تأثیر ژئوتکستایل بافته‌شده و ژئوگرید بر خواص مکانیکی و رفتار تغییرشکلی ماسه کربناته کیش

نیما حکیم‌الهی[۱]، میثم بیات[۲*]، رسول اجل‌لوئیان[۳]، بهرام نادی[۴]

[۱] دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
[۲] دانشیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران bayat.m@pci.iaun.ac.ir
[۳] استاد، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
[۴] استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

کلمات کلیدی:
ماسه کربناته
ژئوتکستایل بافته‌شده
ژئوگرید
مقاومت برشی
تغییرشکل
آزمایش سه‌محوری

چکیده

ماسه‌های کربناته منبعی از مواد بالقوه برای ساخت‌وسازهای مهندسی دریایی می‌باشند، شکنندگی و تغییرشکل‌های بزرگ ایجادشده در این ماسه‌ها می‌تواند پایداری سازه‌های دریایی را تحت تأثیر قرار دهد. امروزه برای تسلیح و افزایش مقاومت این خاک‌ها از ژئوسنتتیک‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده برای ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و تغییرشکلی ماسه کربناته مسلح شده با ژئوتکستایل بافته‌شده و ژئوگرید انجام‌شده است. برای این منظور، اثر لایه‌های ژئوتکستایل و ژئوگرید، تراکم نسبی و فشار همه‌جانبه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با ماسه کربناته مسلح نشده، مقاومت نمونه‌های مسلح شده به میزان زیادی افزایش می‌یابد و رفتار نرم‌شوندگی منحنی‌های تنش-کرنش به رفتار سخت‌شوندگی با کرنش تغییر می‌کنند، و همچنین اتساع برشی نمونه‌ها تغییر می‌کنند. در مقایسه با نمونه‌های ماسه کربناته تقویت‌نشده، مقاومت نمونه‌های تقویت‌شده به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت، به‌طوری‌که این افزایش در برخی از نمونه‌های با فشار همه‌جانبه کم به ۱۰۰ درصد رسیده است. همچنین با افزایش تعداد لایه‌های ژئوتکستایل و ژئوگرید و اعمال فشار همه‌جانبه، تغییرشکل برشی به سمت رفتار کرنش-سخت شونده تغییر می‌کند و رفتار اتساعی نمونه‌ها با افزایش تراکم نسبی افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که تأثیر تعداد لایه‌ها و آرایش ژئوسنتتیک‌ها بر رفتار مکانیکی و تغییرشکلی نمونه‌های سه‌محوری با افزایش فشار همه‌جانبه کاهش می‌یابد. مقدار افزایش مقاومت برشی در نمونه‌های تسلیح شده در فشار همه‌جانبه کم، نسبتاً زیاد است و با افزایش فشار همه‌جانبه تمایل به کاهش دارد. ژئوتکستایل بافته‌شده و ژئوگرید به‌طور قابل‌توجهی مقاومت چسبندگی ظاهری خاک ماسه کربناته را بهبود می‌بخشند. مسلح‌کننده‌ها، تراکم نسبی و تنش همه‌جانبه، همگی با تغییرات حجمی و اتساع برشی نمونه‌های مسلح شده مرتبط هستند، اما خردشدگی ذرات بیشتر تحت تأثیر فشار همه‌جانبه قرار دارد. در نهایت نتایج نشان داد که ژئوگرید نسبت به ژئوتکستایل عملکرد بهتری در تسلیح دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

Effect of Woven Geotextile and Geogrid on Mechanical Properties and Deformation Behavior of Kish Carbonate Sand

Nima Hakimelahi[1], Meysam Bayat[2*], Rassoul Ajalloeian[3], Bahram Nadi[4]

[1] PhD student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
[2] Associate Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
[2] Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
[*] Corresponding author: bayat.m@pci.iaun.ac.ir

ARTICLE INFO **ABSTRACT**

Article History:
Received: 25 Sep 2023
Accepted: 18 Apr 2024
Available online: 20 Apr 2024

Keywords:
Carbonate sand
Woven geotextile
Geogrid
Shear strength
Deformation
triaxial test

Carbonate sands are among the potential material sources for marine engineering constructions. However, the brittleness and large deformations created in these sands can affect the stability of marine structures built on these soils. Today, geosynthetics are used to reinforce and increase the strength of these soils. CD triaxial tests were conducted under different confining pressure values to compare the mechanical and deformation properties of reinforced and unreinforced calcareous sand. The influences of configuration of reinforcing layers, confining pressure, relative density, and type of woven geotextile have been evaluated. The results show that compared to the unreinforced carbonate sand, the strength of the reinforced samples increases markedly, and the deviatoric stress-strain curves change from slight softening to hardening and dilatancy. Compared to unreinforced calcareous sand specimens, the strength of reinforced specimens significantly increased such that this growth reached 100% in some specimens with low confining pressure. Also, by increasing the number of geotextile and geogrid layers and applying a confining pressure, the shear deformation shifts toward strain-hardening behavior. dilative behavior of the specimens increases with an increase in the relative density of the specimens. The results showed that the influence of the number of layers and arrangement of geosynthetics on the mechanical behavior and deformation of triaxial specimens decreases with increasing the confining pressure. The amount of strength increase in reinforced specimens at low confining pressure is relatively high and tends to decrease with increasing the confining pressure. Overall, woven geotextile and geogrid significantly improve the apparent cohesion strength of carbonate sand soil. Woven geotextile and geogrid, relative density, and confining pressure all contribute to volumetric changes and dilatancy of reinforced specimens, but particle breakage is more affected by confining pressure. Finally, the results showed that geogrid has a better performance in reinforcement than geotextile.

۱ - مقدمه

ماسه‌های کربناته حاصل تجمع رسوبات بیوشیمیایی کربنات کلسیم می‌باشد که طی میلیون‌ها سال در کف دریاها ته‌نشین شده‌اند. رسوبات کربناته را می‌توان در مناطق معتدل و گرمسیری (به‌عنوان‌مثال، بخش جنوبی ایران، جزایر هاوایی، پورتوریکو، جمهوری ایرلند و استرالیا) یافت [۳-۱]. ویژگی اصلی ماسه‌های کربناته میزان کربنات کلسیم و تخلخل بالا و خردشدگی آن‌ها در تنش‌های زیاد می‌باشد[۶-۴]. ماسه‌های کربناته منبعی از مصالح بالقوه برای ساخت‌وسازهای مهندسی دریایی می‌باشند، اما شکنندگی و تغییرشکل‌های بزرگ ایجادشده در این ماسه‌ها می‌تواند پایداری سازه‌های دریایی را تحت تأثیر قرار دهد و در نتیجه استفاده از آن‌ها را با چالش‌های بزرگی روبرو می‌سازد [۴].

گودرزی و شاه‌نظری بیان کردند که ماسه‌های کربناته به دلیل حفرات درون‌ذره‌ای و بین‌ذره‌ای که در آن‌ها وجود دارد، رفتار کاملاً متفاوتی با ماسه‌های سیلیسی دارند، درنتیجه تعیین ویژگی‌های مقاومتی و تغییرشکل ماسه‌های کربناته برای دست‌یابی به یک طراحی ایمن مهندسی الزامی می‌باشد[۱]. پارامترهای تراکم، دانه‌بندی و حالت تنش، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر رفتار مقاومتی و تغییرشکلی ماسه‌های کربناته هستند [۵-۶]. رضوانی و همکاران با بررسی آزمایشگاهی روی دو ماسه کربناته نشان دادن که توزیع اندازه ذرات می‌تواند رفتار تنش-کرنش مواد خاک را تغییر دهد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که خاک‌هایی با ذرات بزرگ‌تر احتمال خردشدگی بیشتری دارند [۷]. با بهبود خواص مقاومتی و تغییرشکلی ماسه‌های کربناته با روش‌های مختلفی ازجمله روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌توان پایداری سازه‌های دریایی را به میزان قابل‌توجهی افزایش داد. روش‌های شیمیایی و بیولوژیکی به دلیل مشکلات زیست‌محیطی و عدم کنترل‌پذیری آن‌ها در مقیاس‌های بزرگ، کاربرد چندانی در پروژه‌های واقعی ندارند. کاربرد روش‌های فیزیکی به دلیل سهولت استفاده از مواد قابل بازیافت مانند ژئوسنتتیک‌ها (ژئوتکستایل و ژئوگرید) در سال‌های اخیر برای تسلیح خاک‌های ماسه‌ای بخصوص ماسه‌های کربناته افزایش زیادی یافته است [۸]. اگرچه تاکنون مطالعات گسترده‌ای برای ارزیابی رفتار تنش-کرنش خاک‌های دانه‌ای مسلح شده با ژئوتکستایل و ژئوگرید با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی انجام‌شده است، بااین‌حال مطالعات صورت گرفته روی ماسه کربناته مسلح شده با ژئوسنتتیک‌ها بسیار محدود می‌باشد.

گودرزی و شاه‌نظری رفتار مکانیکی ماسه کربناته مسلح شده با لایه‌های افقی ژئوتکستایل بافته نشده را با آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده بر روی نمونه‌های مسلح نشده و شده بررسی و نتایج را با ماسه‌های سیلیسی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از ژئوتکستایل، مقاومت بیشینه و کرنش گسیختگی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد [۱]. رضوانی پاسخ برشی دو خاک آهکی مسلح شده با لایه‌های ژئوتکستایل بافته نشده را با آزمایش‌های سه‌محوری فشاری مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که مسلح‌کننده‌های ژئوتکستایل حداکثر تنش انحرافی را افزایش دادند. بررسی رفتار خردشدگی این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

ماسه‌ها نیز نشان داد که کاهش تنش همه‌جانبه و افزایش تعداد لایه‌های ژئوتکستایل، خردشدگی ذرات ماسه آهکی را کاهش می‌دهد [۳]. رضوانی و همکاران تأثیر توزیع اندازه ذرات ماسه آهکی را روی پاسخ برشی و خردشدگی ذرات دو خاک مختلف بررسی کردند. آن‌ها آزمایش فشاری سه‌محوری را بر روی نمونه‌های خاک آهکی جزیره هرمز و ماسه بندر بوشهر انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ماسه جزیره هرمز در هر دو منحنی درجه‌بندی اصلی و مصنوعی نسبت به ماسه بندر بوشهر استحکام بیشتری دارد. نتایج آن‌ها نشان داد خاک‌هایی با ذرات بزرگ‌تر احتمال شکستگی بیشتری دارند [۷]. دینگ و همکاران ویژگی‌های مکانیکی و رفتار تغییرشکلی ماسه آهکی مسلح شده با ژئوگرید را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ژئوگرید تا حد زیادی مقاومت ماسه‌های آهکی را افزایش می‌دهد و میزان انقباض و خردشدگی آن‌ها را کاهش می‌دهد [۹].

در این مقاله، از یک ژئوتکستایل بافته‌شده و یک ژئوگرید برای تسلیح ماسه کربناته تهیه‌شده از جزیره کیش در خلیج‌فارس استفاده شده است. با انجام یک سری از آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده، خواص مکانیکی و تغییرشکلی ماسه کربناته تحت تنش‌های همه‌جانبه مختلف مقایسه شده است. برای ماسه کربناته مسلح شده، تأثیر آرایش لایه‌های مسلح‌کننده، تنش‌های همه‌جانبه، تراکم نسبی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، ویژگی‌های خردشدگی ذرات از طریق آزمایش‌های دانه‌بندی با الک مورد بررسی قرار گرفته است.

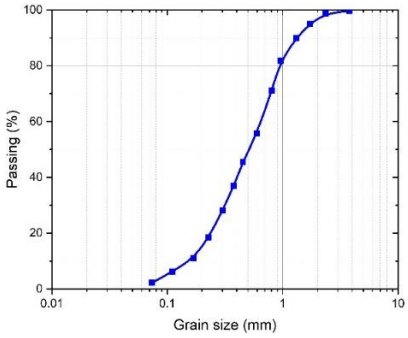
۲- مواد و آماده کردن نمونه

۲-۱- ویژگی‌های ماسه کربناته و مسلح‌کننده‌ها

ماسه کربناته مورد استفاده در این آزمایش ساختاری غیرسیمانی دارد. تصویر میکروسکوپ الکترونی از ماسه کربناته کیش در شکل (۱) نشان داده شده است. بررسی شکل ماسه کربناته نشان می‌دهد که این ماسه فضای خالی درون‌ذره‌ای زیادی دارد و سطوح ذرات کربناته ناهموار بوده که باعث افزایش اصطکاک بین ذرات می‌شود. این ماسه دارای ذرات مایل به قهوه‌ای، شکل نیمه گرد و تقریباً صفحه‌ای است. درصد کربنات کلسیم ماسه کربناته کیش ۹۳/۶٪ می‌باشد که از آزمایش واکنش شیمیایی ذرات ماسه با اسیدکلریدریک مطابق استاندارد BS1377 بدست آمده است. شکل (۲) منحنی توزیع اندازه ذرات ماسه کربناته را نشان می‌دهد. مشخصات فیزیکی ماسه کربناته در جدول (۱) نشان داده شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی مسلح‌کننده‌ها براساس داده‌های ارائه‌شده توسط شرکت‌های تولیدکننده در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی ماسه کربناته کیش



شکل ۲. منحنی توزیع اندازه ذرات ماسه کربناته کیش

جدول ۱. مشخصات ماسه کربناته کیش

مشخصات	مقدار
Gs	۲/۶۸
C_c	۰/۸۹
C_u	۳/۵۵
e_{max}	۰/۷۲
e_{min}	۰/۵۲
d_{10}(mm)	۰/۱۸
d_{30}(mm)	۰/۳۲
d_{60}(mm)	۰/۶۴

جدول ۲. مشخصات مسلح‌کننده‌ها

مشخصات	ژئوتکستایل	ژئوگرید
Thickness (mm)	۱/۱	۱/۵
Mass per unit area (g/m^2)	۲۲۰	۲۸۰
Net size of mesh (mm^2)	-	۲۵ * ۲۵
Max. Tensile load (kN/m)	۴/۴۴	۶۶
Extension at max. load (%)	۱۵	> ۴۰

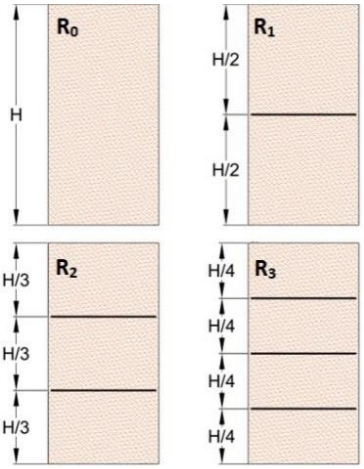
۲-۲- آماده کردن نمونه‌ها

وارادراجا و همکاران بیان کردند که برای کم کردن اثرات مقیاس، قطر بزرگ‌ترین دانه خاک باید کمتر از یک‌ششم قطر نمونه باشد [۱۰]. در این مطالعه قطر تمامی دانه‌ها کمتر از یک‌دهم قطر نمونه‌ها بود. نمونه‌های بازسازی‌شده دارای قطر ۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۴۰ میلی‌متر بودند [۱۱]. در این مطالعه روش کوبش مرطوب با میز لرزان برای بازسازی نمونه‌های سه‌محوری انتخاب‌شده است و تمامی نمونه‌ها با رطوبت بهینه ۸٪ ساخته شده‌اند. در این روش با اعمال تلاش‌های تراکمی مختلف بر روی لایه‌های مختلف خاک، لایه‌های همگن با تراکم مشخص بدست می‌آیند. نمونه‌ها با سه تراکم نسبی ۴۰، ۷۰ و ۹۰٪ (چگالی خشک ۱۶/۰۱، ۱۶/۶۲ و ۱۷/۰۵ کیلونیوتن بر مترمکعب) ساخته شده‌اند. برای ساخت هر نمونه،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

خاک کربناته به‌صورت لایه به لایه (۶ یا ۸ لایه) در داخل قالب استوانه‌ای ریخته و به ترتیب کوبیده شدند تا به تراکم موردنظر برسند. قبل از ریختن لایه بعدی، سطح لایه قبلی به‌طور کامل خراشیده شد تا ارتباط بین لایه‌ها به‌طور کامل برقرار باشد. مسلح‌کننده‌ها با قطر کمی کمتر از ۷۰ میلی‌متر به‌صورت دایره‌ای برش داده شدند و بر اساس الگوهای موردنظر به‌صورت افقی در نمونه‌ها قرار داده شدند. در این مطالعه از سه الگوی چینش همانند شکل (۳) استفاده شده است. جدول (۳) برنامه آزمایش‌های سه‌محوری را نشان می‌دهد (اعداد ۱ تا ۱۵ کل مجموعه تست‌ها و زیرنویس gt نشانگر مسلح‌کننده ژئوتکستایل و زیرنویس gg نشانگر مسلح‌کننده ژئوگرید است).



شکل ۳. آرایش مسلح‌کننده‌ها در نمونه‌ها

۲-۳- روش آزمایشگاهی

آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده (CD) برای ارزیابی ویژگی‌های مقاومتی و تغییرشکلی ماسه کربناته انجام شده است. نمونه‌ها تحت شرایط کاملاً اشباع آزمایش شدند و ترکیبی از روش اشباع پس فشار (۲۰۰ کیلوپاسکال با تنش مؤثر ۱۰ کیلوپاسکال) و تزریق گاز CO_2 برای دستیابی به درجه اشباع استفاده شدند. پارامتر فشار منفذی اسکمپتون $(B = \Delta u/\Delta\sigma_3)$ به‌عنوان درجه اشباع نمونه‌ها در نظر گرفته شد. کارگ و هگمن نشان دادند هنگامی‌که B>۰/۹۵ باشد، درجه اشباع، S، به ۱۰۰٪ می‌رسد [۱۲]. در تمامی آزمایش‌ها، مقادیر B نمونه‌ها بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۷ بود. پس از اشباع کامل نمونه‌ها، مرحله تحکیم همسان با اعمال فشارهای همه‌جانبه مؤثر انجام شد. نرخ کرنش برشی آزمایش‌های سه‌محوری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد و برش نمونه‌ها زمانی خاتمه یافت که کرنش محوری به ۲۰٪ یا تنش انحرافی به شرایط بحرانی رسید. تغییر حجم نمونه‌ها نیز با اندازه‌گیری مقدار آب خارج‌شده از نمونه‌ها در مرحله برش اندازه‌گیری شد. پس از پایان هر آزمایش، با استفاده از روش پیشنهادی هاردین میزان خردشدگی ذرات ماسه کربناته کیش با آنالیز توزیع اندازه ذرات تعیین شد [۱۳].

۳- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

۱-۳- رابطه تنش-کرنش انحرافی

لازم به ذکر است قسمت نتایج مربوط به ژئوتکستایل با جزئیات بیشتر در مقاله قبلی نویسندگان ارائه شده است [۲]. ویژگی‌های مقاومت برشی و تغییرشکل ماسه کربناته را می‌توان با پاسخ تنش-کرنش آن‌ها منعکس کرد. شکل (۴) نمودارهای تنش انحرافی-کرنش محوری را برای حالت‌های مختلف با هر دو مسلح‌کننده نشان می‌دهد. شکل (۴ الف) نشان می‌دهد که برای تنش همه‌جانبه کم، نمونه‌های گروه S1، $S2_{gt}$ و $S3_{gt}$ روند نرم شدگی با کرنش را دارند. اما نمونه‌های $S2_{gg}$، $S3_{gg}$ و $S4_{gg}$ در تنش همه‌جانبه زیاد، رفتار سخت‌شوندگی با کرنش از خود نشان می‌دهند (شکل ۴ب، ج و د). برخلاف نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل، رفتار سخت‌شوندگی با کرنش در نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید حتی در تنش‌های همه‌جانبه کم (۱۰۰ کیلوپاسکال) نیز مشهود است.

این نتایج بیانگر این است که هر دو مسلح‌کننده منجر به ایجاد رفتار سخت‌شوندگی با کرنش در هنگام برش می‌شوند و میزان این سخت‌شوندگی تابعی از نیروی وارده به مسلح‌کننده‌ها در هنگام برش هست. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در کرنش‌های محوری کوچک (ε_a <۲٪) مقاومت لایه‌های مسلح‌کننده‌ها هنوز به‌طور کامل بسیج نشده است و منحنی‌های مقاومت برشی به یکدیگر نزدیک هستند، هرچند با افزایش کرنش محوری و تنش همه‌جانبه، اختلاف منحنی‌های برشی بیشتر شده و رفتار سخت‌شوندگی با کرنش مشخص‌تر می‌شود. مقایسه رفتار نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل و ژئوگرید نشان می‌دهد که افزایش مقاومت در نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید همواره بیشتر از نمونه مشابه مسلح شده با ژئوتکستایل می‌باشد، که این افزایش ناشی از تفاوت مکانیسم‌های برهم‌کنش ماسه و مسلح‌کننده‌ها می‌باشد.

نگوین و همکاران نشان دادند که برای بسیج مقاومت برشی مسلح‌کننده در نمونه‌های سه‌محوری، کرنش محوری باید از حد مشخصی بگذرد [۱۴]. در واقع افزایش کرنش محوری منجر به بسیج مقاومت سطح مشترک مسلح‌کننده‌ها می‌شود و افزایش تنش همه‌جانبه نیز قفل و بست بین ذرات ماسه کربناته و سطح مسلح‌کننده‌ها را افزایش داده و باعث افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها می‌شوند [۱-۳].

جدول ۳- برنامه آزمایش‌های و پارامترهای اولیه

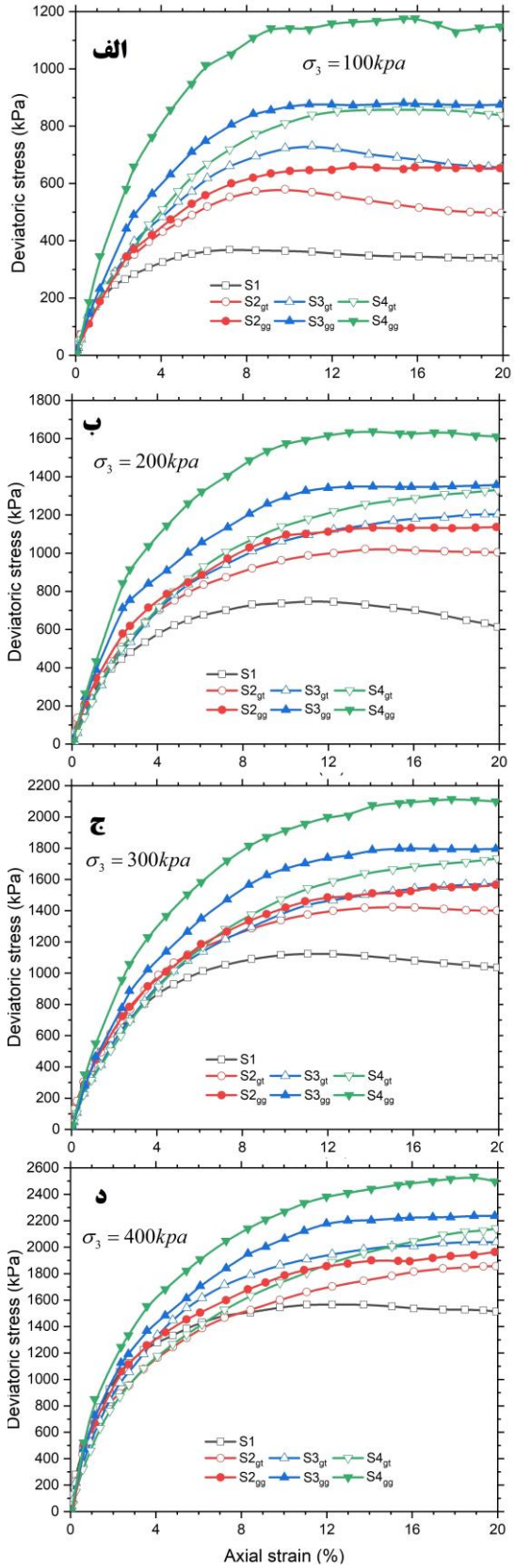
تعداد	لایه‌های مسلح‌کننده	چگالی نسبی(%)	تنش همه‌جانبه (kPa)
S1	۰	۷۰	۴۰۰/۳۰۰/۲۰۰/۱۰۰
S2	۱	۷۰	۴۰۰/۳۰۰/۲۰۰/۱۰۰
S3	۲	۷۰	۴۰۰/۳۰۰/۲۰۰/۱۰۰
S4	۳	۷۰	۴۰۰/۳۰۰/۲۰۰/۱۰۰
S5	۰	۴۰	۳۰۰
S6	۱	۴۰	۳۰۰
S7	۲	۴۰	۳۰۰
S8	۳	۴۰	۳۰۰
S9	۰	۹۰	۳۰۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

S10	۱	۹۰	۳۰۰
S11	۲	۹۰	۳۰۰
S12	۳	۹۰	۳۰۰
S13	۲	۷۰	۱۰۰
S14	۲	۷۰	۳۰۰
S15	۲	۹۰	۳۰۰

به‌طور مثال برای تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال، زمانی که کرنش برشی به ۵٪ می‌رسد، تنش انحرافی برای نمونه‌های گروه S1، $S2_{gt}$، $S3_{gt}$ و $S4_{gt}$ به ترتیب به ۶۱۹، ۷۷۰، ۸۰۵ و ۸۳۴ کیلوپاسکال می‌رسد، برای نمونه‌های $S2_{gg}$، $S3_{gg}$ و $S4_{gg}$ نیز به ترتیب افزایشی در حدود ۸۲۰، ۹۸۰ و ۱۱۲۱ کیلوپاسکال مشاهده شد. گودرزی و شاه‌نظری بیان کردند که فاصله عمودی بین لایه‌های مسلح‌کننده‌ها یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر طراحی پروژه‌های تسلیح خاک می‌باشند. در این مطالعه ۳ آرایش برای مسلح‌کننده‌ها در نظر گرفته‌شده است. شکل (۴) نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده‌ها مقاومت برشی بیشینه تمامی نمونه‌ها افزایش می‌یابد، اما میزان افزایش برای نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید بیشتر از نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل است. به‌طور مثال برای ماسه کربناته با تراکم نسبی ۷۰٪ و تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب برای نمونه‌های $S2_{gt}$ S2، $S3_{gt}$ و $S4_{gt}$ میزان افزایش مقاومت بیشینه برابر است با ۵۶٪، ۹۷٪ و ۱۳۱٪ و برای نمونه‌های $S2_{gg}$، $S3_{gg}$ و $S4_{gg}$ به ترتیب برابر است با ۷۰٪، ۱۳۰٪ و ۲۱۰٪. رفتار مشابهی برای نمونه‌هایی با تراکم ۴۰٪ و۹۰٪ نیز مشاهده شد. مقایسه نتایج برای فشارهای همه‌جانبه مختلف نشان می‌دهد که با افزایش تنش همه‌جانبه تأثیر تعداد لایه‌ها و آرایش مسلح‌کننده‌ها در داخل نمونه‌های سه‌محوری کاهش می‌یابد، در واقع مسلح‌کننده‌ها در تنش‌های همه‌جانبه کم کارآیی بیشتری دارند.



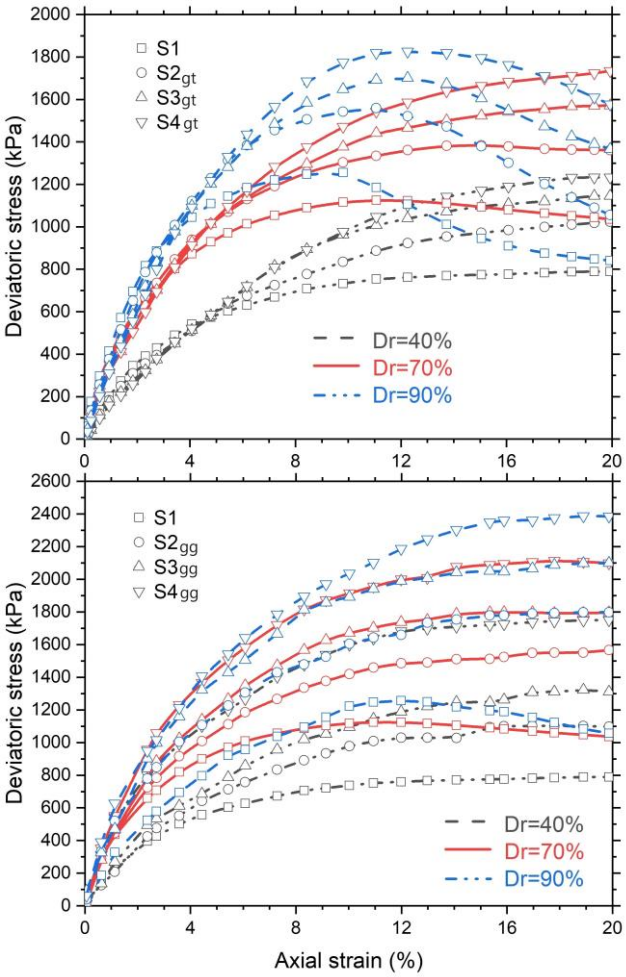
شکل۴. منحنی‌های تنش انحرافی- کرنش در تنش‌های همه‌جانبه مختلف

شکل (۵) اثر تراکم نسبی نمونه‌ها را روی منحنی‌های تنش انحرافی- کرنش محوری نشان می‌دهد. نتایج در حالت کلی نشان می‌دهد که با افزایش تراکم نمونه‌ها، مقاومت برشی افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش قفل و بست، بین دانه‌های ماسه کربناته و مسلح‌کننده‌ها در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

سطح مشترک آن‌ها می‌باشد. برای نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل در تراکم نسبی ۴۰٪، مقادیر نسبی افزایش مقاومت برشی برای حالت‌های $S2_{gt}$ تا $S4_{gt}$ به ترتیب برابرند با ۳۰، ۴۵ و ۵۶٪، همچنین برای دو تراکم نسبی ۷۰٪ و ۹۰٪ نیز این مقادیر به ترتیب برابرند با: ۲۳، ۳۹ و ۵۴٪ و ۲۴، ۳۶ و ۴۵٪. همچنین برای نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید در تراکم نسبی ۴۰٪، افزایش نسبی مقاومت برشی برای حالت‌های $S2_{gg}$ تا $S4_{gg}$ به ترتیب برابرند با ۴۰، ۶۸ و ۱۲۱٪، همچنین برای دو تراکم نسبی ۷۰٪ و ۹۰٪ نیز این مقادیر به ترتیب برابرند با: ۳۹، ۶۰ و ۸۸٪ و ۴۳، ۶۷ و ۸۹٪. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تراکم نسبی، تأثیر لایه‌های مسلح‌کننده ژئوتکستایل کاهش می‌یابد. تیزپا و همکاران بیان کردند که با افزایش تراکم نسبی، اتساع نمونه‌های ماسه‌ای در هنگام برش افزایش پیدا می‌کند و این عامل منجر به تضعیف مقاومت سطح مشترک ماسه و مسلح‌کننده می‌شود [۱۵].



شکل ۵. منحنی‌های تنش انحرافی-کرنش محوری در تراکم‌های مختلف

نتایج همچنین نشان می‌دهد که در نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل برای دو تراکم نسبی ۴۰٪ و ۷۰٪ رفتار منحنی‌های تنش انحرافی، کاملاً سخت شونده است و کاهش مقاومتی در آن‌ها بعد از مقاومت بیشینه دیده نمی‌شود. علاوه بر این، مقاومت ماسه سست پس از تسلیح با مقاومت ماسه غیرمسلح با تراکم ۷۰٪ تقریباً یکسان است، زیرا ژئوتکستایل قادر به جبران کمبود مقاومت نمونه‌های سست است. برای تمامی نمونه‌ها با تراکم نسبی ۷۰٪ کاهش اندک مقاومت بعد از مقاومت بیشینه در نمونه غیرمسلح، به افزایش مقاومت تا کرنش ۲۰٪ در نمونه‌های مسلح تبدیل‌شده است. برخلاف نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل، در تمامی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید، تقریباً رفتار سخت شونده با کرنش مشاهده می‌شود و کاهش مقاومتی حتی در تراکم ۹۰٪ نیز مشاهده نشده است که کارآیی بیشتر ژئوگرید را نسبت به ژئوتکستایل نشان می‌دهد.

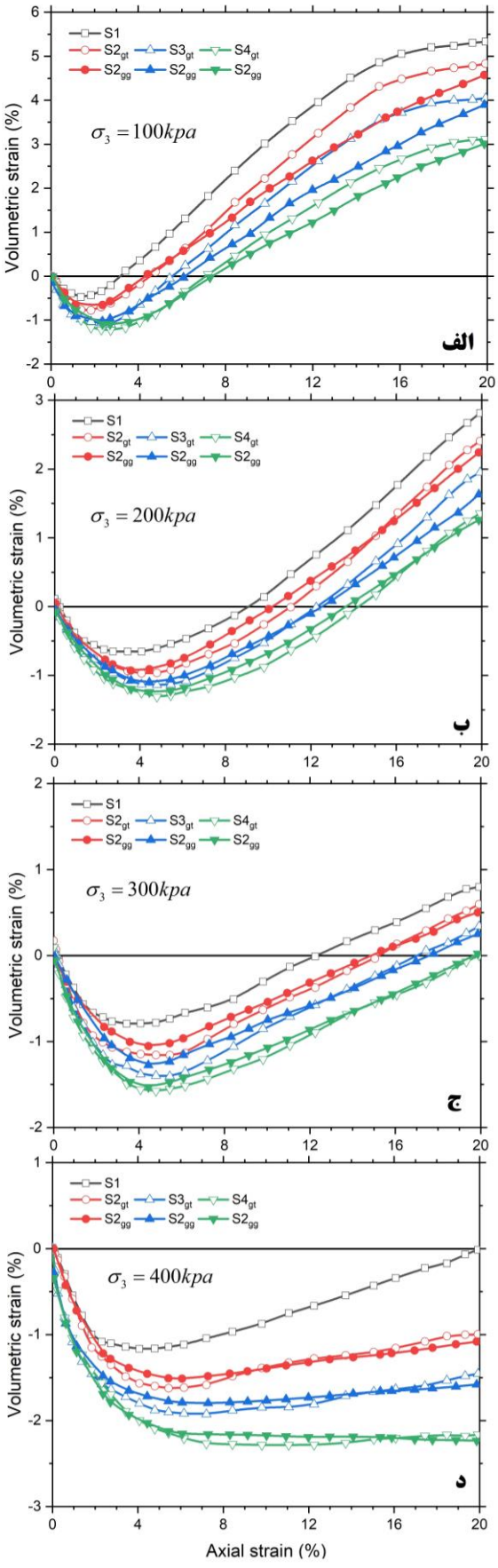
۳-۲- رابطه کرنش حجمی-کرنش محوری

در این مطالعه در طول آزمایش‌های سه‌محوری بزرگ‌مقیاس زهکشی شده، حجم آب زهکشی شده اندازه‌گیری شد. بنابراین، تغییرشکل حجمی نمونه‌ها به‌طور غیرمستقیم به دست آمد. برای خاک‌های ماسه‌ای، دو روند اصلی با افزایش کرنش وجود دارد، اتساع برشی و انقباض برشی. منحنی‌های کرنش حجمی-کرنش محوری نمونه‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. مطالعات مختلف نشان داده است که شکل نامنظم و سطح زبر ذرات ماسه کربناته منجر می‌شود که اصطکاک و قفل و بست بین دانه‌های خاک کربناته بیشتر از خاک‌های سیلیکاتی شود [۱۶-۱۸]. منحنی‌های گروه S1 رفتار کرنش حجمی ماسه کربناته تقویت نشده را نشان می‌دهند. ماسه کربناته در کرنش‌های کم ابتدا کمی منقبض می‌شود و سپس با افزایش کرنش برشی عمدتاً تحت اتساع برشی قرار می‌گیرد، که بیانگر روند نرم شدگی کرنش برشی است که با مشاهدات گزارش‌شده توسط سایر محققان مطابقت دارد [۱۹-۲۱]. مقایسه منحنی‌های S1 برای تمامی فشارهای همه‌جانبه نشان می‌دهد که با افزایش فشار همه‌جانبه، هم انقباض اولیه نمونه‌ها زیاد شده و هم اتساع نمونه‌ها تحت کرنش‌های زیاد کاهش می‌یابد. مقایسه نمونه‌های مسلح شده و مسلح نشده نشان می‌دهد که استفاده از مسلح‌کننده‌ها منجر به افزایش انقباض اولیه و کاهش اتساع نمونه‌ها می‌شود که تأثیری کاملاً مشابه با فشار همه‌جانبه دارد، درواقع با افزایش هم‌زمان تعداد لایه‌های مسلح‌کننده‌ها و فشار همه‌جانبه، تمامی نمونه‌ها در فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال رفتار انقباضی از خود نشان می‌دهند (شکل ۶د).

لایه‌های مسلح‌کننده‌ها تغییرشکل جانبی را مهار می‌کنند و در نتیجه کرنش حجمی نمونه‌ها در کرنش‌های محوری بالا کاهش می‌یابد. افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده‌ها منجر می‌شود که رفتار انقباضی نمونه‌ها تا کرنش‌های بالاتری اتفاق بیافتد، درواقع مسلح‌کننده‌ها در کرنش‌های کم مانع از خردشدگی و بازآرایی ذرات ماسه کربناته می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]



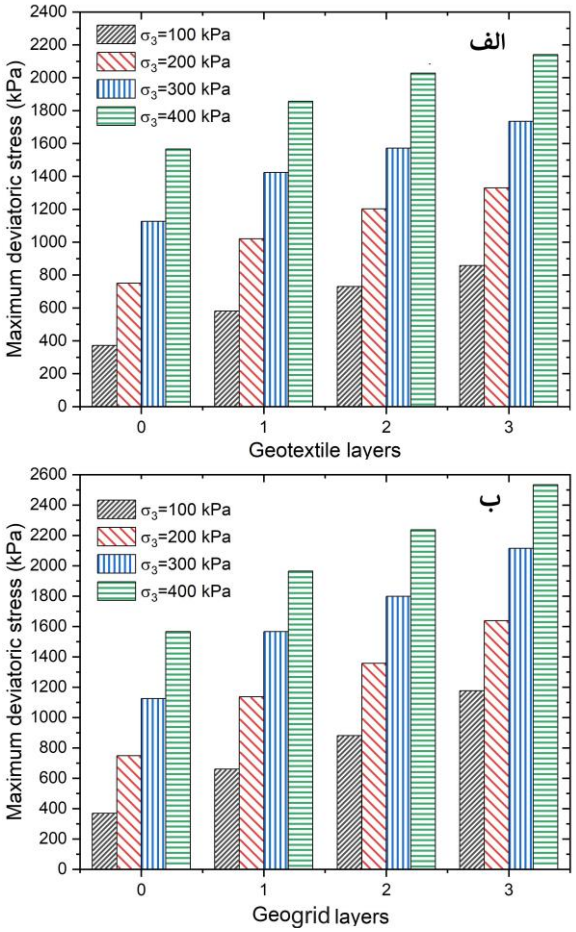
شکل ۶. منحنی‌های کرنش حجمی- کرنش محوری در تنش‌های همه‌جانبه مختلف

مقایسه نتایج مربوط رفتار تغییرشکلی نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید و ژئوتکستایل نشان داد که رفتار انقباضی آن‌ها تقریباً با یکدیگر یکسان می‌باشد، اما میزان اتساع نمونه‌های مسلح شده با ژئوگریدها اندکی کمتر از نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل است. همچنین مقایسه نتایج برای کل آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش تراکم نمونه‌ها اتساع برشی افزایش چشمگیری می‌یابد که با ویژگی ماسه‌های سیلیسی معمولی مطابقت دارد. اتساع ماسه شل بسیار کم می‌باشد و نمونه‌های مسلح شده با تراکم نسبی ۴۰٪، رفتار کاملاً انقباضی در انتهای آزمایش‌ها دارند.

۳-۳- تحلیل مقاومت بیشینه

شکل (۷) نشان می‌دهد که مسلح‌کننده‌ها و فشار همه‌جانبه تأثیر زیادی روی بیشینه تنش انحرافی دارند. به‌طور مثال برای تنش همه‌جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال، تنش محوری برای نمونه‌های S1، $S2_{gt}$، $S3_{gt}$ و $S4_{gt}$ به ترتیب به ۱۱۱۶، ۱۴۰۲، ۱۵۷۱ و ۱۷۳۵ کیلوپاسکال می‌رسد.

همچنین برای نمونه‌های $S2_{gg}$، $S3_{gg}$ و $S4_{gg}$ نیز میزان تنش محوری به ترتیب برابر است با، ۱۵۶۶، ۱۷۹۸ و ۲۱۱۳ کیلوپاسکال. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در محدوده تنش‌های همه‌جانبه بررسی‌شده در این مطالعه، رابطه بین تعداد لایه‌های مسلح‌کننده و مقاومت برشی بیشینه تقریباً به‌صورت خطی می‌باشد.



شکل ۷. بیشینه تنش انحرافی در فشارهای همه‌جانبه مختلف برای نمونه‌ها با Dr=۷۰٪

برای بررسی تأثیر مسلح‌کننده‌ها روی پارامترهای مقاومت برشی ماسه کربناته، پوش‌های گسیختگی موهر کولمب، بر اساس نتایج تست‌های

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

S1، $S2_{gt}$، $S3_{gt}$، $S4_{gt}$ و $S2_{gg}$، $S3_{gg}$ ، $S4_{gg}$ ترسیم شدند و پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک بحرانی، محاسبه شدند. جدول (۴) مقادیر این پارامترها را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده‌ها میزان چسبندگی نمونه‌ها افزایش زیادی نشان می‌دهد، اما تغییرات زاویه اصطکاک داخلی کمتر می‌باشد. زوایای اصطکاک برای نمونه‌های S1، $S2_{gt}$، $S3_{gt}$ و $S4_{gt}$ به ترتیب حدود، ۳۹، ۴۲، ۴۴ و ۴۵ درجه است. درحالی‌که چسبندگی برای نمونه‌های S1، $S2_{gt}$، $S3_{gt}$ و $S4_{gt}$ به ترتیب حدود، ۱/۵، ۳۳ و ۶۰ و ۸۸ کیلوپاسکال می‌باشد. در واقع ژئوتکستایل‌ها با اعمال نیروی کششی به افزایش مقاومت برشی کمک می‌کنند. مقایسه میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک برای دو نوع مسلح‌کننده نشان می‌دهد که میزان چسبندگی مربوط به ژئوگرید، ۳۰ تا ۴۰٪ بیشتر از چسبندگی ناشی از ژئوتکستایل‌ها می‌باشد. تغییرات زاویه اصطکاک در هر دو حالت تقریباً یکسان می‌باشد.

۳-۴- شاخص تسلیح با مسلح‌کننده‌ها

برای ارزیابی اثر تسلیح در خاک کربناته ، یک ضریب تسلیح، R_σ، به‌صورت زیر تعریف شده است [۲]:

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{fr} - \sigma_{fu}}{\sigma_{fu}} \qquad (۱)$$

که در آن σ_{fr} و σ_{fu} به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت برشی بحرانی نمونه خاک کربناته مسلح و مسلح نشده است.

جدول ۴. پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های مسلح و مسلح نشده

نمونه	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک (°)
S1	۱/۵	۳۸/۶
$S2_{gt}$	۳۳/۱	۴۱/۹
$S3_{gt}$	۶۰/۲	۴۳/۷
$S4_{gt}$	۸۸/۳	۴۴/۸
$S2_{gg}$	۶۸/۶	۴۱/۱
$S3_{gg}$	۹۲/۳	۴۳/۲
$S4_{gg}$	۱۲۸/۵	۴۴/۹

روند افزایش مقاومت تمامی نمونه‌های ماسه کربناته در تراکم نسبی ۷۰٪ در شکل (۸) نشان داده شده است. همه ضرایب تسلیح تحت تنش‌های همه‌جانبه مختلف مثبت هستند، که نشانگر میزان افزایش مقاومت برشی خاک کربناته در اثر تسلیح می‌باشد. مقایسه نتایج بیانگر این نکته است که R_σ با افزایش تنش‌های همه‌جانبه کاهش می‌یابد که نشانگر کارآیی بیشتر مسلح‌کننده‌ها در تنش‌های همه‌جانبه کم می‌باشد. همچنین با افزایش تنش همه‌جانبه، تأثیر آرایش مسلح‌کننده‌ها در نمونه‌ها کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در تنش همه‌جانبه ۴۰۰ کیلوپاسکال، تغییرات R_σ با آرایش مسلح‌کننده‌ها بسیار کم است. مقایسه نتایج مربوط به ژئوتکستایل و ژئوگریدها نشان می‌دهد که هم میزان افزایش R_σ در نمونه‌های ژئوگریدها و هم تأثیر تنش همه‌جانبه روی برهم‌کنش ژئوگرید و خاک کربناته تقریباً دو برابر ژئوتکستایل می‌باشد، دلیل این امر تفاوت برهم‌کنش ژئوگرید با خاک کربناته نسبت به ژئوتکستایل می‌باشد [۹]. گودرزی و شاه‌نظری و رضوانی بیان کردند که در نمونه‌هایی با سه لایه مسلح‌کننده، ژئوتکستایل‌های پایین و بالا بسیار نزدیک به مرزهای نمونه هستند و اثر مرزی احتمالاً مانع افزایش بیشتر ضریب تسلیح می‌شود[۱-۳]. افزایش فشارهای همه‌جانبه، اتساع برشی خاک کربناته و کرنش کششی مسلح‌کننده‌ها را به‌طور مؤثرتری محدود کند، که این به‌خوبی روابط بین ضرایب تسلیح و تنش همه‌جانبه را توضیح می‌دهد.

۳-۵- خردشدگی دانه‌ها

خردشدگی دانه‌های ماسه کربناته عامل اصلی در تعیین ویژگی‌های مقاومتی و تغییرشکل ماسه‌های کربناته می‌باشد [۲۲]. خردشدگی دانه‌های ماسه کربناته وابسته به عوامل مختلفی می‌باشد، برخی از این عوامل عبارت‌اند از وضعیت تنش و بزرگی آن در خاک کربناته، شکل ذرات خاک، مقدار کلسیم و مشخصات حفرات موجود در ذرات خاک [۲۳-۲۵]. تغییر در توزیع اندازه ذرات می‌تواند منعکس‌کننده خرد شدن ذرات باشد. در این مطالعه، منحنی‌های توزیع مجدد اندازه ذرات همه نمونه‌ها پس از برش، تعیین شد. مقایسه منحنی‌های توزیع اندازه ذرات ماسه کربناته مسلح شده و نشده، قبل و بعد از تست‌ها نشان می‌دهد که تفاوت بسیار کمی بین نمودارهای اولیه و پس از برش ماسه کربناته مسلح وجود دارد. لی و لیو بیان کردند که میزان خردشدگی دانه‌های ماسه کربناته در آزمایش‌های سه‌محوری بسیار کمتر از آزمایش‌های تراکم یک‌بعدی در تنش‌های زیاد می‌باشد [۲۵]. هاردین برای مقایسه‌پذیر شدن شکست ذرات خاک‌های مختلف، پارامتر نرخ شکست نسبی، B_r را ارائه کرد [۱۳]:

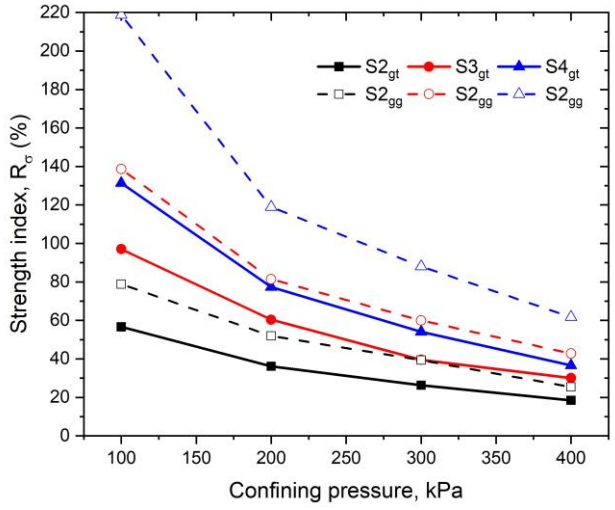
$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \qquad (۲)$$

که در آن B_t خردشدگی کلی و B_p پتانسیل خردشدگی است. روش محاسبه B_r در شکل (۹) نشان داده شده است.

مقادیر B_r برای تمامی آزمایش‌های انجام‌گرفته در این مطالعه محاسبه شده است و در شکل (۱۰) نشان داده شده است. نتایج شکل (۱۰) نشان می‌دهد با افزایش تنش همه‌جانبه میزان خردشدگی خاک‌های کربناته برای هر دو نوع مسلح‌کننده افزایش می‌یابد. تنش همه‌جانبه بیشترین تأثیر را در خردشدگی ذرات دارد و با افزایش مقدار آن، میزان خردشدگی نمونه‌ها، بخصوص نمونه‌های غیرمسلح افزایش می‌یابد که ناشی از خردشدگی ذرات در هنگام برشی در تنش همه‌جانبه زیاد و کاهش امکان اتساع نمونه‌ها با محصورشدگی بیشتر می‌باشد.

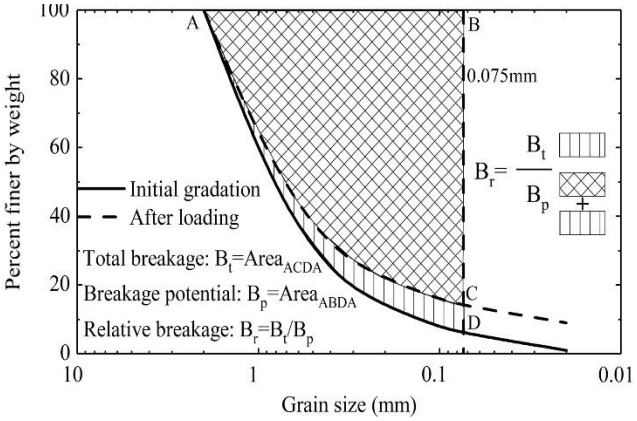
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

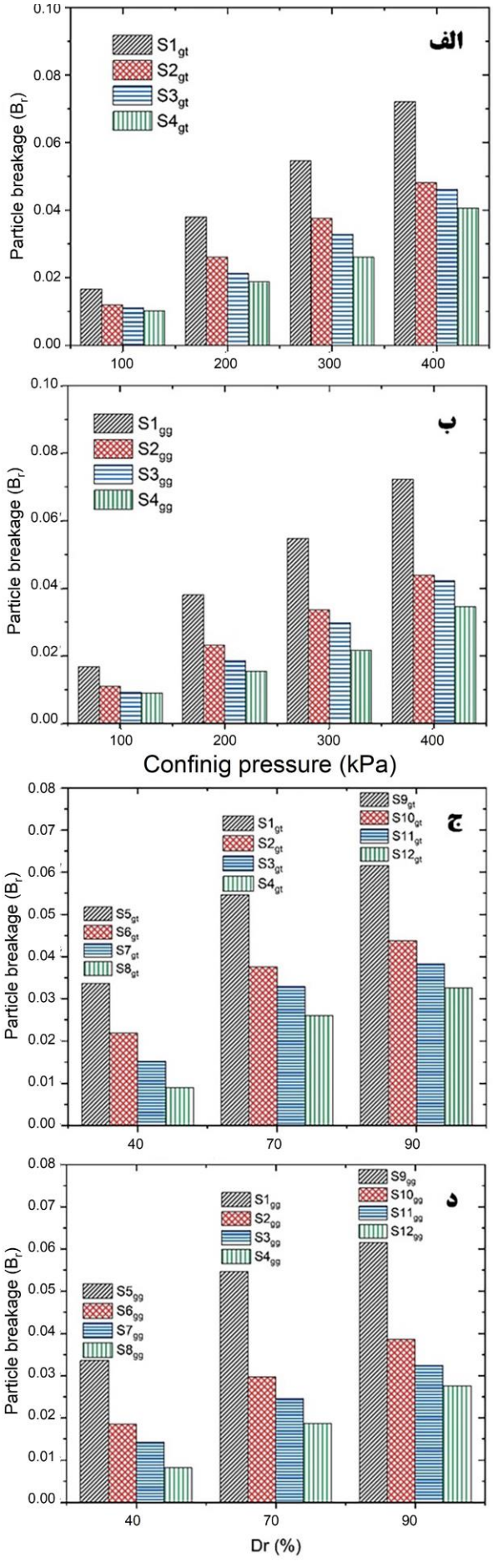


شکل ۸. تغییرات نسبت مقاومت در برابر فشار همه‌جانبه

همچنین نتایج بیانگر کاهش خردشدگی با افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده‌ها می‌باشد. همچنین با افزایش تراکم نسبی نیز مقدار پارامتر B_r افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش تراکم حفرات موجود در نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند و سطح تماس ذرات افزایش می‌یابد و در هنگام برش، شکست بیشتری اتفاق می‌افتد. مقایسه نتایج برای تنش همه‌جانبه نشان می‌دهد که B_r رابطه خطی با تنش همه‌جانبه دارد. نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد اتساع نمونه‌های مسلح شده با ژئوگرید در تمامی موارد کمتر (بین ۱۰ تا ۲۰٪) از نمونه‌های مسلح شده با ژئوتکستایل می‌باشد. علت این امر سختی بیشتر ژئوگرید و تفاوت مکانیسم تسلیح بین ژئوگرید و ژئوتکستایل می‌باشد. پارامترهای تنش همه‌جانبه، تراکم نسبی و تعداد لایه‌ها به ترتیب بیشترین تأثیر را روی خردشدگی نمونه‌های ماسه کربناته دارند.



شکل ۹. روش محاسبه پارامتر نرخ خردشدگی، B_r



شکل ۱۰. تأثیر تنش همه‌جانبه و تراکم نسبی روی پارامتر B_r

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ویژگی‌های مقاومتی و تغییرشکلی ماسه کربناته مسلح شده با ژئوتکستایل بافته‌شده ژئوگرید ارزیابی شده است. تأثیر پارامترهایی مانند اثر مسلح‌کننده، تراکم نسبی، فشار همه‌جانبه از طریق یک سری آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده و آزمایش‌های دانه‌بندی روی پاسخ تنش-کرنش، کرنش حجمی، شاخص مقاومت و خردشدگی ذرات ماسه کربناته مسلح شده مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی موارد زیر به دست آمد:

۱- تسلیح ماسه کربناته با ژئوتکستایل و ژئوگرید باعث می‌شود که رفتار تنش انحرافی-کرنش محوری نرم شونده ماسه کربناته مسلح نشده به رفتار سخت شونده با کرنش تبدیل شود. در مقایسه با نمونه‌های ماسه کربناته مسلح نشده، مقاومت نمونه‌های مسلح شده به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت، این افزایش در برخی نمونه‌ها با فشار همه‌جانبه کم تا ۱۰۰٪ برای ژئوتکستایل و تا ۲۰۰٪ برای ژئوگرید می‌رسد. همچنین افزایش تراکم نسبی ماسه مسلح شده و نشده منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها شد، اما این افزایش مقاومت وابسته به لایه‌بندی مسلح‌کننده‌ها و فشار همه‌جانبه بود.

۲- منحنی‌های تغییرشکل ماسه کربناته مسلح شده و نشده، ابتدا اندکی رفتار انقباضی نشان داده و سپس با افزایش محدوده کرنش اعمالی رفتار اتساعی نشان دادند. لایه‌های مسلح‌کننده‌ها با محدود کردن تغییرشکل نمونه‌های مسلح شده، میزان اتساع آن‌ها را کاهش داده و درنتیجه تغییرات حجمی نمونه‌ها کاهش یافت. افزایش تراکم نسبی نمونه‌ها، رفتار اتساعی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد، و برعکس افزایش تنش همه‌جانبه میزان اتساع را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که با افزایش فشار محصورکننده تأثیر تعداد لایه‌ها و آرایش مسلح‌کننده‌ها بر روی رفتار مکانیکی و تغییرشکل نمونه‌های سه‌محوری کاهش می‌یابد. مقدار کاهش اتساع و انقباض ایجاد شده توسط ژئوگرید بیشتر از ژئوتکستایل بود که ناشی از تفاوت مکانیسم تسلیح در دو مسلح‌کننده می‌باشد.

۳- میزان افزایش مقاومت در نمونه‌های مسلح شده در فشار محصورکننده کم نسبتاً زیاد است و با افزایش تنش همه‌جانبه تمایل به کاهش دارد. افزایش تعداد لایه‌های مسلح‌کننده‌ها میزان چسبندگی ظاهری نمونه‌ها را تا حد زیادی (تا حدود ۸۹ کیلوپاسکال برای ژئوتکستایل و ۱۳۰ کیلوپاسکال برای ژئوگرید) افزایش می‌دهد ولی تأثیر چندانی روی زاویه اصطکاک نمونه‌ها ندارد (حدود ۶ درجه) زیرا دانه‌بندی ریز ماسه کربناته کیش قفل و بست کمتری با مسلح‌کننده‌ها دارد، در واقع مکانیسم غالب برهم‌کنش ماسه و مسلح‌کننده‌ها بجای اصطکاک، محصورکنندگی می‌باشد.

۴- میزان خردشدگی ذرات تا حد زیادی تحت تأثیر فشار همه‌جانبه قرار دارد و با افزایش تنش همه‌جانبه میزان خردشدگی به‌صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. استفاده از لایه‌های مسلح‌کننده میزان خردشدگی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد و این کاهش در تنش‌های همه‌جانبه زیاد، مشخص‌تر است. هرچند در حالت کلی میزان شکست ذرات ماسه کربناته مسلح شده و مسلح نشده در محدوده تنش‌های همه‌جانبه مورد مطالعه بسیار کم بود. تأثیر ژئوگرید در کاهش اتساع نمونه‌ها بیشتر از ژئوتکستایل می‌باشد. پارامترهای تنش همه‌جانبه، تراکم نسبی و تعداد لایه‌ها به ترتیب بیشترین تأثیر را روی خردشدگی نمونه‌های ماسه کربناته دارند.

۵- مقایسه نتایج نشان داد که رفتار تنش کرنش و تغییرشکل نمونه‌های مسلح به دو عامل اصلی مرتبط می‌باشد، اول قفل و بست بین دانه‌های ماسه کربناته و دوم مشخصات سطح مشترک ذرات ماسه کربناته و لایه‌های مسلح‌کننده.

در حالت کلی نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوتکستایل و ژئوگرید بسته به محل کاربرد آن‌ها می‌توانند منجر به افزایش مقاومت و کاهش نشستهای ناشی از خردشدگی ماسه‌های کربناته شوند؛ هرچند که باید در انتخاب نوع مسلح‌کننده و آرایش آن‌ها به محل کاربرد و تنش‌های همه‌جانبه موجود دقت کافی کرد.

۶ - مراجع

1- Goodarzi, S., & Shahnazari, H., (2019). *Strength enhancement of geotextile-reinforced carbonate sand*, Geotextiles and Geomembranes, 47, p. 128-139. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.12.004

2- Hakimelahi, N., Bayat, M., Ajalloeian, R. & Nadi, B., (2023). *Effect of woven geotextile reinforcement on mechanical behavior of calcareous sands*, Case Studies in Construction Materials, 18, p. e02014. doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02014

3- Tavakol, K., Bayat, M., Nadi, B. & Ajalloeian, R., (2023). *Combined Influences of Cement, Rice Husk Ash and Fibre on the Mechanical Characteristics of a Calcareous Sand*, KSCE Journal of Civil Engineering, 27(9), pp. 3729-3739. doi.org/10.1007/s12205-023-0695-7

4- Ou, Q., Li, Y., Yang, Y., Luo, Z., Han, S. & Zou, T., (2022). *Mechanical Property of Biomodified Geogrid and Reinforced Calcareous Sand*. Geofluids, 2022 Apr 5, doi.org/10.1155/2022/3768967

5- Rezvani, R., (2019). *Shearing response of geotextile- reinforced calcareous soils using monotonic triaxial tests*, Marine Georesources &

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

doi.org/10.1680/gein.13.00012

15- Tizpa, P., Chenari, R., J., Fard, M., K., & Machado, S., L., (2015). *ANN prediction of some geotechnical properties of soil from their index parameters*, Arabian Journal of Geosciences, 8, p. 2911–2920. doi.org/10.1007/s12517-014-1304-3

16- Shahnazari, H., & Rezvani, R., (2013). *Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study*, Engineering Geology, 159, p. 98–105. doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.005

17- Wang, X., Z., Weng, Y., L., Wei, H., Z., Meng, Q., S., & Hu, M., J., (2019). *Particle obstruction and crushing of dredged calcareous soil in the Nansha Islands, South China Sea*, Engineering Geology, 261, p. 105274. doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105274

18- Feia, S., Sulem, J., Canou, J., Ghabezloo, S., & Clain, X., (2016). *Changes in permeability of sand during triaxial loading: effect of fine particles production*, Acta Geotechnica, 11, p. 1-19. doi.org/10.1007/s11440-014-0351-y

19- Zhu, S., Z., (2003). *The Theory of Triaxial Test and its Application*, CEPP Press, Peking, p. 71-75.

20- Hyodo, M., Aramaki, N., Itoh, M., & Hyde, A., F., L., (1996). *Cyclic strength and deformation of crushable carbonate sand*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 15, p. 331–336. doi.org/10.1016/0267-7261(96)00003-6

21- LaVielle, T., H., (2004). *Liquefaction Susceptibility of Uncemented Calcareous Sands from Puerto Rico by cyclic triaxial testing*, Ph.D. dissertation. Virginia Tech, Blacksburg, VA. Coop et al.

22- Hassanlourad, M., H., Salehzadeh, H., & Shahnazari, H., (2008). *Dilatancy and Particle Breakage Effects on the Shear Strength of Calcareous Sands Based on Energy Aspects*, International Journal of Civil Engineering, 6 (2), p. 108–119.

23- Wei, H., Z., Li, X., X., Zhang, S., D., Zhao, T., Yin, M., & Meng, Q., S., (2021). *Influence of particle breakage on drained shear strength of calcareous sands*, International Journal of Geomechanics, 21. doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.000207

24- Wu, Y., Li, N., Wang, X., Cui, J., Chen, Y., Wu, Y., & Yamamoto, H., (2021). *Experimental investigation on mechanical behavior and* Geotechnology, 38, p. 238–249. doi.org/10.1080/1064119X.2019.1566936

6- Wang, X., Z., Jiao, Y., Y., Wang, R., Meng, Q., S., & Tan, F., Y., (2011). *Engineering characteristics of the calcareous sand in nansha islands, South China sea*, Engineering Geology, 120, p. 40–47. doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.011

7- Rezvani, R., Nabizadeh, A., & Amin, Tutunchian, M., (2021). *The effect of particle size distribution on shearing response and particle breakage of two different calcareous soils*. The European Physical Journal Plus, 136. doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01871-5

8- Shahnazari, H., Jafarian, Y., Tutunchian, M., A., & Rezvani, R., (2016). *Probabilistic Assessment of Liquefaction Occurrence in Calcareous Fill Materials of Kawaihae Harbor*, Hawaii. International Journal of Geomechanics, 16(6), p. 05016001. doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.00006

9- Ding, X., M., Luo, Z., G., & Ou, Q., (2022). *Mechanical property and deformation behavior of geogrid reinforced calcareous sand.* Geotextiles and Geomembranes, 50(4), p. 618-631. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.03.002

10- Varadarajan, A., Sharma, K., G., Venkatachalam, K., & Gupta, A., K., (2003). *Testing and modeling two rockfill materials.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 129, p. 206-218. doi.org/10.1061/090-0241(2003)129:3(206)

11- Wichtmann, T., Niemunis, A., & Triantafyllidis, T., (2005). *Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained triaxial tests*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, p. 967-979. doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.02.022

12- Karg, C., & Haegeman, W., (2009). *Elasto-plastic long-term behaviour of coarse-grained soils: experimental investigation.* Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, p. 155-172. doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.02.006

13- Hardin, B., O., (1985). *Crushing of soil particles*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 111, p. 1177-1192. doi.org/10.10610733-9410(1985)111:10(117)

14- Nguyen, M., D., Yang, K., H., Lee, S., H., Wu, C., S., & Tsai, M., H., (2013). *The behavior of non-woven geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression*, Geosynthetics International, 20, p. 207-225.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]

particle crushing of calcareous sand retrieved from South China Sea, Engineering Geology, 280. doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105932

25- Li, X., & Liu, J., K., (2021). *One-dimensional compression feature and particle crushability behavior of dry calcareous sand considering fine-grained soil content and relative compaction*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80, p. 4049–4065. doi.org/10.1007/s10064-021-02160-2

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-11]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.24]