

خزش مصالح سنگریزه‌ای در دستگاه ادومتر با مقیاس بزرگ با رویکردی به پدیده شکست ذرات و آزمایش سایش لوس آنجلس

علی کمک‌پناه^{۱*}، محمد آقامجیدی^۲

۱- دانشیار ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

a-panah@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: تیر ۱۳۸۳، پذیرش مقاله: آبان ۱۳۸۵)

چکیده- خزش، تغییر شکل مصالح تحت تنش ثابت با گذشت زمان است. برای مطالعه خزش مصالح سنگریزه‌ای، مصالح سه سد در حال ساخت در ایران انتخاب و این مصالح در دستگاه ادومتر بزرگ مقیاسی که برای این تحقیق طراحی و ساخته شد تحت آزمایش قرار گرفت. با مقایسه نرخ خزش این مصالح با میزان شکست ذرات و مقاومت سایشی نمونه‌ها در آزمایش لوس آنجلس رابطه‌ای بین این سه پارامتر مشاهده شد. بنابراین به آزمایش ساده لوس آنجلس می‌توان تخمین‌هایی از رفتار مصالح سنگریزه‌ای به‌ویژه پارامترهای شکست ذرات و خزش به‌دست آورد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، رابطه‌ای تجربی بین پارامترهای خزش و شکست ذرات با نتایج آزمایش لوس آنجلس ارائه شده است.

کلید واژگان: آزمایش ادومتر، مصالح سنگریزه‌ای، خزش، شکست ذرات.

۱- مقدمه

امروزه از مصالح سنگریزه‌ای در پروژه‌های مختلف عمرانی از جمله ساخت سدها، اسکله‌ها، بندرگاه‌ها و زیرسازی شبکه‌های حمل و نقل در سراسر جهان استفاده می‌شود. لذا لازم است شناخت کافی از رفتار و خصوصیات این مصالح به‌دست آورد که در اغلب موارد برای این منظور به انجام آزمون‌های آزمایشگاهی نیاز است. باید توجه داشت که به دلیل درشت‌دانه بودن این مصالح، استفاده از دستگاه‌های معمول موجود در آزمایشگاه‌ها برای آزمایش بر روی آنها امکان‌پذیر نیست و باید دستگاه‌های بزرگ مقیاس مناسبی طراحی و ساخته شود.

این ممکن است برای تمامی آزمایشگاه‌ها میسر نباشد. بنابراین اگر بتوان بین خصوصیات مختلف این مصالح و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی آنها روابطی برقرار کرد، می‌توان

با انجام آزمایش‌هایی معمول‌تر، به پیش‌بینی‌ها و تخمین‌هایی درباره رفتار مصالح سنگریزه‌ای پرداخت. در این تحقیق، با انتخاب سه نوع مصالح سنگریزه‌ای، دو دسته آزمایش بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. با انجام این آزمایش‌ها که سایش لوس آنجلس و ادومتر بزرگ مقیاس است، سعی شده بین نتایج آنها روابطی برقرار شود. ارجحیت این روابط در آن است که با انجام آزمایش سایش لوس آنجلس که دسترسی به آن آسان‌تر است و به‌سادگی و با هزینه کمی قابل انجام است، می‌توان تخمین‌ها و پیش‌بینی‌هایی را درباره رفتار مصالح سنگریزه‌ای مانند شکست ذرات، خزش و فروریزش انجام داد.

در این تحقیق، برای آزمایش‌های ادومتر، دستگاهی با مقیاس بزرگ طراحی و ساخته شد و آزمایش‌های مربوط به خزش در آن انجام گردید.

۲- خواص و رفتار مصالح سنگریزه‌ای

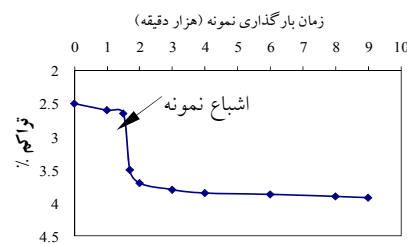
۲-۱- شکست ذرات

شکست ذرات، خرد شدن سنگدانه‌های مصالح سنگریزه‌ای بر اثر تنش‌های وارد شده می‌باشد و از مهمترین پدیده‌های مورد توجه در توده‌های سنگریزه‌ای است. شکست ذرات باعث تغییر در دانه‌بندی مصالح شده و بر خصوصیات رفتاری توده سنگریزه‌ای اثر می‌گذارد. برخی از عوامل مؤثر بر شکست ذرات عبارتند از: اندازه و شکل ذرات، تنش مؤثر، دانه‌بندی و حضور یا عدم حضور آب در نمونه [۱].

لی و فرهومند نسبت D_{15} مصالح قبل از بارگذاری به D_{15} همان مصالح پس از بارگذاری را به‌عنوان عامل شکست ذرات در نظر گرفتند [۲].

۲-۲- فروریزش مصالح سنگریزه‌ای

نشست و تغییر حجم توده سنگریزه‌ای تحت تنش کل ثابت را در شرایطی که نمونه مرطوب می‌شود فروریزش می‌نامند (شکل ۱). برخی از عوامل مؤثر بر فروریزش عبارتند از: مقدار تنش، نوع سنگ، نسبت تخلخل خاکریز و دانه‌بندی مصالح [۳].



شکل ۱ فروریزش سنگریزه در آزمایش ادمتر

۳-۲- خزش مصالح سنگریزه‌ای

خزش، تغییر شکل مصالح تحت تنش ثابت در گذر زمان است [۴]. امروزه که گزارش‌هایی مبنی بر نشست‌های بیش از یک متر در سدهای سنگریزه‌ای ساخته شده انتشار یافته، اهمیت پیدا کردن روشی برای محاسبه خزش در

خاکریزهای سنگریزه‌ای دو چندان می‌شود [۵].

ساورز و همکاران گزارشی را از نشست پس از ساخت در تعدادی از سدهای سنگریزه‌ای امریکا ارائه کردند [۶]. آنها نشست تاج سد را به‌عنوان درصدی از ارتفاع خاکریز با لگاریتم زمان ترسیم کردند و مبدأ را زمانی در نظر گرفتند که نیمی از ارتفاع سد احداث شده بود. بسیاری از این تغییر شکل‌ها، خطی بود و بنابراین رابطه زیر توسط آنها ارائه شد:

$$\varepsilon = \alpha (\log t_2 - \log t_1) \quad (1)$$

که در آن:

ε ، نشست به صورت درصدی از ارتفاع خاکریز که بین زمان t_1 و t_2 اتفاق می‌افتد.

α ، ضریبی بین 0.2 و 1 بر حسب درصد است که برای 14 سد تخمین زده شده است.

آنها خاطر نشان کردند که خزش به ارتفاع، نوع سنگ یا نوع سد وابسته نیست بلکه عامل تأثیرگذار، نحوه ساخت سد است.

لاوتون و لستور نشست‌های پس از ساخت تاج چند سد را به روش دیگری تحلیل کردند [۷]. آنها مطالعاتشان را فقط بر روی سدهایی انجام دادند که نرخ نشست سالیانه آنها از 0.2 درصد ارتفاع سد بیشتر بود. آنها با مطالعه 13 سد شامل انواع غشادار و با هسته خاکی، به رابطه زیر دست یافتند:

$$S = 0.001 H^{3/2} \quad (2)$$

که در آن، S نشست تاج بر حسب متر و H ارتفاع سد بر حسب متر است. رابطه را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

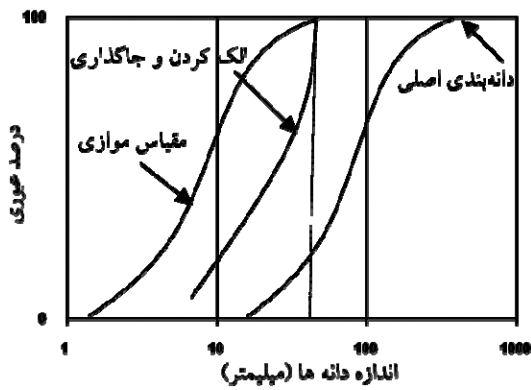
$$\varepsilon = 0.01 H^{1/2} \quad (3)$$

که در آن، ε نشست تاج به صورت درصدی از ارتفاع خاکریز است.

به نظر می‌رسد که رابطه فوق با یافته‌های ساورز در تضاد باشد؛ زیرا او معتقد بود که نشست، به نحوه ساختن سد بستگی دارد و به ارتفاع آن وابسته نیست.

جارنسل و سند [۸] رابطه زیر را پیشنهاد کردند:

$$S = K H^{1/2} \quad (4)$$



شکل ۲ تبدیل دانه بندی نمونه های آزمایشگاهی

۴- دستگاه ادومتر با مقیاس بزرگ

برای انجام آزمایش های ادومتر روی مصالح سنگریزه ای مورد مطالعه، دستگاه ادومتری با مقیاس بزرگ طراحی و ساخته و در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تربیت مدرس نصب و استفاده شد. در شکل (۳) نمایی از دستگاه مشاهده می شود. اجزای اصلی دستگاه عبارتند از:

۱- استوانه سلول که حاوی سنگ های زهکش و سلول حاوی نمونه است.

۲- اهرم بارگذاری که بار وزنه های اعمالی را به نمونه داخل سلول منتقل می کند.

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

۴- قاب بارگذاری قائم که بار وزنه ها را از طریق اهرم بارگذاری به نمونه ها منتقل می کند.

سلول حاوی نمونه، استوانه ای از جنس فولاد زنگ نزن به قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵ سانتیمتر است.



شکل ۳ دستگاه ادومتر با مقیاس بزرگ

که در آن، K ضریبی است بین $10^{-6} \times 0.5$ و $10^{-6} \times 1$ و S و H بر حسب متر است.

روابط (۳) و (۴) بیان می کنند که نشست و به تبع آن خزش، با افزایش تنش افزایش می یابند.

نرخ خزش اندازه گیری شده در محل، بین دو تا چهار برابر نرخ خزش به دست آمده در آزمایشگاه است. تفاوت های بین شرایط آزمایش با دستگاه ادومتر و شرایط محلی علت اصلی این اختلاف است. در نمونه های آزمایشگاهی کرنش جانبی صفر است در صورتی که در محل، امکان انبساط جانبی وجود دارد [۸].

۳- آزمون های آزمایشگاهی روی مصالح

سنگریزه ای

برای شناخت خصوصیت ها و رفتار مصالح سنگریزه ای، آزمون های آزمایشگاهی ضروری است. آزمایش روی مصالح واقعی مورد استفاده در سازه های سنگریزه ای به دلیل درشت دانه بودن آنها امکان پذیر نیست. بنابراین برای آزمایش باید مدلهایی با مقیاس کوچک تر از مصالح اصلی تهیه کرد و آزمایش ها را روی آنها انجام داد. بدین منظور سه روش معمول است:

۱- الک کردن ذرات خارج از اندازه

۲- الک کردن و جاگذاری

۳- مقیاس موازی

زمانی که درصد ذرات خارج از اندازه کمتر از ۵ درصد باشد، می توان آنها را حذف کرد. این روش را الک کردن ذرات خارج از اندازه می نامند [۹].

در روش الک کردن و جاگذاری، ذرات بزرگتر از ۶۰ میلی متر حذف شده و معادل وزنی آن، ذراتی در محدوده قرار داده می شود. معمولاً این جایگزینی ها بین ۴/۵۷ میلی متر و ۶۰ میلی متر است. این روش در استاندارد ASTM تشریح شده است.

در روش مقیاس موازی، منحنی دانه بندی اصلی مصالح به قطرهای کوچکتری شیفต์ داده می شود، به طوری که حداکثر اندازه دانه ها به مقدار d کاهش یابد. در این روش تهیه نمونه، به مواد ریزدانه باید توجه شود (شکل ۲).

۵- آزمایش‌ها

۵-۱- روش آزمایش

هدف این تحقیق مطالعه آزمایشگاهی خزش مصالح سنگریزه‌ای است. خزش، تغییر شکل بلندمدت مصالح تحت تنش ثابت با گذشت زمان است. آزمایش‌های لازم در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه تربیت مدرس برنامه‌ریزی و در دستگاه فوق به شرحی که می‌آید انجام شد. نمونه‌ها در این دستگاه تحت تنش قرار داده می‌شوند و نشست‌های آنها در طول حداقل یک هفته - که آزمایش به طول می‌انجامد - ثبت می‌شود.

نمونه‌هایی که برای این آزمایش‌ها در نظر گرفته شد، مصالح سنگریزه‌ای سه سد در استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل است. این مصالح از سدهای سنگریزه‌ای و نیار و آیدوغموش در استان آذربایجان شرقی و سد سبلان واقع در استان اردبیل تهیه شده است.

آزمایش‌ها 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 در سلول ریخته و به‌طور همزمان آب به سلول اضافه 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، همزمان با ریختن مصالح، آب نیز به سلول اضافه می‌شود. پس از پر شدن سلول، کل استوانه سلول از آب پر و سپس در حضور آب، تنش به نمونه اعمال می‌شود.

آزمایش‌ها بر روی هر نمونه در سه تنش متفاوت انجام شد. این تنش‌ها عبارت بود از ۵ و ۱۰ و ۱۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع که آنها را به‌ترتیب می‌توان تنش کم، متوسط و زیاد دانست. بنابراین بر روی هر نمونه تهیه

شده از سدها، در هر وضعیت آزمایش، سه آزمایش با تنش‌های فوق انجام شد که با توجه به سه وضعیت مذکور، بر روی هر نمونه ۹ آزمایش انجام گرفته است. مدت زمان انجام هر یک از آزمایش‌ها، حداقل یک هفته در نظر گرفته شده است.

۵-۲- مشخصات مصالح

مصالح سنگریزه‌ای مورد آزمایش از سه سد سنگریزه‌ای در ایران به نام‌های آیدوغموش، سبلان و و نیار تهیه شده است. در جدول (۱) مشخصات مصالح مورد آزمایش آورده شده است.

۵-۳- دانه‌بندی آزمایش

با توجه به درشت‌دانه بودن مصالح سنگریزه‌ای مورد استفاده در سدها، برای انجام آزمایش روی این مصالح، باید دانه‌بندی واقعی آنها مدل‌سازی شود. دانه‌بندی مدل‌شده از روی نمودار دانه‌بندی ۲۵ سد سنگریزه‌ای ساخته‌شده در ژاپن به‌دست آمده است [۱۰]. برای مدل‌سازی کردن نمودار از روش سرند کردن استفاده شده است.

جدول ۱ نام و نوع سنگدانه سدها

نام سد	جنس سنگدانه
ونیار	ماسه‌سنگ
آیدوغموش	آندزیت - آذرین بیرونی
سبلان	دیوریت و آندزیت - آذرین

برای تعیین حداکثر قطر دانه به‌کار رفته از روش پنینن استفاده شده است. در این روش که حداکثر اندازه دانه‌ها در نمونه آزمایشگاهی (d) از روی کوچکترین بعد سلول نمونه مورد آزمایش (D) انتخاب می‌شود که در این حالت باید $4 < \frac{D}{d} < 6$ باشد.

بر این اساس با توجه به این‌که $D = 15$ سانتی‌متر است. با فرض $\frac{D}{d} = 5$ بزرگترین قطر به کاررفته عبوری از الک ۱/۲۵ اینچ و مانده روی الک، یک اینچ انتخاب شد. نمودار دانه‌بندی مورد استفاده در شکل (۴) آورده شده است.

گلوله‌ها روی مصالح در دستگاه لوس آنجلس و پس از ۱۰۰۰ دور حرکت دورانی دستگاه، مصالح از دستگاه خارج شده و مصالح باقی مانده روی الک شماره ۱۲ پس از شستشو و خشک شدن، وزن می‌شوند (W_2). درصد کاهش وزن مصالح در اثر سایش بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{درصد کاهش وزن مصالح بر اثر سایش} = (W_1 - W_2) / W_1 \times 100$$

برای انجام این آزمایش، از هر سه نوع مصالح، سه نمونه تهیه شده و مقدار میانگین آنها به عنوان درصد کاهش وزن آن مصالح بر اثر سایش گزارش شده است. بدیهی است که هرچه این درصد بیشتر باشد، مصالح ضعیف‌تر و مقاومت سایشی آن کمتر خواهد بود. جدول (۲) نتایج آزمایش‌های لوس آنجلس را روی نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد [۱۰].

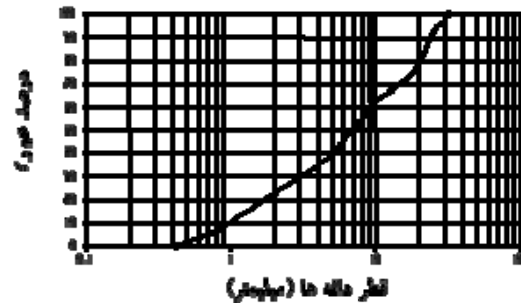
جدول ۲ نتایج آزمایش سایش لوس آنجلس روی نمونه‌ها

نمونه	درصد سایش
آیدوغموش	۱۹
سبلان	۲۸
ونیار	۳۰

از نمودار نتایج آزمایش مشاهده می‌شود که در بین سه نوع مصالح مورد آزمایش، نمونه آیدوغموش، بیشترین مقدار مقاومت سایشی و نمونه ونیار کمترین مقاومت سایشی را دارد. بنابراین سختی و مقاومت سنگدانه‌های آیدوغموش از سنگدانه‌های سبلان بیشتر و سنگدانه‌های سبلان از نمونه ونیار بیشتر است.

۶-۲ نتایج آزمایش ادمتر فشاری

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، برای هر نمونه در سه حالت مختلف سه آزمایش انجام و در هر حالت حداقل دو آزمایش روی نمونه‌ها انجام شد. از آزمایش‌های انجام شده در هر حالت، یکی که نتایج آن با روند کلی آزمایش‌ها



شکل ۴ منحنی دانه‌بندی آزمایشگاهی نمونه‌های مصالح

سنگریزه‌ای سبلان، آیدوغموش و ونیار

۶- نتایج آزمایش‌ها

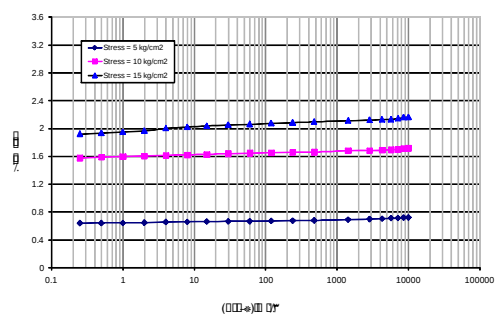
۶-۱ نتایج آزمایش لوس آنجلس

اگرچه این آزمایش برای تعیین مقاومت سایشی دانه‌های سنگی است، اما به نظر می‌رسد که مقاومت سایشی ارتباط نزدیکی با سایر خصوصیات مقاومتی سنگ به‌ویژه شکست ذرات داشته باشد. عموماً دسترسی به این دستگاه ساده است بنابراین در صورت مشخص نبودن روابطی می‌توان با نتایج این آزمایش، به برآوردهایی از سایر پارامترها دست یافت. آزمایش‌های مربوط به این تحقیق، مطابق استاندارد شماره ۴۴۸ ایران به نام «تعیین سایش مصالح سنگی درشت دانه با استفاده از ماشین لوس آنجلس» انجام شده است [۱۱].

بر طبق این استاندارد چندین دانه‌بندی مختلف از سنگدانه‌ها وجود دارد که برای این آزمایش‌ها دانه‌بندی G انتخاب شده است. در این دانه‌بندی مقدار ۵ کیلوگرم از مصالح عبوری از الک ۱/۵ اینچ و مانده روی الک یک اینچ و مقدار ۵ کیلوگرم از سنگدانه‌های عبوری از الک یک اینچ و مانده روی الک ۰/۷۵ اینچ با هم مخلوط شده و در دستگاه لوس آنجلس ریخته می‌شود. (وزن اولیه مصالح $W_1=10$ کیلوگرم).

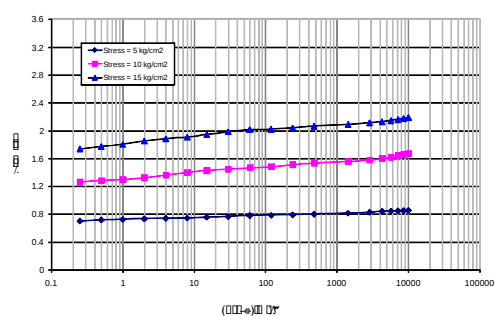
گلوله‌های فولادی استفاده شده برای این دانه‌بندی، ۱۲ عدد جمعاً به وزن ۵ کیلوگرم است. با ریختن این

حالت غرقاب در تنش‌های مختلف



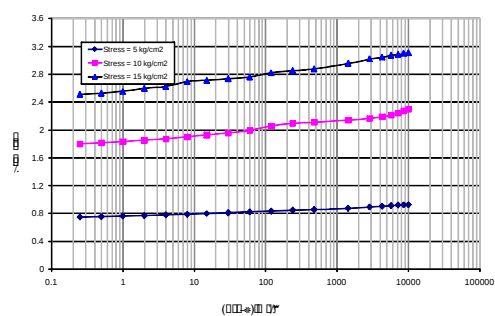
شکل ۸ نتایج آزمایش‌های ادومتر برای نمونه سبلان در حالت

خشک در تنش‌های مختلف



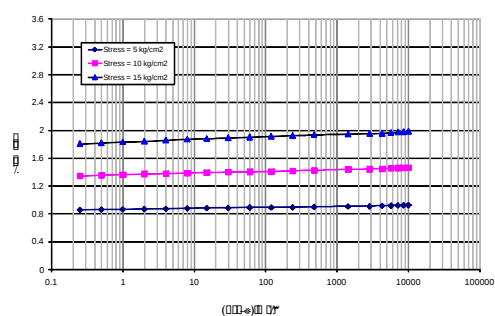
شکل ۹ نتایج آزمایش‌های ادومتر برای نمونه سبلان در حالت

مرطوب در تنش‌های مختلف



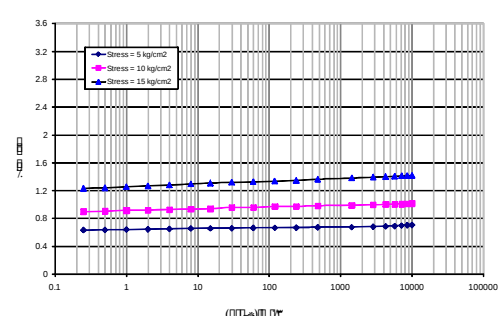
شکل ۱۰ نتایج آزمایش‌های ادومتر برای نمونه سبلان در حالت

غرقاب در تنش‌های مختلف



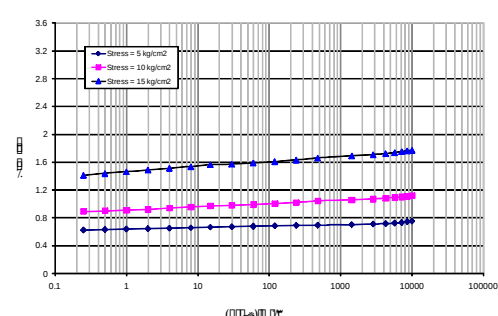
شکل ۱۱ نتایج آزمایش‌های ادومتر برای نمونه ونیار در حالت

همخوانی بیشتری داشت، انتخاب شد. در شکل‌های (۵) تا (۷) نمودار کرنش - لگاریتم زمان برای حالت‌های خشک، مرطوب و غرقاب برای نمونه آیدوغموش ترسیم شده است. در هر نمودار، نتایج آزمایش برای سه تنش مورد آزمایش و برای هر حالت نمونه از نظر رطوبت کنار هم آورده شده است. نمودارهای فوق برای نمونه سبلان در شکل‌های (۸) تا (۱۰) و برای نمونه ونیار در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) ارائه شده است.



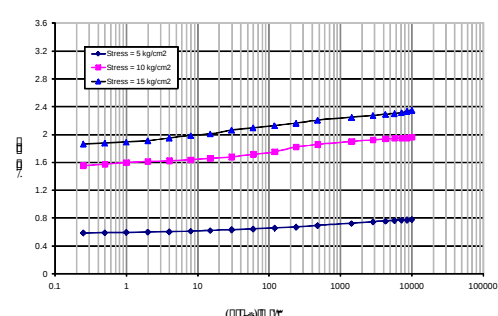
شکل ۵ نتایج آزمایش‌های ادومتر برای نمونه آیدوغموش در

حالت خشک در تنش‌های مختلف



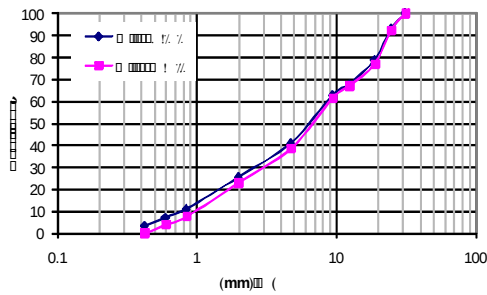
شکل ۶ نتایج آزمایش‌های ادومتر برای نمونه آیدوغموش در

حالت مرطوب در تنش‌های مختلف

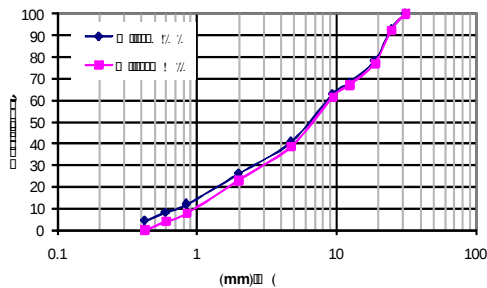


شکل ۷ نتایج آزمایش‌های ادومتر برای نمونه آیدوغموش در

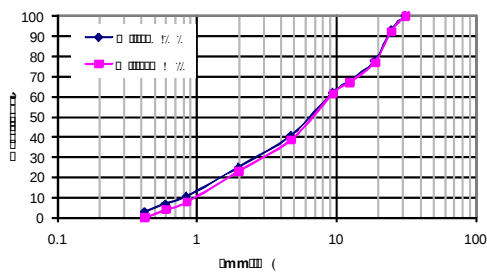
تنش ۱۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع و حالت خشک



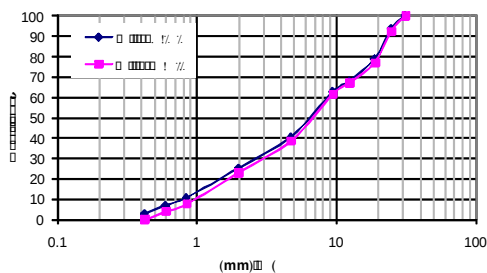
شکل ۱۵ نمودار دانه‌بندی نمونه و نیار قبل و پس از آزمایش در تنش ۱۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع و حالت مرطوب



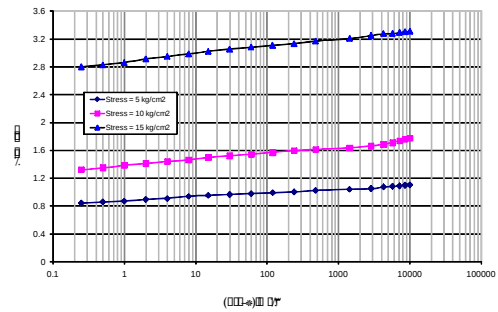
شکل ۱۶ نمودار دانه‌بندی نمونه و نیار قبل و پس از آزمایش در تنش ۱۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع و حالت غرقاب



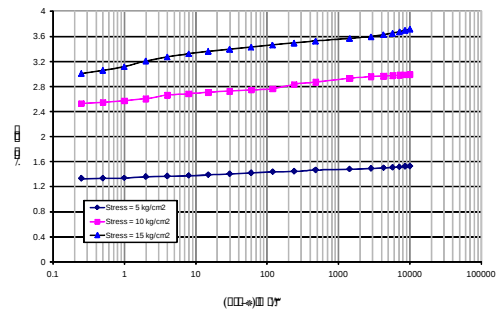
شکل ۱۷ نمودار دانه‌بندی نمونه و نیار قبل و پس از آزمایش در تنش ۱۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع و حالت خشک



خشک در تنش‌های مختلف



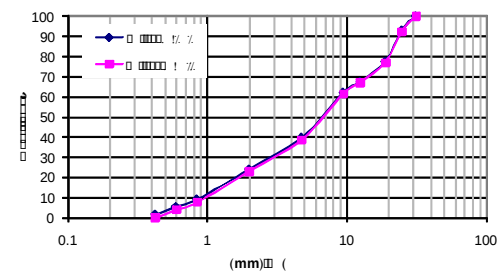
شکل ۱۲ نتایج آزمایش‌های ادمتر برای نمونه و نیار در حالت مرطوب در تنش‌های مختلف



شکل ۱۳ نتایج آزمایش‌های ادمتر برای نمونه و نیار در حالت غرقاب در تنش‌های مختلف

۳-۶- نتایج پدیده شکست ذرات

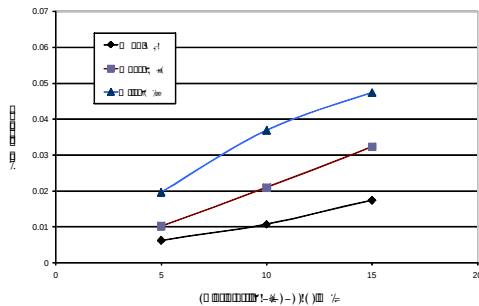
در نمونه‌های آیدوغموش و سبلان، پدیده شکست ذرات قابل توجه نیست؛ اما در نمونه و نیار بیشتر است. بنابراین فقط به نتایج مربوط به نمونه و نیار می‌پردازیم. در این نمونه با افزایش تنش و با تغییر حالت آزمایش از خشک به غرقاب میزان شکست ذرات افزایش می‌یابد. نمودارهای دانه‌بندی نمونه و نیار قبل و پس از آزمایش ادمتر برای تنش‌های ۱۰ و ۱۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع در شکل‌های (۱۴) تا (۱۹) آورده شده است.



شکل ۱۴ نمودار دانه‌بندی نمونه و نیار قبل و پس از آزمایش در

مرطوب	۰/۰۳۳۳
غرقاب	۰/۰۴۷۴

در شکل (۲۰) نمودار تنش در برابر نرخ خزش ارائه شده است.



شکل ۲۰ نمودار تنش - نرخ خزش نمونه آیدوغموش در حالت‌های خشک، مرطوب و غرقاب

از نمودار فوق مشاهده می‌شود که تغییرات نرخ خزش در برابر تنش تقریباً خطی است و می‌توان خطی را بر آن برازش کرد. لذا با در نظر گرفتن حالت آزمایش از نظر رطوبت آن رابطه زیر را می‌توان ارائه کرد:

$$\alpha = 0.0011 \cdot C \cdot \sigma_{\text{oad}} \quad (6)$$

که در آن σ_{oad} تنش قائم وارده در ادومتر بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، α نرخ خزش و C ضریبی است وابسته به حالت آزمایش. بر اساس شیب خطی که می‌توان بر نمودارهای فوق برازش کرد این مقادیر برای ضریب C به‌دست می‌آید: $C=1$ در حالت خشک $C=2$ در حالت مرطوب $C=2/6$ در حالت غرقاب

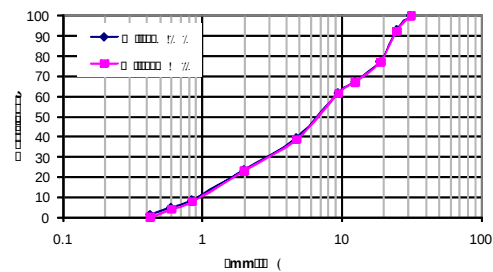
۷-۱-۲- نمونه سبلان

در جدول (۴) نرخ خزش برای هر آزمایش ارائه شده است.

جدول ۴ نرخ خزش آزمایش‌های نمونه سبلان

تنش (kg/cm ²)	وضعیت	نرخ خزش %
۵	خشک	۰/۰۰۷۶
	مرطوب	۰/۰۱۳۹
	غرقاب	۰/۰۱۶۸
۱۰	خشک	۰/۰۱۲
	مرطوب	۰/۰۳۲۹
	غرقاب	۰/۰۴۶۱
۱۵	خشک	۰/۰۲۱

شکل ۱۸ نمودار دانه‌بندی نمونه و نیار قبل و پس از آزمایش در تنش ۱۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و حالت مرطوب



شکل ۱۹ نمودار دانه‌بندی نمونه و نیار قبل و پس از آزمایش در تنش ۱۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و حالت غرقاب

۷- تحلیل نتایج

۷-۱-۲- نتایج آزمایش ادومتر

همان‌طور که در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود، رفتار نشست با لگاریتم زمان برای نمونه‌ها خطی است. بنابراین رابطه زیر را می‌توان ارائه کرد:

$$\varepsilon = \alpha (\log t_2 - \log t_1) \quad (5)$$

که در آن α شیب خط یا نرخ خزش مصالح سنگریزه‌ای بر حسب درصد است.

همچنین از نمودارهای داده‌شده مشاهده می‌شود که نرخ خزش با افزایش تنش و با تغییر حالت آزمایش از خشک به غرقاب افزایش می‌یابد. مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها برای نمونه‌های مختلف به شرح زیر است.

۷-۱-۱- نمونه آیدوغموش

در جدول (۳) نرخ خزش برای هر آزمایش ارائه شده است.

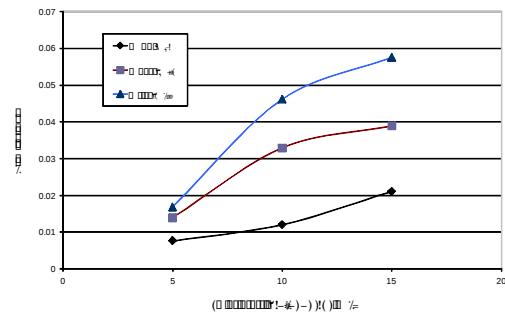
جدول ۳ نرخ خزش در آزمایش‌های نمونه آیدوغموش

تنش (kg/cm ²)	وضعیت	نرخ خزش %
۵	خشک	۰/۰۰۶۲
	مرطوب	۰/۰۱۰۲
	غرقاب	۰/۰۱۹۶
۱۰	خشک	۰/۰۱۰۷
	مرطوب	۰/۰۲۰۹
	غرقاب	۰/۰۳۶۹
۱۵	خشک	۰/۰۱۷۴

$C=4$ در حالت غرقاب

مرطوب	۰/۰۳۸۹
غرقاب	۰/۰۵۷۵

نمودار تنش در برابر نرخ خزش در شکل (۲۱) ارائه شده است.



شکل ۲۱ نمودار تنش - نرخ خزش نمونه سبلان در حالت‌های خشک، مرطوب و غرقاب

مانند نمونه قبلی رابطه زیر را می‌توان برای این نمونه ارائه کرد:

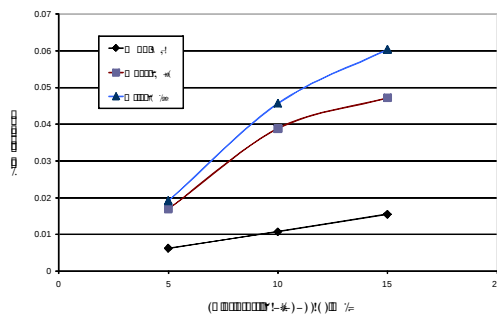
$$\alpha = 0.0013 \cdot C \cdot \sigma_{oed} \quad (7)$$

که برای این نمونه ضریب C به این صورت تعریف می‌شود:

$C=1$ در حالت خشک

$C=2$ در حالت مرطوب

$C=3$ در حالت غرقاب



شکل ۲۲ نمودار تنش - نرخ خزش نمونه و نیار در حالت‌های خشک، مرطوب و غرقاب

۲-۷- پدیده شکست ذرات

همانطور که پیشتر گفته شد، پدیده شکست ذرات با افزایش تنش و با تغییر حالت آزمایش از خشک به غرقاب در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این پدیده به ترتیب در نمونه‌های آیدوغموش، سبلان و و نیار افزایش نشان می‌دهد که با مقایسه این موضوع با نتایج نرخ خزش می‌توان نتیجه گرفت که بین میزان شکست ذرات و نرخ خزش رابطه‌ای مستقیم وجود دارد.

قطری که ۱۵ درصد دانه‌ها از آن ریزتر است با d_{15} نشان داده می‌شود. در اینجا اگر d_{15i} قطر عبوری مربوط به پیش از آزمایش و d_{15f} قطر عبوری مربوط به پس از آزمایش باشد، با توجه به یکسان بودن دانه‌بندی آزمایش‌ها برای تمامی نمونه‌ها از روی نمودار $d_{15i} = 1/3$ میلی‌متر

۳-۱-۷ نمونه و نیار

در جدول (۵) نرخ خزش برای هر آزمایش ارائه شده است. همچنین نمودار تنش در برابر نرخ خزش برای این نمونه در شکل (۲۲) ترسیم شده است.

در این حالت نیز رابطه زیر را می‌توان ارائه کرد:

$$\alpha = 0.0013 \cdot C \cdot \sigma_{oed} \quad (8)$$

که برای این نمونه ضریب C به این صورت تعریف می‌شود:

$C=1$ در حالت خشک

$C=3$ در حالت مرطوب

$$\alpha = c \cdot \sigma_{oed} [L/(L+2)] \cdot (D_{15i}/D_{15f}) \quad (9)$$

که در آن σ_{oed} تنش قائم وارده در ادمتر بر نمونه سنگریزه‌ای بر حسب کیلوگرم بر سانتی مترمربع، α نرخ خزش و c ضریبی است وابسته به حالت آزمایش و برابر است با:

$$c = 0.0014 \text{ در حالت خشک}$$

$$c = 0.0025 \text{ در حالت مرطوب}$$

$$c = 0.0037 \text{ در حالت غرقاب}$$

L درصد سایش در آزمایش سایش لوس آنجلس است.

$$\frac{D_{15i}}{D_{15f}} \text{ ضریب شکست ذرات است.}$$

توضیح: برای نمونه‌های آیدوغموش و سبلان ضریب شکست برابر یک در نظر گرفته شده است.

در جدول‌های (۷) تا (۹) به ترتیب میزان خطای مربوط به حالت‌های مختلف نمونه‌های آیدوغموش، سبلان و ونیار آورده شده است.

جدول ۷ مقایسه نرخ خزش مشاهده و محاسبه شده برای نمونه آیدوغموش

درصد خطا	α محاسبه شده	α مشاهده شده	وضعیت	تنش (kg/cm^2)
۰	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۶۲	خشک	۵
-۱۱	۰/۰۱۱۴	۰/۰۱۰۲	مرطوب	
۱۳	۰/۰۱۶۹	۰/۰۱۹۶	غرقاب	
-۱۵	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۰۷	خشک	۱۰
-۹	۰/۰۲۲۹	۰/۰۲۰۹	مرطوب	
-۸	۰/۰۳۳۸	۰/۰۳۶۹	غرقاب	
-۶	۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۷۴	خشک	۱۵
۶	۰/۰۳۴۳	۰/۰۳۲۳	مرطوب	
۶	۰/۰۵۰۷	۰/۰۴۷۴	غرقاب	

جدول ۸ مقایسه نرخ خزش مشاهده و محاسبه شده برای نمونه سبلان

درصد خطا	α محاسبه شده	α مشاهده شده	وضعیت	تنش (kg/cm^2)
۱۵	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۷۶	خشک	۵
۱۵	۰/۰۱۱۸	۰/۰۱۳۹	مرطوب	
۳	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۶۸	غرقاب	
۶	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۲	خشک	۱۰
۲۸	۰/۰۲۳۶	۰/۰۳۲۹	مرطوب	
۲۴	۰/۰۳۴۹	۰/۰۴۶۱	غرقاب	
۸	۰/۰۱۹۲	۰/۰۲۱	خشک	۱۵

به دست می‌آید. در جدول (۵)، d_{15f} برای آزمایش‌های نمونه ونیار آورده شده است.

جدول ۶ ضریب شکست ذرات آزمایش‌های نمونه ونیار

d_{15i}/d_{15f}	d_{15f} (mm)	وضعیت	تنش (kg/cm^2)
۱/۰۸	۱/۲	خشک	۵
۱/۱۸	۱/۱	مرطوب	
۱/۳	۱	غرقاب	
۱/۱۳	۱/۱۵	خشک	۱۰
۱/۲۳	۱/۰۵	مرطوب	
۱/۳۷	۰/۹۵	غرقاب	
۱/۱۸	۱/۱	خشک	۱۵
۱/۳۴	۰/۹۷	مرطوب	
۱/۴۴	۰/۹	غرقاب	

۸- نتیجه گیری

همان‌طور که در نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود، نرخ خزش به ترتیب در نمونه‌های آیدوغموش، سبلان و ونیار افزایش می‌یابد. همین روند در نتایج پدیده شکست ذرات و آزمایش سایش لوس آنجلس نیز مشاهده می‌شود.

میزان شکست ذرات در نمونه‌های آیدوغموش و سبلان - که سنگ‌های آذرین و از جنس سخت هستند - مقادیر قابل توجهی ندارد؛ اما در نمونه ونیار این میزان مشهودتر است و مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ خزش، میزان شکست ذرات بیشتر می‌شود.

با توجه به نتایج آزمایش سایش لوس آنجلس مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ خزش، میزان سایش سنگدانه‌ها در این آزمایش بیشتر می‌شود. بنابراین می‌توان به وجود رابطه‌ای بین نرخ خزش و مقاومت سایشی سنگدانه‌ها پی برد.

در صورتی که رابطه‌ای بین پارامترهای مورد مطالعه یعنی نرخ خزش، شکست ذرات و مقاومت سایشی سنگدانه‌ها نوشته شود، می‌توان با انجام آزمایش‌های رایجی مانند آزمایش سایش لوس آنجلس، به تخمین‌هایی از برخی خصوصیات مصالح سنگریزه‌ای مانند نرخ خزش و میزان شکست ذرات دست یافت.

با مطالعه و مقایسه نتایج تمامی آزمایش‌های انجام شده، رابطه زیر را می‌توان ارائه نمود:

برآورد نرخ خزش، آزمایش ادومتر باید انجام شود.

۳. به عنوان رابطه‌ای بین حالت آزمایش و تنش آن با نرخ خزش، رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\alpha = C \cdot \sigma_{\text{oad}} \quad (10)$$

که در این رابطه ضریب C به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$C = 0.0013 \text{ در حالت خشک}$$

$$C = 0.0024 \text{ در حالت مرطوب}$$

$$C = 0.0034 \text{ در حالت غرقاب}$$

در مورد نمونه‌های با مقاومت کمتر (ماسه سنگ) مانند نمونه ونیار به نتایج زیر می‌توان اشاره کرد:

۱. در محدوده تنش مورد مطالعه، شکست ذرات مشهود است و با افزایش تنش و همچنین با تغییر حالت آزمایش از خشک به غرقاب، میزان شکست ذرات افزایش می‌یابد.
۲. با انجام آزمایش سایش لوس آنجلس، می‌توان به برآوردهایی درباره شکست ذرات و نرخ خزش دست یافت. در سایش بیش از ۳۰ درصد، شکست ذرات در محدوده تنش مورد مطالعه، قابل توجه است.

نکته دیگری که در پایان ذکر می‌شود، این است که با توجه به روابط ارائه شده در این بخش و با استفاده از آنها، با انجام تعداد محدودی آزمایش ادومتر می‌توان نرخ خزش را در تنش‌های مختلف و حالت‌های مختلف آزمایش برآورد کرد.

۹	۰/۰۳۵۴	۰/۰۳۸۹	مرطوب
۹	۰/۰۵۲۴	۰/۰۵۷۵	غرقاب

جدول ۹ مقایسه نرخ خزش مشاهده و محاسبه شده برای نمونه ونیار

درصد خطا	α محاسبه شده	α مشاهده شده	وضعیت	تنش (kg/cm^2)
-۱۱	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۶۲	خشک	۵
۱۷	۰/۰۱۴۰	۰/۰۱۶۹	مرطوب	
-۱۵	۰/۰۲۲۱	۰/۰۱۹۱	غرقاب	
-۳۵	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۰۷	خشک	۱۰
۲۲	۰/۰۲۹۹	۰/۰۳۸۸	مرطوب	
-۵	۰/۰۴۷۹	۰/۰۴۵۶	غرقاب	
-۴۷	۰/۰۲۲۸	۰/۰۱۵۵	خشک	۱۵
-۱	۰/۰۴۷۶	۰/۰۴۷۲	مرطوب	
-۱۷	۰/۰۷۰۹	۰/۰۶۰۳	غرقاب	

با توجه به اینکه در نمونه‌های آیدوگموش و سبلان شکست ذرات بسیار کم اتفاق می‌افتد، می‌توان نسبت $\frac{D_{15i}}{D_{15f}}$ را از رابطه حذف کرد. همچنین با توجه به اینکه نسبت $\frac{L}{L+2}$ به یک نزدیک است، می‌توان این نسبت را نیز حذف کرد. برای نمونه‌های سخت و آذرین نتایج زیر را می‌توان بیان کرد:

۱. در محدوده تنش مورد آزمایش، شکست ذرات ناچیز است.
۲. با انجام آزمایش سایش لوس آنجلس می‌توان به برآوردهایی درباره شکست ذرات و نرخ خزش دست یافت. هرچه میزان سایش سنگدانه‌ها بیشتر باشد، میزان خزش و شکست ذرات افزایش می‌یابد. به‌طور تقریبی می‌توان گفت که در سایش‌های کمتر از ۳۰ درصد، میزان شکست ذرات اندک است و برای

۹- منابع

- Paris; 2002; pp 549-556.
- [6] Sowers G. F.; Williams R. C.; Wallace T.S.; "Compressibility of broken rock and the settlements of rockfills"; Proceeding 6th international conference on soil mechanics and foundation engineering; vol 2; 1965; pp 561-565.
- [7] Lawton F. L.; Lester M. D.; "Settlement of rockfill dams"; proceeding 8th international congress on large dams; vol 3; Q32 R2; Edinburgh; Scotland; 1964.
- [8] Kjaernsli B.; Sande A.; "Compressibility of some coarse grained materials"; proceeding of some European conferences on soil mechanics and foundation engineering Wiesbaden; 1963; pp 245-251.
- [9] Hardin Bobby O.; "1-D strain in normally consolidated cohesionless soils"; Journal of geotechnical engineering; vol.113;
- [1] Lade P.V.; "Significance of particle crushing in granular materials"; journal of soil mechanics and foundation; ASCE; vol 122; no 4; 1996; pp 309-315.
- [2] Lee. K, and Farhoomand, I.; "Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression"; Con. Geotech Journal; 1967; vol IV; No.1; pp 68-86.
- [3] Justo J. L.; "Collapse: Its importance, fundamentals and modeling"; Advances in rockfill structures; NATO ASI Series; 1991; pp 95-152.
- [4] Parkin A. K.; "Creep of rockfill"; Advances in rockfill structures; NATO ASI Series; 1991; pp 221-238.
- [5] Justo J.L.; Durand P.; Justo E.; "Parameters for creep of rockfill"; Param;

no.12; 1987; pp 1449-1467.

[۱۰] صادقی‌پور امیرحسین، بررسی رفتار و پدیده شکست ذرات در مصالح پوسته سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی دکتر علی کمک‌پناه، دانشگاه تربیت مدرس، سال ۱۳۷۷.

[۱۱] مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، روش آزمون برای تعیین سایش مصالح سنگی درشت‌دانه با استفاده از ماشین لوس‌آنجلس، شماره ۴۴۸، ۱۳۷۰.