. Komak Panah<sup>1</sup>, Hamidreza. Rahmani<sup>2</sup>

1-Associate Professor, faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2-Phd candidate, faculty of civil and environmental engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

a-panah@modares.ac.ir

### Abstract

Rockfill materials are used in construction projects such as dam construction, road construction and so on. Due to the increasing use of these materials, experiments and studies have also been carried out on this material and usually, these studies have been carried out on strong rockfill materials. Today, the use of soft and weak rockfill materials has expanded because the economic and environmental issues. These marginal materials traditionally would not be used owing to their unfavorable engineering properties that is, low strength, high compressibility, and proneness to material degradation with time. Therefore, the use of soft rocks excavated on site as rockfill materials for high rockfill dams is still a controversial issue, as weathering takes place when the rock is exposed to an environment in which variations in air, temperature, and water content are involved. and still no comprehensive studies have been conducted on soft rockfill materials and need more information on the behavior of these materials in different conditions. One of the most important subject discussed in the rockfill materials is the particle breakage phenomena. Particle breakage index that quantifies the degree of particle breakage, can reflect the degree of particle crushing of material. To select weak rockfill materials, we visited the Nohob dam that is under construction and rockfill material in spillway excavation section is thrown away and it is not used in the construction of the dam. With considering that the dimensions of the usable rockfill material may be much larger than the dimensions of the laboratory equipment. Therefore, it is always a matter of scaling and matching the results of the laboratory and the field from the important items of rockfill materials. In this research, the behavior of weak rockfill materials has been studied in medium scale oedometer apparatus, in dry, wet and saturate conditions and also Los Angeles experiment is done. Based on the present study, the particle breakage increases with the addition of water and in saturate conditions, particle breakage also has a slight increase compared to wet conditions and for settlements and deformations of wet and dry specimens of materials show that wet specimens settlements are more than dry specimens.

**key words:** Particle Breakage, Weak Rockfill Material, Medium Scale Oedometer