تأثیر بافت خاک‌های کربناته برخی سواحل و جزایر خلیج‌فارس بر خردشدگی سنگ‌دانه‌ها

سید محمود فاطمی عقدا، دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین
حبیب شاه نظری؛ دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی عمران
حمیدرضا کرمی، مهدی تلخابلو؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۳/۰۵ **پذیرش** ۹۵/۱۱/۰٦

چکیده

خاک‌های کربناته ازلحاظ ویژگی‌های مقاومتی، خردشدگی دانه‌ها و نشست خاک، از خاک‌های مسئله‌دار در طبیعت هستند که گاهی مشکلاتی را برای مهندسان ژئوتکنیک به‌وجود می‌آورند. بخش اعظم این خاک‌ها در بستر آب‌های کم‌عمق مناطق گرمسیری واقع‌شده است. در ایران نیز در سواحل و جزایر خلیج‌فارس و دریای عمان لایه‌های نسبتاً ضخیمی از رسوبات کربناته موجود است. با توجه به اهمیت و گستردگی پروژه‌هایی بزرگی نظیر ساخت پل بزرگ خلیج‌فارس مابین بندرعباس و جزیره قشم، مخازن ذخیره نفت و گاز، سکوهای استخراج نفت و ساخت اسکله‌ها که اخیراً در این مناطق در دست اجرا هستند، شناخت و بررسی چنین خاک‌هایی اهمیت فراوانی دارد. در این تحقیق به بررسی تأثیر بافت رسوبات کربناته بر خردشدگی دانه‌ها می‌پردازیم. نتایج تحقیق نشان می‌دهد افزایش اندازه مؤثر دانه‌ها و ضریب شکل آن‌ها به‌صورت توانی با خردشدگی آن‌ها ارتباط داشته و با افزایش هم‌زمان دو پارامتر فوق میزان خردشدگی تشدید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های کربناته، خردشدگی، ضریب شکل، اندازه مؤثر سنگ‌دانه

مقدمه

خاک‌های کربناته از نظر منشأ و هم‌چنین رفتار مهندسی در مقایسه با خاک‌های سیلیکاتی متفاوت است و بقایای موجودات دریایی هستند یا منشأ شیمیایی دارند و یا این‌که به‌صورت

*نویسنده مسئول hkarami@iust.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

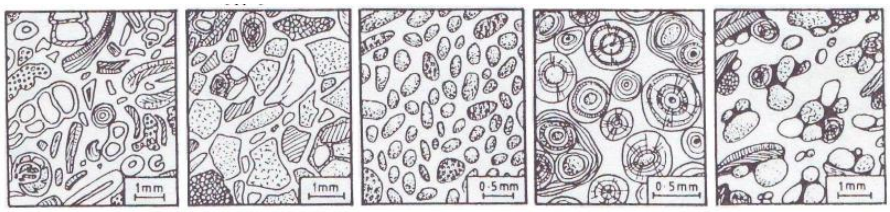
فیزیکی به محیط رسوبی انتقال‌یافته و تشکیل‌شده‌اند. مهم‌ترین مشخصهٔ این خاک‌ها قابلیت خردشدگی دانه‌های آن‌ها در برابر بارهای وارده بسته به شکل دانه‌ها و حفرات درون‌ذره‌ای است. عمل خردشدگی و تغییرات حجم حاصل از آن باعث بروز مسائلی در برابر برخی سازه‌های مهندسی مانند شمع کوبی‌ها و هم‌چنین پی‌ها شده است. تاکنون چندین نمونه عملی گزارش‌شده است که در آن‌ها بعضی ویژگی‌های غیرمعمول پی‌ها در خاک‌های کربناته و عملکرد ضعیف آن‌ها نشان داده شده‌اند [٦]. این عملکرد ضعیف در بارگذاری برجای چندین شمع کوبشی در خاک‌های با سیمان ضعیف و خاک‌های کربناته (خلیج مکزیک) با تراکم‌پذیری زیاد است که نشان می‌دهد فقط درصد کمی (کم‌تر از ١٥ ٪) از ظرفیت باربری که به‌کمک روش‌های طراحی معمول در خاک‌های سیلیکاته پیش‌بینی می‌شود به‌دست آمده [٦].

فوکس[1] و هیگن‌بتوم[2] (١٩٧٥) [٩] اقدام به تقسیم‌بندی انواع دانه‌های تشکیل‌دهندهٔ رسوبات کربناته کردند. آن‌ها پنج نوع اصلی از دانه‌های کربناته را معرفی کردند (شکل ١).

اسکلتی: این نوع دانه از بقایای جانوران و گیاهان دریایی هستند و منشأ اصلی ماسه‌های کربناته را تشکیل می‌دهند. ذرات تشکیل‌شده در این گروه دارای تنوع زیادی هستند. زیاد بودن نسبت منافذ داخل دانه‌ها و نسبت منافذ بین‌دانه‌ای سبب خردشدگی دانه‌ها در اثر فشار می‌شود.

غیر اسکلتی: در این نوع دانه‌ها، دانه‌های غیرکربناته با لایه‌ای از کربنات کلسیم پوشش می‌یابند. انواع مختلف دانه‌های اصلی آواری، پلت، اائیت‌ها و خوشه‌ای هستند.

اساس تشکیل رسوبات کربناته عهد حاضر در مناطق کم‌عمق دریا در رابطه با این دو عامل اصلی است (حرمی ١٣٦٧):



دانه‌های خوشه‌ای دانه‌های پوشش‌دار پلت ها دانه‌های آواری دانه‌های اسکلتی

شکل ١. انواع دانه‌های کربناته اسکلتی و غیراسکلتی (فوکس و هیگن‌بتوم (١٩٧٥))

1. Fookes
2. Higginbottom

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

– نبود و یا کمبود رسوبات آواری در محیط رسوبی

– فراوانی زیاد موجودات زنده

متوسط شوری دریاها بین ۳۲ تا ۳۸ گرم در هزار است [٤]. اگر میزان شوری آب دریا در حدود و یا بیش‌تر از ۳٦ در هزار باشد مقدار کربنات کلسیم در رسوب‌ها بیش از ۵۰ درصد است ولی اگر شوری کم‌تر از ۳٤ در هزار باشد مقدار کربنات کلسیم در رسوبات کم‌تر از ۵ درصد است. البته این رابطه‌ای ثابت نیست و می‌تواند با توپوگرافی و آب‌وهوای محیط و شرایط بیولوژیکی تغییر کند. کربنات کلسیم در دریاها از تجزیه فلدسپات‌های کلسیک و پیروکسن و اولیوین حاصل می‌شود. تنوع خاک‌های کربناته در نقاط مختلف دنیا در اثر منشأ بیولوژیک متفاوت و شرایط مختلف محیط رسوبی مانند دما، فشار، نوع سیمان، تراز انرژی آب دریا، فرسایش و غیره منجر به ایجاد خاک‌های با ویژگی‌های مهندسی متفاوت شده است. این ویژگی‌های مهندسی متفاوت شامل تغییرات مقاومت، مدول تغییر شکل، مدول تغییر حجم، تغییرات فشار آب حفره‌ای و قابلیت خردشوندگی دانه‌ها تحت اثر بارگذاری هستند.

در تحقیق حاضر با استفاده از نتایج آزمایش‌های فشردگی، تأثیر بافت (شکل و اندازه دانه‌ها) خاک‌های کربناته سواحل شمالی خلیج‌فارس بر رفتار خردشدگی آن‌ها بررسی می‌شود. خاک‌های کربناته به خاک‌های اطلاق می‌شود که دارای مقدار چشم‌گیری (بالای۵۰ درصد) ترکیبات کربناته (CO_3) باشند. ویژگی مهم خاک‌های کربناته در مقایسه با خاک‌های با منشأ سیلیکاته، قابلیت خردشدگی دانه‌های آن‌ها است. چهار مشخصه اصلی برای خاک‌های کربناته وجود دارد که سمپل[1] (۱۹۸۸) [۲۳] در اولین اجلاس رسوبات کربناته در استرالیا نکات مشترک خاک‌های کربناته بیان کرد: ۱. عمدتاً هر دانه بخشی از مصالح بیوکلاستیک است و جنس ضعیفی دارد. ۲. درجهٔ سیمان‌شدگی این خاک‌ها به‌طور چشم‌گیری متغیر است. ۳. معمولاً این خاک‌ها به‌دلیل تخلخل زیاد بین‌دانه‌ای و داخل دانه‌ای و نامنظمی و شکنندگی، قابلیت فشردگی زیادی به‌ویژه ناشی از خردشدگی دارند. ٤. نوع دانه، منحنی دانه‌بندی، درجهٔ سیمان‌شدگی و ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت، قابلیت فشردگی و نفوذپذیری این خاک‌ها در فاصله بسیار

1. Semple

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

کمی می‌تواند تغییر کند، این تغییرات در پیش‌بینی رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی بسیار مهم است. به‌دلیل تنوع زیاد این خاک‌ها در نقاط مختلف دنیا، رفتارهای متفاوتی از آن‌ها گزارش‌شده است و اطلاعات کاملی در زمینهٔ مشخصات مکانیکی آن‌ها در دست نیست. اغلب کارهای تحقیقاتی صورت گرفته روی این خاک‌ها عمدتاً در سواحل آفریقا، مکزیک، فیلیپین، سواحل استرالیا، هند، دریای شمال (انگلیس) و خلیج‌فارس بوده است. در ایران در سواحل و جزایر جنوبی کشور، کسب اولین تجربه عملی در این مورد در جزیره لاوان در سال ۱۹٦۵ بوده است [۱۸].

صالح‌زاده و همکاران (۲۰۰٤) به بررسی رفتار زهکشی شده و زهکشی نشده ماسه کربناته جزیره کیش پرداختند [۲۲]. آن‌ها نشان دادند با افزایش تنش همه‌جانبه مقدار کاهش در مقاومت برشی در نمونه‌های سست کم‌تر از نمونه‌های متراکم است. هم‌چنین خردشدگی در نمونه‌های سست بیش‌تر از نمونه‌های متراکم است. حسنلوراد و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی و اصلاح خاک‌های ماسه‌ای کربناته با استفاده از تزریق شیمیایی پرداختند آن‌ها نتیجه گرفتند وجود دوغاب در بین دانه‌های ماسه و رشد پیوندها باعث بهبود رفتار و مقاومت برشی شده و میزان کاهش حجم در این ماسه‌ها را کم می‌کند [۱]. شاه‌نظری و همکاران (۲۰۱۳) اثر پارامترهای مختلف روی مقدار خردشدگی ماسه‌های کربناته جزیره هرمز و بندر بوشهر را بررسی کردند [۲٤]. در این تحقیق مقدار خردشدگی با استفاده از آزمایش‌های سه‌محوری مونوتونیک در حالت‌های زهکشی شده و زهکشی نشده ارزیابی شد. آن‌ها بیان کردند که پارامترهای بسیاری روی خردشدگی ماسه‌های کربناته تأثیر داشته که از آن جمله می‌توان به تنش همه‌جانبه، تراکم نسبی، کرنش محوری، شرایط زهکشی، شکل دانه و دانه‌بندی اشاره کرد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که تنش تسلیم دانه‌های خاک کربناته بوشهر کم‌تر از خاک جزیرهٔ هرمز است. مقدار خردشدگی در هر دو خاک تا کرنش‌های محوری حدود ۵٪ ناچیز است و با افزایش کرنش، مقدار خردشدگی افزایش می‌یابد. کارگر و همکاران (۲۰۱۵) به‌بررسی رفتار تناوبی و فرا تناوبی خاک‌های کربناته هرمز و بوشهر پرداختند آن‌ها دریافتند میزان خردشدگی با افزایش کرنش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

تجمعی و فشار متوسط تحکیم افزایش می‌یافت [۱۵]. کرنش تناوبی، کرنش تجمعی تناوبی و اضافه فشار منفذی از عوامل اصلی تغییر رفتار فرا تناوبی ماسه بوشهر به‌شمار می‌روند.

هم‌چنین محققان دیگری مانند پولوس[1] و همکاران (۱۹۸۲، ۱۹۸٤، ۱۹۸٦) [۸]، [۱۹]، [۲۰]، [۲۱]، روی خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه‌های آهکی ناحیهٔ Bass Strait & North Rankin استرالیا کارکرده‌اند.

برداشت نمونه خاک‌های کربناته از تعدادی سواحل و جزایر جنوبی ایران مانند بندرعباس، بندر بوشهر، جزایر قشم، هرمز و هنگام، انجام آزمایش دانه‌بندی خاک، تفکیک و جداسازی خاک‌ها به سایزهای مختلف، تعیین درصد کربنات کلسیم، دانسیته نسبی، توده ویژه، اندازه‌گیری طول، عرض و ضخامت دانه‌ها، انجام آزمون فشردگی و نهایتاً محاسبه میزان خردشدگی دانه‌ها تحت تأثیر شرایط متفاوت، از جمله اقدامات انجام‌شده هستند. رفتار متفاوت خاک‌های کربناته تحت تأثیر بارهای وارده در نقاط مختلف جهان دلیل اصلی انجام این تحقیق است و مؤلفان مقاله سعی کرده‌اند که بر اساس نمونه‌برداری‌های انجام‌شده و آنالیزهای آماری صورت گرفته عوامل مؤثر بر میزان خردشدگی دانه‌ها شناسایی کنند.

دستگاه آزمایش Rowe cell

سلول اصلاح‌شده تحکیم با قطر داخلی ٦ اینچ (Model number EL25-0705)، در این تحقیق به‌کار برده شد. قالب به‌کار گرفته‌شده به‌گونه‌ای طراحی شد که تا فشار 2000kPa بدون تغییر شکل جانبی، قادر به انجام آزمایش تحکیم روی نمونه‌های مخلوط ریزدانه و درشت‌دانه باشد. ارتفاع نمونه در این قالب ۵۰ میلی‌متر و سطح نمونه معادل ۱۸۰۰۰ میلی‌متر مربع است.

این دستگاه را اولین بار پروفسور P. W. Rowe در دانشگاه منچستر انگلستان طراحی و ساخت. به‌طورمعمول پارامترهای تحکیم خاک‌ها با دستگاه ادومتر اندازه‌گیری می‌شود که این دستگاه برای آزمایش تحکیم خاک‌های حاوی درشت‌دانه و هم‌چنین برای اندازه‌گیری نفوذپذیری

1. Poulos

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

و تحکیم شعاعی دارای نواقصی (تحکیم خاک فقط به حالت یک‌بعدی، امکان زهکشی تنها در جهت قایم، امکان نداشتن انجام آزمایش روی نمونه‌های مخلوط ریزودرشت به‌دلیل حجم کوچک) است، سلول پیشرفته تحکیم خاک به‌منظور رفع نواقص مذکور و بهره‌مندی از برخی قابلیت‌های دیگر ابداع شده است [۳]. بارگذاری پیوسته از مهم‌ترین قابلیت‌های این دستگاه است، هم‌چنین با توجه به نوع تنش‌هایی که بر نمونه اعمال می‌شود و شرایط زهکشی متنوعی که با این دستگاه ایجاد می‌شود، امکان شبیه‌سازی شرایط محل از لحاظ موقعیت تنش‌ها و زهکشی‌ها به‌راحتی وجود دارد. مزیت‌های سلول اصلاح‌شده تحکیم عبارت است از: الف) سیستم بارگذاری هیدرولیکی (اثر ارتعاش که در سیستم اهرمی دیده می‌شود کاهش می‌یابد، اعمال فشار تا سقف ۲۰۰۰ کیلو پاسکال برای نمونه‌های بزرگ)، ب) سهولت کنترل (زهکشی به‌راحتی قابل‌کنترل است، فشار آب حفره‌ای در هر زمان قابل‌اندازه‌گیری است از این رو، شروع و خاتمه تحکیم اولیه ثبت می‌شود)، ج) نمونه‌های با اندازه بزرگ (تجزیه‌وتحلیل نشست در وضعیت سه‌بعدی واقعی اطلاعات معتبرتری نسبت به ادومتر معمولی یک‌بعدی روی نمونه‌های کوچک ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی واقعی‌تر از شرایط چاهک‌های زهکشی در آن صورت می‌گیرد). از این رو، نتایج آزمایش‌های آن نمایانگر شرایط واقعی‌تری از خاک است، برای انجام این آزمایش همه نمونه‌ها با دانسیتهٔ نسبی ۵۰٪ ساخته و در داخل قالب قرار گرفت و ضمن خارج کردن هوا از لابه‌لای دانه‌های خاک، با آب بدون هوا، اشباع شد (شکل ۲).

روش انجام تحقیق

خاک‌های مناطق مختلف سواحل شمالی خلیج‌فارس مانند بندرعباس، بندر بوشهر، جزایر قشم، هرمز و هنگام که در آن‌ها تمرکز فعالیت‌های عمرانی بیش‌تر است برداشت گردید. پس از انجام آزمایش‌های اولیه مانند آزمایش دانه‌بندی مکانیکی، تعیین درصد کربنات کلسیم، تعیین توده ویژه، تعیین دانسیته نسبی، وضعیت شکل دانه‌ها از لحاظ کروی بودن، صفحه‌ای بودن، سوزنی و تیغه‌ای بودن بررسی شد. بررسی‌های بعدی شامل حدود ۷۰ مورد آزمایش فشردگی با دستگاه Rowe cell و اندازه‌گیری میزان خردشدگی دانه‌ها بوده است. آزمایش دانه‌بندی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

خاک به‌وسیلهٔ الک‌های دانه‌بندی استاندارد بر اساس استاندار ASTM D421,D422 برای همه خاک‌ها انجام شد. برخی نمونه خاک‌های برداشت‌شده به‌صورت طبیعی دارای دانه‌هایی با اندازه‌های متفاوت است و از دانه‌هایی با ابعاد حدود ۱۲ میلی‌متر تا زیر یک میلی‌متر را شامل می‌شوند لیکن برخی دیگر یکنواخت‌تر است و بعضاً درشت‌دانه یا ریزدانه هستند. از این رو، از آن‌جاکه یکی از اهداف این تحقیق بررسی اثر اندازه دانه‌ها بر خردشدگی بوده است علاوه بر این‌که خاک‌های کربناته به‌صورت طبیعی تحت آزمایش‌های خردشدگی قرار گرفتند بر اساس اندازه الک‌های دانه‌بندی استاندارد نیز به گروه‌های کوچک‌تری تفکیک شدند. و تأثیر سایز آن‌ها بر روی خردشدگی بررسی شد. این خاک‌ها به‌کمک الک‌های دانه‌بندی استاندارد به گروه‌های زیر (شش گروه) تفکیک شدند (جدول ۱). بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید خاک‌های برداشت‌شده عمدتاً شامل ماسه‌های درشت، متوسط و ریز بد دانه‌بندی شده (sp) هستند.



الف ب

ج د

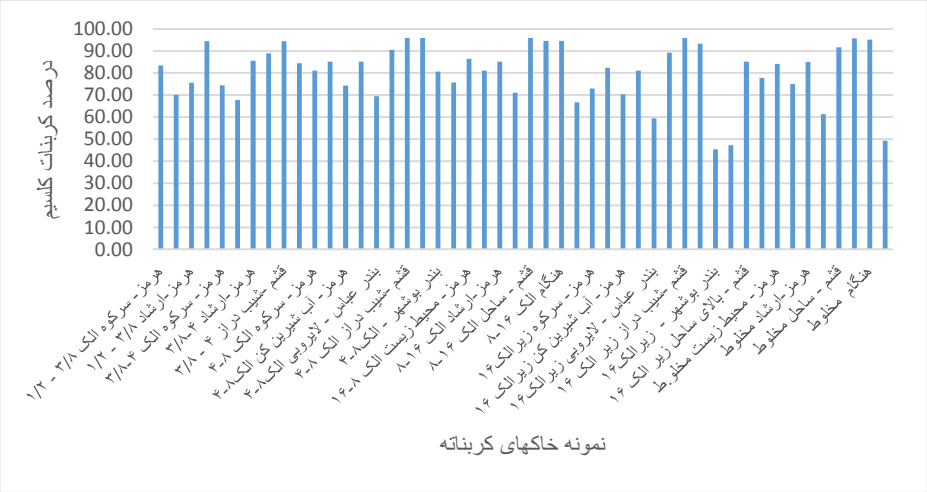
شکل ۲. الف) ساخت نمونه، ب) نمونه بارگذاری شده، ج و د) نمونه‌های خارج‌شده از داخل قالب

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

جدول ۱. اندازه‌های مختلف دانه‌های استفاده‌شده در این تحقیق

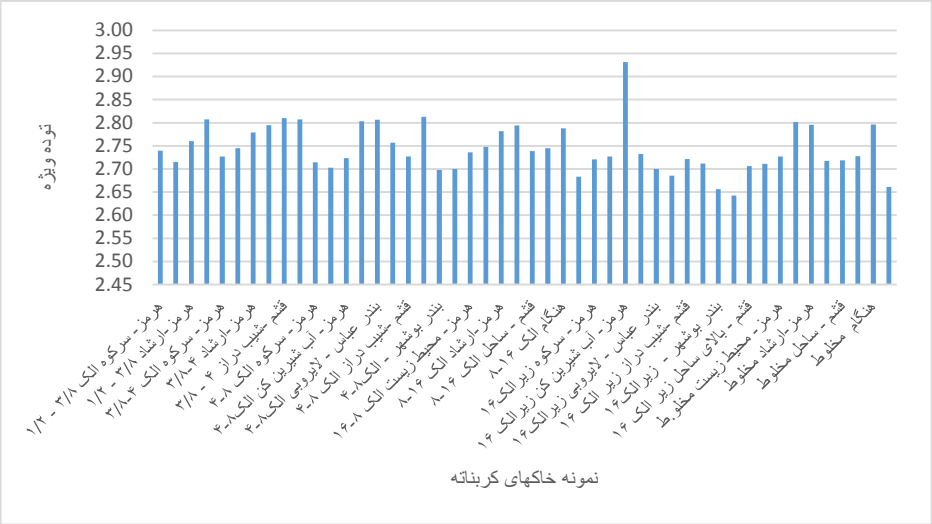
	نمونه 1	نمونه 2	نمونه 3	نمونه 4	نمونه 5	نمونه 6
شمارهٔ الک دانه‌بندی	< 16	16 - 8	8 - 4	4 – ¾″	¾″ – ½″	200 - 4
اندازه (mm)	< 1.18	1.18- 2.36	2.36-4.75	4.75- 9.5	9.5- 12.7	.075-4.75

نتایج آزمایش‌های اولیه در شکل ۳ الی ۵ نشان داده است. چنان‌که مشاهده می‌شود میزان کربنات کلسیم خاک‌های بررسی شده از حدود ٤۵ درصد تا حدود ۹۵ درصد متغیر است و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در این محدوده معتبر است و تأثیر جداگانه ترکیب شیمیایی خارج از بحث این نوشتار است و مستقلاً بررسی می‌شود. تودهٔ ویژه خاک‌های برداشت‌شده از حدود ۲/٦۵ تا حدود ۲/۸۰ متغیر است و در یکی از نمونه‌های به‌دلیل وجود خرده‌های آهن در خاک منطقه توده ویژه تا ۲/۹۳ نیز ملاحظه می‌شود. با تعیین دانسیته حداقل و حداکثر هر نمونه خاک، دانسیتهٔ نسبی خاک در حالت ۵۰ ٪ تراکم محاسبه شد، مقادیر آن از حدود ۰/۷۵ تا ۱/۵ در خاک‌های مختلف متغیر است.

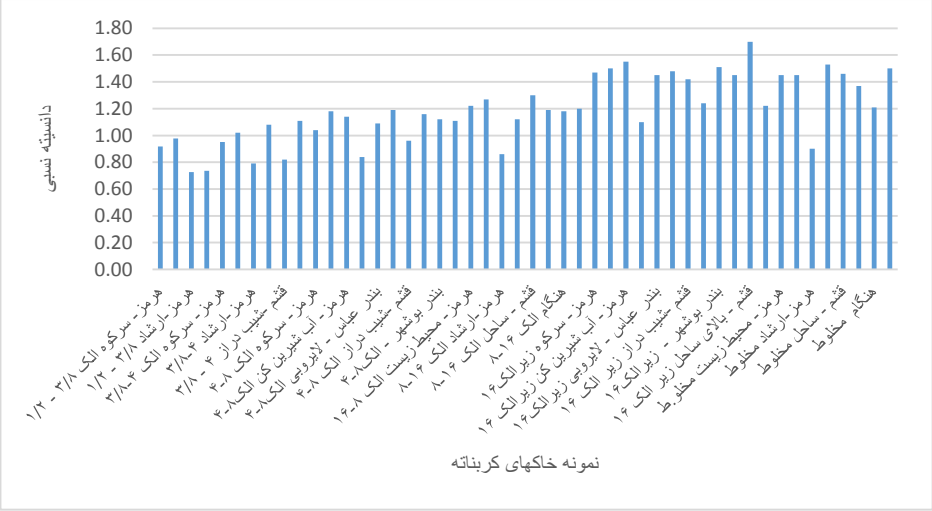


شکل ۳. نمایش میزان درصد کربنات کلسیم نمونه خاک‌های کربناته

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]



شکل ٤. نمایش توده ویژه نمونه خاک‌های کربناته



شکل ٥. نمایش دانسیته نسبی ٥٠ ٪ نمونه خاک‌های کربناته

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

تعیین ضریب شکل و اندازهٔ مؤثر دانه‌ها

شکل دانه‌ها از عوامل مؤثر بر میزان خردشدگی آن‌ها است. به‌طورکلی دانه‌ها را ازنظر شکل می‌توان به ٤ بخش به شرح ذیل تقسیم کرد: دانه‌های کروی، دانه‌های صفحه‌ای، دانه‌های سوزنی و دانه‌های تیغه‌ای [٢٥]، علاوه بر توصیف کیفی شکل دانه‌ها نیاز است که شکل دانه‌ها به‌صورت کمی نیز تعیین شده و تأثیر آن بر خردشدگی بررسی شود. از آن‌جاکه دانه‌های خاک بعضاً دارای اشکال متفاوتی هستند باید شکل غالب یا میانگین عددی شکل دانه‌ها موردتوجه قرار گیرد و تأثیر آن بر خردشدگی بررسی شود، از این‌رو، بررسی شکل دانه‌ها بر اساس اندازه‌گیری سه بعد هر سنگ‌دانه طبق رابطهٔ (١) انجام شد [١٢]:

$$shape\ index = \frac{L}{W} + \frac{L}{T} = L\left(\frac{T+W}{W*T}\right) \quad (١)$$

در این رابطه L , W , T به‌ترتیب طول و عرض و ضخامت هر سنگ‌دانه هستند. چنان‌چه دانه‌ای به شکل کروی باشد با استفاده از این رابطه ضریب شکل آن معادل عدد ٢ می‌شود و هرچه این عدد بزرگ‌تر شود دانه‌ها به‌سمت میله‌ای تغییر شکل می‌دهند.

در خاک‌هایی که دارای دانه‌هایی با اندازه‌های متفاوت هستند و هم‌چنین خاک‌هایی که دارای دانه‌هایی تقریباً هم‌اندازه بین دو الک دانه‌بندی هستند، تعیین اندازه غالب یا تعیین میانگین عددی اندازه دانه‌ها به‌منظور بررسی تأثیر اندازهٔ دانه بر خردشدگی دارای اهمیت زیادی است از این‌رو، به‌منظور بررسی دقیق‌تر اثر سایز دانه‌ها بر خردشدگی و انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری از رابطهٔ ٢ برای تعیین اندازهٔ مؤثر (غالب) دانه‌ها استفاده شده است [١٢].

$$Effective\ size = 0.1\left(\frac{d_{min}+D_{10}}{2}\right) + 0.2\left(\frac{D_{10}+D_{30}}{2}\right) + 0.3\left(\frac{D_{30}+D_{60}}{2}\right) + 0.4\left(\frac{D_{60}+d_{max}}{2}\right) \quad (٢)$$

در این رابطه D_{10}, D_{30} ,D_{60} به‌ترتیب قطر دانه‌های کم‌تر از ١٠، ٣٠ و ٦٠ درصد و D_{min} و D_{max} به‌ترتیب قطر حداقل و حداکثر دانه‌های خاک هستند. با استفاده از روابط مذکور ضریب شکل و اندازه مؤثر همهٔ نمونه‌ها محاسبه و ارتباط بین پارامترهای مذکور با خردشدگی بررسی می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

تعیین میزان خردشدگی سنگ‌دانه‌ها

محققان بررسی‌های زیادی در مورد اندازه‌گیری میزان خردشدگی سنگ‌دانه‌ها تحت تأثیر بارهای وارده انجام داده‌اند.

لسلی[1] (١٩٦٣) بر اساس رابطهٔ (٣) عنوان می‌کند، شاخص خردشدگی عبارت است از قطر دانه‌های کم‌تر از ١٠ درصد در منحنی دانه‌بندی خاک بعد از خردشدگی $(D^f{}_{10})$ به قطر دانه‌های کم‌تر از ١٠ درصد منحنی دانه‌بندی همان خاک قبل از خردشدگی $(D^i{}_{10})$ است [١٧].

$$B_{10} = \frac{D^f{}_{10}}{D^i{}_{10}} \quad (٣)$$

هازن[2] (١٩١١) رابطهٔ تجربی (٤) را به‌منظور تعیین میزان خردشدگی دانه‌های خاک پیشنهاد کرد [١٣].

$$B_{10} = 1 - \frac{D^f{}_{10}}{D^i{}_{10}} \quad (٤)$$

لی[3] و فرهودمند (١٩٦٧) شاخص خردشدگی را نسبت بین قطر ذرات کم‌تر از ١٥ درصد منحنی دانه‌بندی قبل از خردشدگی به قطر ذرات کم‌تر از ١٥ درصد منحنی دانه‌بندی بعد از انجام آزمایش قرار داده است، رابطهٔ (٥) [١٦].

$$B_{15} = \frac{D^i{}_{15}}{D^f{}_{15}} \quad (٥)$$

ایندراتنا[4] و همکاران (١٩٩٣) تغییرات قطر ذرات خاک کم‌تر از ٥٠ ٪ را قبل از انجام آزمایش به بعد از آزمایش را به‌عنوان مبنای اندازه‌گیری خردشدگی در نظر گرفته‌اند، رابطهٔ (٦) [١٤].

$$B_{50} = \frac{D^i{}_{50}}{D^f{}_{50}} \quad (٦)$$

قنبری و همکاران (٢٠١٣) شاخص جدیدی به‌صورت رابطه (٧) را به‌منظور تفسیر نتایج خردشدگی دانه‌ها تعریف کرده‌اند [١٠].

$$New\ Index = \frac{B_{50}}{B_{15}} \quad (٧)$$

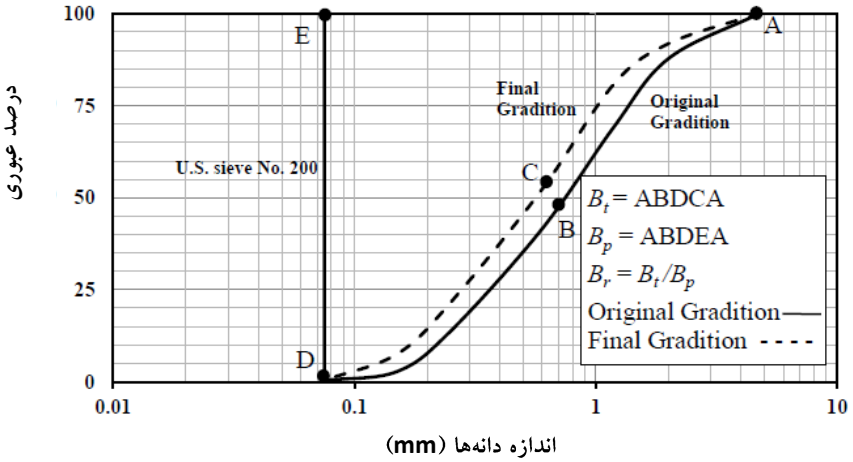
1 Leslie
2 Hazen
3 Lee
4 Indraratna

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

بر اساس تعریف هاردین[1] (١٩٨٥) خردشدگی کلی ذرات برای یک نمونه خاک عبارت است از مساحت بین دو منحنی دانه‌بندی قبل و بعد از خردشدگی به مساحت مابین منحنی قبل از خردشدگی تا خط عمود ٠,٠٧٥ میلی‌متر است [١١]. در سنگ‌دانه‌های زاویه‌دار، روش هاردین (١٩٨٥) که بیان‌گر میانگین شکست کل ذرات است، یک ضریب مناسب برای اندازه‌گیری میزان خردشدگی ذرات است [١٠]. با استفاده از روش هاردین (١٩٨٥) نمودار دانه‌بندی خاک قبل و بعد از بارگذاری ترسیم شد. برای اندازه‌گیری خردشدگی از رابطهٔ (٨) استفاده شد [١١]:

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (٨)$$

به‌منظور اندازه‌گیری میزان خردشدگی سنگ‌دانه‌ها از سلول اصلاح‌شده تحکیم[2] استفاده‌شده است. اندازه‌گیری میزان خردشدگی دانه‌ها به‌روش هاردین (١٩٨٥) انجام‌شده است (شکل ٦)، هم‌چنین نمونه‌ای از خاک کربناته خردشده در شکل ٧ نشان داده‌شده است.

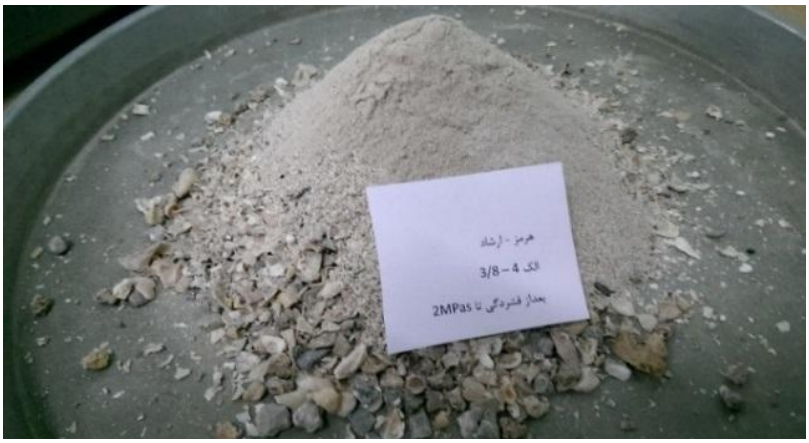


شکل ٦. نمایش روش (Hardin 1985) در اندازه‌گیری میزان خردشدگی

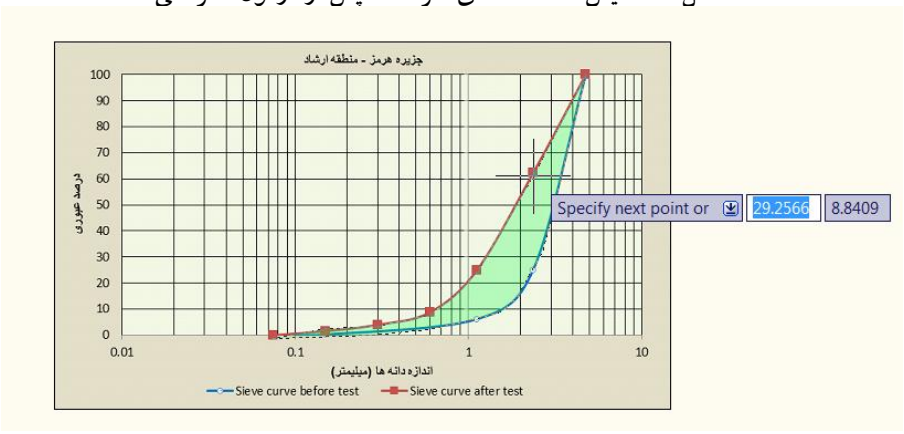
با استفاده از نرم‌افزار اتوکد و تقسیم مساحت مابین دو نمودار دانه‌بندی قبل و بعد از فشردگی به مساحت نمودار دانه‌بندی قبل از فشردگی تا خط عمودی ٧٥ هزارم میلی‌متر، میزان خردشدگی محاسبه‌شده است، این عملیات برای همهٔ نمونه‌ها انجام شده است (شکل ٨ و ٩).

1 Hardin
2 Rowe Cell

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]



شکل ۷. نمایش سنگ‌دانه‌های خردشده پس از آزمون فشردگی



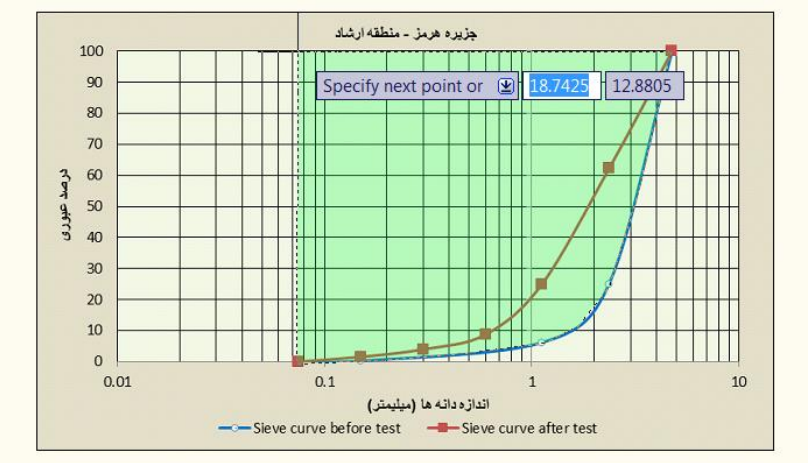
شکل ۸ . نمایش محاسبه سطح بین دو نمودار دانه‌بندی قبل و بعد از فشردگی

ساختار داخلی سنگ‌دانه‌های کربناته

شکل ۱۰ تصویر SEM (میکروسکوپ الکترونی) نمونهٔ سنگ‌دانه خاک کربناته جزیره هرمز منطقه ارشاد بین الک (٤– ۳/۸) با درصد خردشدگی زیاد (۱۷/۷٪) را نشان می‌دهد، چنان‌که مشاهده می‌شود سطح سنگ‌دانه سطحی ناهموار دارد و با بزرگ‌نمایی‌های بیش‌تر فضاهای خالی در داخل دانه به‌خوبی نمایان هستند، در صورت تحت‌فشار قرارگیری خاک، تغییر شکل و جاب‌جایی و خردشدگی دانه‌ها به‌دلیل فضاهای خالی داخل آن‌ها به‌خوبی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

امکان‌پذیر است، و این امر در افزایش میزان خردشدگی و فشردگی پذیری خاک‌های کربناته بسیار مؤثر است.



شکل ۹. نمایش محاسبهٔ سطح بین نمودار دانه‌بندی اولیه و خط ۷۵ میکرون

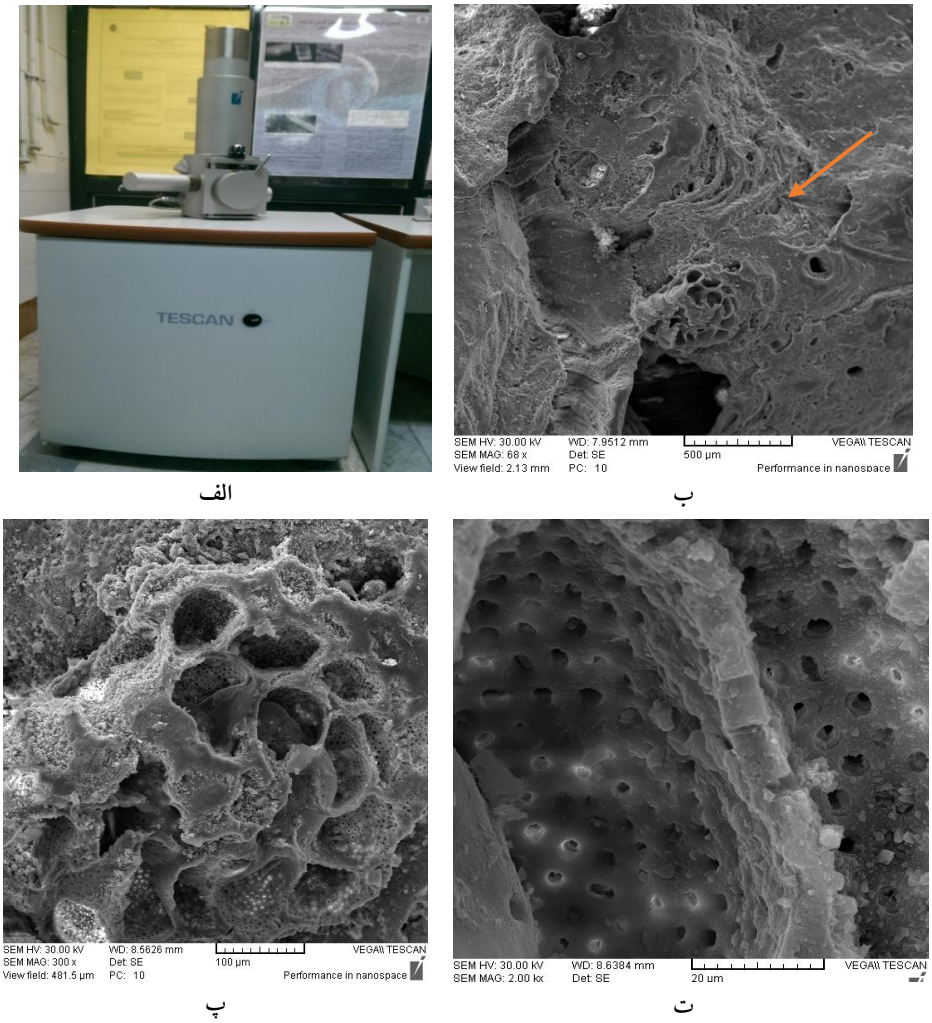
بررسی و تحلیل نتایج

چنان‌که از شکل ١١ نتیجه می‌شود خردشدگی سنگ‌دانه‌ها با ضریب شکل ٢ الی ٣ زیر ٥ درصد است و دانه‌های کروی و تقریباً کروی شکل دارای حداقل میزان خردشدگی هستند. با افزایش ضریب شکل به مقادیر بیش‌تر (ضریب شکل ٥ الی ٦) میزان خردشدگی تا مرز ١٥ درصد نیز افزایش می‌یابد، لیکن در ضریب شکل‌های بالاتر (بالای ٧) میزان خردشدگی به حداکثر میزان خود یعنی بیش‌تر از ٢٠ درصد نیز می‌رسد و درواقع هرچه دانه‌ها از شکل کروی و حجمی به شکل‌های میله‌ای و طویل تغییر شکل حاصل می‌کنند میزان خردشدگی آن‌ها بیش‌تر می‌شود.

نتیجه دیگری که از بررسی شکل ١١ حاصل می‌شود این است که اندازهٔ مؤثر دانه‌ها نیز تأثیر چشم‌گیری بر میزان خردشدگی دانه‌ها دارند به‌گونه‌ای که در اندازهٔ مؤثر زیر یک میلی‌متر کم‌ترین میزان خردشدگی در حد یک درصد مشاهده می‌شود و این بدان معنا است که دانه‌ها با هر ضریب شکل در اندازهٔ مؤثر زیر یک میلی‌متر دارای حداقل میزان خردشدگی هستند. با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

افزایش اندازه مؤثر دانه‌ها روند خردشدگی ابتدا به‌صورت خطی است لیکن در نمودارهای با ضریب شکل بالاتر این روند از حالت خطی خارج‌شده و روند غیرخطی را نشان می‌دهد. خردشدگی دانـه‌ها با افزایش انـدازهٔ مؤثـر و ضریب شکل، افزایش می‌یابد. تأثیر عوامل مذکور



الف ب

پ ت

شکل ۱۰. نمایش الف) دستگاه میکروسکوپ الکترونی (TESCAN)، ب) یک نمونه سنگ‌دانه بیولوژیک خاک کربناته جزیره هرمز منطقه ارشاد بین الک (٤-۳/۸) با بزرگ‌نمایی ٦٨ برابر، پ) قسمتی از سطح سنگ‌دانه با حفره‌های متعدد بر روی سطح آن با بزرگ‌نمایی ۳۰۰ برابر، ت) نمایش ساختمان داخلی حفره و دیواره داخلی آن روی سطح سنگ‌دانه، داخل حفره سوراخ‌های متعدد و کوچک‌تری روی دیواره مشاهده می‌شود، بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ برابر

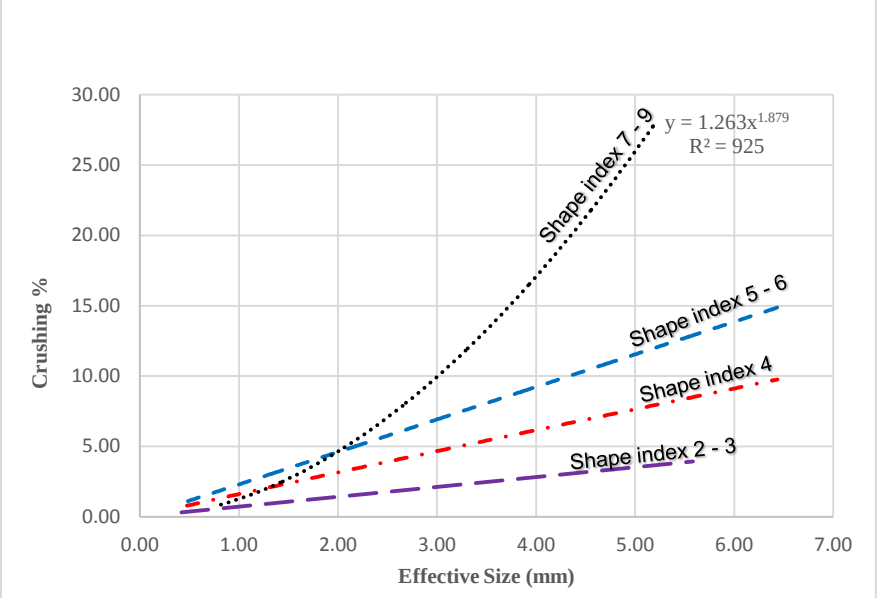
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

به‌صورت هم‌زمان در پاره‌ای از موارد علاوه بر افزایش میزان خردشدگی موجب تشدید آن نیز می‌شود و روند افزایش خردشدگی به‌صورت خطی نبوده است بلکه به‌صورت توانی است. با بررسی رابطه بین خردشدگی به‌عنوان یک متغیر وابسته و دو پارامتر اندازه مؤثر و ضریب شکل سنگ‌دانه‌ها به‌عنوان پارامترهای مستقل، به‌کمک نرم‌افزار SPSS مشخص شد. به‌طورکلی بهترین هم‌گرایی داده‌ها با رگرسیون توانی[1] به‌دست می‌آید (نمودار شکل ١١، معادلهٔ خط مربوط به ضریب شکل ٩-٧ برابر $y = 1.263x^{1.879}$ است). در نمودار مربوط به ضریب شکل ٢ تا ٣ به‌دلیل نزدیک بودن شکل دانه‌ها به کره، افزایش اندازه مؤثر دانه‌ها تأثیر چندانی بر روی خردشدگی آن‌ها ندارد و افزایش خردشدگی در این بخش به‌صورت خطی[2] با شیب ملایم است. با افزایش ضریب شکل، میزان خردشدگی به‌صورت توانی افزایش‌یافته و افزایش‌های چشم‌گیری در نمودارهای بعدی مربوط به ضریب شکل ٤، ٦ _٥ و ٩ _٧ مشاهده می‌شود. با افزایش هم‌زمان اندازه مؤثر و ضریب شکل تأثیر دو پارامتر بر روی یک‌دیگر به‌صورت یک تابع توانی، بیش‌ترین اثر را بر خردشدگی دانه‌ها دارند. با توجه به شکل ١١ ملاحظه می‌شود ضریب شکل حدود ٧ و بیش‌تر و اندازهٔ مؤثر بالای ٥ بیش‌ترین میزان خردشدگی و ضریب شکل در محدوده ٢ تا ٣ با هراندازه مؤثر کم‌ترین میزان خردشدگی را در نمونه خاک‌های کربناته نشان می‌دهند.

به‌طورکلی هرچه اندازه دانه‌های یک خاک افزایش می‌یابد قابلیت خردشدگی و شکستگی دانه‌های آن خاک نیز بیش‌تر می‌شود زیرا سنگ‌دانه خاک‌های درشت‌دانه ممکن است که دارای ترک‌های بیش‌تری در داخل ساختار خود باشند که در هنگام تحمل فشار دچار شکستگی می‌شوند. به‌علاوه خاک‌های درشت‌دانه کربناته از آن‌جاکه دارای دانسیته نسبی کم‌تری نسبت به خاک‌های ریزدانه هستند (شکل ٥) دارای فضاهای خالی بیش‌تری در اطراف دانه‌های خود هستند این مسئله سبب می‌شود نیروی وارده بر سطح دانه‌های درشت وارد شده و به فضاهای خالی مابین دانه‌ها وارد نشود در نتیجه سطح دانه‌های درشت بار بیش‌تری را تحمل کرده و دچار خردشدگی بیش‌تری می‌شوند [٧].

1 Power
2 Linear

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

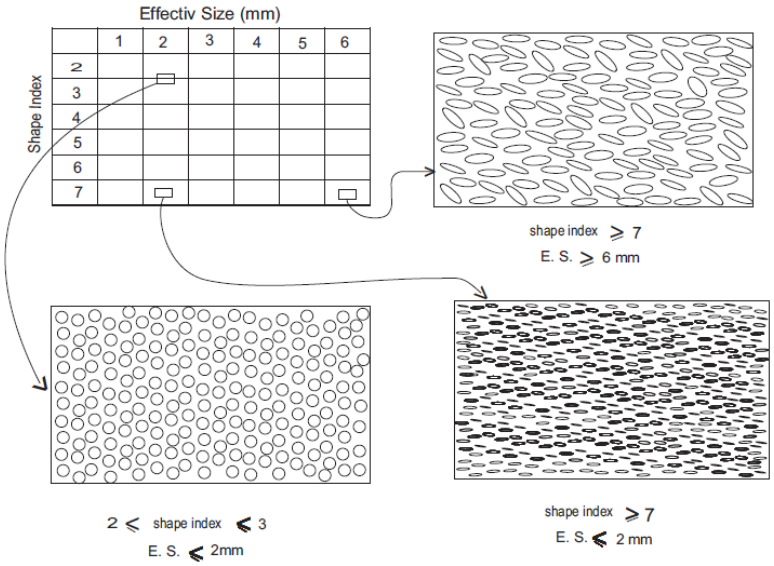


شکل ۱۱. تغییرات خردشدگی به اندازه مؤثر سنگ‌دانه با ضرایب شکل متفاوت

به‌منظور درک بهتر مفاهیم ضریب شکل و اندازهٔ مؤثر دانه‌ها، شکل ۱۲ تصویر شماتیک دانه‌های بررسی شده در تحقیق حاضر را با توجه به اندازهٔ مؤثر و ضریب شکل متفاوت نمایش داده است. چنان‌که مشاهده می‌شوند دانه‌های دارای اندازهٔ مؤثر ۲ و ضریب شکل حدود ۲ تا ۳ دانه‌های تقریباً کروی شکل است و دارای قطر داخلی در حد ۲ میلی‌متر هستند (مشابه ماسه‌های سیلیکاته متوسط دانه). دانه‌های دارای اندازهٔ مؤثر ۲ و ضریب شکل ۷ دانه‌هایی هستند که از شکل کروی خارج‌شده و به‌شکل میله‌ای تبدیل‌شده‌اند، لیکن بزرگ‌ترین قطر آن‌ها در حد ۲ میلی‌متر است. دانه‌های دارای اندازه مؤثر ٦ و ضریب شکل ۷ دانه‌هایی هستند که بزرگ‌ترین قطر داخلی آن‌ها در حد ٦ میلی‌متر است و به شکل کشیده یا سوزنی هستند.

یکی از روش‌های مناسب برای انتخاب بهترین مدل رگرسیون برای داده‌های حاصل از آزمایش‌ها استفاده از ضریب R^2 است. این ضریب به‌عنوان معیاری برای توجیه تنوع متغیر وابسته در اثر متغیرهای مستقل مرسوم است، یعنی $0 \leq R^2 \leq 1$. اما مقدار بزرگ‌تر R^2 الزاماً

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]



شکل ۱۲. نمایش شماتیک دانه‌ها با ضریب شکل و اندازه مؤثر متفاوت

به‌معنی خوب بودن مدل رگرسیون نیست، زیرا افزودن یک متغیر به مدل همیشه مقدار آن را صرف‌نظر از این‌که متغیر اضافه‌شده در مدل مشارکت داشته یا نه افزایش خواهد داد. بنا براین ممکن است مدل‌های دارای مقادیر بزرگ‌تر R^2 برای برآورد مدل ضعیف باشند. ازاین‌رو، در این‌جا از آماره آزمون فیشر (F) برای مدل‌سازی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. بنا براین در صورت معنی‌داری مدل‌های بررسی‌شده، مدلی مناسب‌تر است که F بالاتری داشته باشد [۵].

بر اساس آنالیز رگرسیون انجام‌شده به‌وسیله نرم‌افزار آماری SPSS با استفاده از متغیر وابسته خردشدگی و متغیر مستقل ضریب شکل در محدودهٔ اندازه‌های مؤثر متفاوت سعی گردید بهترین هم‌گرایی استخراج شود چنان‌که از جدول ۲ نتیجه می‌شود بهترین R^2 در رگرسیون توانی (Power) با میزان ۰/۹۲۵ برای اندازهٔ مؤثر ۵ تا ٦ به‌دست آمده است، هم‌چنین بیش‌ترین مقدار عدد فیشر نیز معادل ۷۳/۷۹٦ نیز در همین حالت به‌دست آمده است که این امر مؤید آن است که تأثیر متغیرهای مستقل ضریب شکل و اندازه مؤثر به‌صورت توانی بهترین هم‌گرایی را از خود نشان می‌دهند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

خلاصه مدل‌های رفتاری و پارامترهای برآورد شده منحنی رگرسیون با ضریب شکل ۹-۷ مربوط به شکل ۱۱ در جدول ۲ ارائه شده است، چنان‌که مشاهده می‌شود ستون اول مربوط به معادلات رفتاری مختلف منحنی رگرسیون، ستون دوم خلاصه مدل‌ها بر اساس ضریب R^2، عدد فیشر و درجهٔ آزادی داده‌ها، ضریب .Sig مربوط به میزان معنی‌داری داده‌ها و ستون سوم پارامترهای برآورد شده شامل ثابت‌ها و ضرایب b مربوط به معادله خط رگرسیون است. $y = 1.263x^{1.879}$

جدول شماره ۲. خلاصه مدل‌ها و برآورد عوامل ممکن از تأثیر اندازه مؤثر بر خردشدگی دانه‌ها (خروجی نرم‌افزارspss)

	خلاصه مدل					برآورد پارامترها			
معادله	R^2	F	درجه آزادی ۱	درجه آزادی ۲	معیار تصمیم	ثابت	b1	b2	b3
Linear	.875	41.881	1	6	.001	-2.269	4.219		
Log.	.872	41.001	1	6	.001	.411	10.079		
Inverse	.708	14.532	1	6	.009	16.887	-15.915		
Quadratic	.908	24.706	2	5	.003	-6.318	7.576	-.558	
Cubic	.921	15.609	3	4	.011	-.530	-.666	2.621	-.350
Compound	.721	15.541	1	6	.008	.979	2.001		
Power	.925	73.796	1	6	.000	1.263	1.879		
Growth	.721	15.541	1	6	.008	-.021	.694		
Exponential	.721	15.541	1	6	.008	.979	.694		
Logistic	.721	15.541	1	6	.008	1.021	.500		

متغیر وابسته خردشدگی است متغیر مستقل اندازه مؤثر است

نتیجه‌گیری

انواع مختلف خاک‌های کربناته سواحل شمالی و جزایر خلیج‌فارس که عمدتاً دارای منشأ بیولوژیک هستند برداشت شد. پس از انجام آزمایش‌های دانه‌بندی و تفکیک خاک به گروه‌های مختلف، میزان کربنات کلسیم، توده ویژه، دانسیتهٔ نسبی تعیین شد. نمونه‌های تفکیک‌شده با دانسیتهٔ نسبی ۵۰ ٪ تحت آزمایش فشردگی قرار گرفت (به‌وسیلهٔ قالب اصلاح‌شده تحکیم با فشار هیدرو استاتیک زیاد (2MPa)) و خردشدگی دانه‌ها به‌وسیلهٔ انجام آزمایش دانه‌بندی قبل و بعد از فشردگی اندازه‌گیری شد، نتایج به‌دست‌آمده بدین‌شرح است:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

١. خاک‌های کربناته سواحل جنوبی ایران بسیار متنوع است و دارای اشکال متفاوت کروی (ضریب شکل ٢) تا میله‌ای (ضریب شکل ٥ و بالاتر) هستند.
٢. خردشدگی دانه‌ها کربناته با افزایش اندازه مؤثر آن‌ها افزایش می‌یابد،
٣. در اندازه مؤثر زیر یک میلی‌متر با ضریب شکل‌های متفاوت خردشدگی بسیار اندک (کم‌تر از ٢ درصد) و در اندازهٔ مؤثر ٥ میلی‌متر و بالاتر خردشدگی بسیار بیش‌تر است.
٤. خردشدگی سنگ‌دانه‌ها با افزایش هم‌زمان اندازه مؤثر و ضریب شکل تشدید شده و بر اساس یک تابع توانی افزایش می‌یابد.

منابع

١. حسنلوراد م.، صالح‌زاده ح.، شاه‌نظری ح.، "اصلاح خاک‌های ماسه‌ای کربناته با استفاده از تزریق شیمیایی" مجله علمی-پژوهشی امیرکبیر، سال ٤١، شمارهٔ (١٣٨٨)١.
٢. حرمی م. "رسوب‌شناسی" کتاب تألیفی موسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی(١٣٦٧).
٣. قنبری ع. "سلول پیشرفته تحکیم خاک" ژئوتکنیک و مقاومت مصالح ٨٦ (١٣٧٩) ٥٨-٤٧.
٤. معتمد ا. "رسوب‌شناسی ٢ (تجزیه مواد و محیط‌های رسوبی)" کتاب تألیفی چاپ دوم، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران (١٣٦٦).
٥. هاشم‌نژاد آ.، غفوری م.، لشکری غ.، طریق ازلی ص.، "بررسی عوامل سنگ‌شناسی مؤثر در میزان ساینده‌گی کانی‌ها به‌کمک دستگاه LPCP"، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد هشتم، شمارهٔ ٢ (١٣٩٣).
6. API "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms." American Petroleum Institute API RP-2A (2000).
7. Datta M., Gulhati S. K., Rao G. V. "Crushing of Calcareous Sands During Shear", Proceeding 11th Offshore Technology Conference, Houston, Texas, Vol. 3 (1979) 1459-1467.
8. Douri R. H., Poulos H. G., "Behaviour of pile groups in calcareous sand", Geotechnical Eng. in., Vol. 25, No.2 (1994) 3-21.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

9. Fookes p., Higginbottom I., "The classification and description of near-shore carbonate sediments for engineering purposes", Geotechnique 25(2) (1975) 406-411.
10. Ghanbari A., Hamidi A., Abdolahzadeh N., "A Study of the Rockfill Material Behavior in Large-Scale Tests", Civil Engineering Infrastructures Journal, 46 (2): 125-143, ISSN (2013) 2322-2093.
11. Hardin B., "Crushing of soil particles" ASCE J. Geotech. Engng. 111(10) (1985) 1177-1192.
12. Hashemnejad A., "Utilizing water, mineralogy and sedimentary properties to predict LCPC abrasivity coefficient", Bull Eng Geol Environ DOI 10.1007/s10064-015-0779-9 (2015).
13. Hazen A., Discussion of "dams on sand foundation", by A. C. Koenig, Transactions, American Society of Civil Engineers, 73 (1911) 199.
14. Indraratna B., Wijewardena L. S. S., Balasubramaniam A. S., "Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill", Geotechnique, London, U.K. 43 (1) (1993) 37-51.
15. Kargar S. H. R., Salehzadeh H., Shahnazari H., "Post-Cyclic Behavior of Carbonate Sand of the Northern Coast of the Persian Gulf", Marine Georesources & Geotechnology, 0 (2015) 1–12.
16. Lee K., Farhoomand I., "Compressibility and breakage of granular soil in anisotropic triaxial compression", Canadian Geotechnical Journal, IV (1) (1967) 68-86.
17. Leslie D. D., "Large scale triaxial tests on granular soils", Proceeding of the 2 PanAmerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, 1 (1963) 181-202.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]

18. McClelland B., "Calcareous Sediments: An Engineering Enigma", 1 st International Conference on Calcareous Sediments. Australia, Perth. 2 (1988) 777-784.

19. Poulos H. G., Chua E. W., Hull T. S., "Settlement of model footings on calcareous sand", Geotechnical Engineering, Vol. 15 (1984) 21-3.

20. Poulos H., Uesugi M., Young G., "Strength and deformation properties of Bass Strait carbonate sands". Geotechnical Engineering. 13(2) (1982) 189-211.

21. Poulos H. G., "Engineering properties of Bass Strait Sediments", Special publ. of the Geol. Soc. of Australia Recent Sediments in Eastern Australia, Marine through Terrestrial, (1986) 77-859.

22. Salehzadeh H., Ghazanfari E., "Parametric Study of Kish Carbonate Sand under Triaxial Shearing", International Journal of Civil Engineering, Vol. 2, No. 4 (2004) 223-231.

23. Semple R. M., "Mechanical Properties of Calcareous Soils: State of the Art Report", 1st International Conference on Calcareous Sediments, Australia, Perth (1988).

24. Shahnazari H., Rezvani R., "Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study", Engineering Geology (2013) 159-98-105.

25. Tucker M. E., "Sedimentary petrology. An introduction", Blackwell, Oxford (1981).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.405]