یادداشت فنی

بررسی آزمایشگاهی مقاومت برشی ایجاد شده بین ماسه کربناته با شمع‌های فولادی و بتنی با استفاده از آزمایش برش مستقیم

ابوالقاسم احمدی[۱] ، محمد امین نوذری[۲،۳*]، میثم بیات[۴]، احسان دلاوری[۵]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران faraznam_company@yahoo.com
[۲] استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران ma.nozari@iau.ac
[۳] استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ماسال، دانشگاه آزاد اسلامی، ماسال، ایران ma.nozari@iau.ac
[۴] استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، bayat.m@pci.iaun.ac.ir
[۵] استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران e_delavari@pci.iaun.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۶
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۶

کلمات کلیدی:
اندرکنش
ماسه کربناته
شمع
برش مستقیم

چکیده

در این مقاله به منظور بررسی اندرکنش ماسه کربناته و شمع، مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده است. برای رسیدن به این هدف، شمع‌ها نیز به دوصورت فلزی و بتنی در نظر گرفته شده است. مصالح نماینده شمع در جعبه برش پایین و مصالح خاکی در جعبه برش بالا قرار گرفته است. متغیرهای اصلی این پژوهش عبارت است از مصالح شمع (فولادی و بتنی)، سطح تنش نرمال، دانسیته نسبی خاک، زبری سطح شمع و زاویه سطح برش نسبت به شیارهای ایجاد شده بر روی مصالح شمع. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که پارامترهای مقاومت برشی بدست آمده در مرز بین شمع و خاک تابعی از عوامل مختلف همچون خصوصیات ژئوتکنیکی خاک و زبری سطح شمع است. به طوریکه با افزایش دانسیته نسبی خاک و افزایش زبری سطح شمع، مقدار زاویه اصطکاک بسیج شده در سطح بین شمع و خاک افزایش می‌یابد. با یک سطح زبری یکسان، مقدار زاویه اصطکاک بین شمع و خاک در نمونه‌های فولادی بیشتر از نمونه‌های بتنی است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد مقاومت برشی بین صفحات و ماسه در حالت جهت برش عمود بر جهت شیارهای صفحات بیشتر است. خردشدگی در ماسه کربناته بعد از اعمال تنش برشی در انتهای آزمایش در صفحات فولادی بیشتر از صفحات بتنی است.

Experimental study of the mobilized shear strength between calcareous sand and steel / concrete piles using the direct shear test

Abolghasem Ahmadi[1], Mohammad Amin Nozari [2,3*], Meysam Bayat[3], Ehsan Delavari[3]

[1] PhD student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
[2]Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Masal Branch, Islamic Azad University, Masal, Iran
[3]Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 18 Jan 2023
Accepted: 26 Jan 2024
Available online: 26 Jan 2024

Keywords:

ABSTRACT

In this paper, in order to investigate the interaction of calcareous sand and pile, a series of direct shear tests have been performed. To achieve this goal, piles have been considered in both steel and concrete forms. The material representative of the pile was placed in the lower box and the sand was placed in the upper box. The main variables of this research are pile materials (steel and concrete), normal stress level, soil relative

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

density, pile surface roughness, and the angle of the shearing surface relative to the grooves created on the pile surface. The results show that the shear strength parameters obtained at the boundary between the pile and the sand are a function of various factors such as the geotechnical characteristics of the sand and the roughness of the pile surface. As the relative density of the soil increases and the surface roughness of the pile increases, the friction angle mobilized on the surface between the pile and the sand increases. The friction angle between pile and soil in steel samples is higher than in concrete samples for surface roughness. The results of the tests show that the shear resistance between the plates and sand is higher in the state of the shearing direction perpendicular to the direction of the grooves of the plates. Crushing in carbonate sand after applying shear stress at the end of the test is more in steel plates than in concrete plates.

Interaction
Calcareous sand
Pile
Direct shear

۱ - مقدمه

بهسازی خاک شامل روش‌های مختلف تغییر خصوصیات خاک بوده که نهایتاً افزایش مقاومت برشی خاک، کاهش تغییرات حجمی و تأمین رفتار خاک را به همراه دارد. خاک‌های مسئله‌دار مثل خاک‌های واگرا، روانگرا، رومبنده، متورم‌شونده، خاک‌های نرم و یا خاک‌هایی که دچار تغییر شکل زیاد هستند که دارای پایداری حجمی پایین و مقاومت کم بوده و زمانی که تحت بارگذاری‌های شدیدتری قرار می‌گیرند، بافت داخلی بهم ریخته و نشست زیادی می‌کند. ماسه کربناته علی‌رغم مقاومت برشی بالا، در زمان بارگذاری معمولا دچار خرد شدگی می شود که این پدیده با تغییر شکل زیاد همراه است. برای جلوگیری و کاهش نشست می‌توان از انواع روش‌های مختلف بهسازی استفاده نمود. بکارگیری یک روش خاص بستگی به عوامل اقتصادی، کارایی در خاک موجود، دسترسی به تجهیزات و مصالح و مهارت ها و اثرگذاری در محیط زیست دارد. یکی از روش‌های پرکاربرد برای غلبه بر این مشکل، استفاده از شمع‌ها و یا به عبارت دیگر پی‌های عمیق است. هدف از به کارگیری پی‌های عمیق انتقال بار سازه به لایه‌های پایین‌تر در صورت وجود لایه‌های سطحی ضعیف است [4–1].

ماسه کربناته، به عنوان یکی از مهمترین ترکیبات زمین‌شناسی، در ساخت و سازهای دریایی نقش بسیار حیاتی ایفا می‌کند. در پروژه‌های عمرانی، از سازه‌های شمع فولادی و بتنی نیز به عنوان عناصر کلیدی استفاده می‌شود تا ایمنی و استحکام این سازه‌ها را تضمین شود. این ترکیب منحصر به فرد از ماسه کربناته و سازه‌های شمعی در پروژه‌های عمرانی ساحلی و دریایی، نقش بسیار مهمی در توسعه پایدار مناطق ساحلی و دریایی ایفا می‌کند [5, 6].

رفتار تراکم‌پذیری خاک‌ها از جمله ماسه کربناته به نگرانی مهمی در مهندسی ژئوتکنیک تبدیل شده است. با اجرای ساختمان‌ها، خاک‌ریزها، جاده‌ها و... اغلب نشست‌های قابل‌توجهی ایجاد می‌شود. این نشست‌ها را مخصوصاً زمانی می‌توان خیلی مهم دانست که سازه سنگین و حجیمی بر روی اینگونه خاک‌ها احداث شده باشد. پیش‌بینی رفتار خاک بعد از ماه‌ها و یا سال‌ها با استفاده از دانش امروزی، چالش مهمی در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. زمانی که خاک تحت بارگذاری ثابتی قرار می‌گیرد، با گذشت زمان تغییر شکل‌هایی را تجربه می‌کند که خزش نامیده می‌شود. این تغییر شکل‌های وابسته به زمان، به خصوص زمانی که تغییر شکل‌های درازمدت مطرح می‌شود، در مهندسی ژئوتکنیک اهمیت زیادی دارند. این تغییر شکل‌ها، شامل نشست سازه (متقارن یا غیر متقارن) بر روی زمین‌های تراکم‌پذیر، حرکات شیب‌های طبیعی و یا گودبرداری‌شده، فشرده‌شدن زمین‌های نرم اطراف تونل و... می‌باشد [8 ,7]. یکی از راه‌حل‌های کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری خاک استفاده از شمع یا گروه شمع است. شمع‌ها عناصری لاغر از جنس فولاد، بتن، چوب و ... است که برای انتقال بارهای سطحی به لایه های عمیق زمین استفاده می شوند[14–9] . گاهی لایه‌های عمیق سخت‌تر از لایه‌های سطحی است و در این حالت شمع وظیفه انتقال بار از لایه‌های سطحی به لایه‌های سخت عمیق را دارد [1, 15].

استفاده از شمع فولادی و بتنی در سازه‌های دریایی، از جمله توربین‌های بادی و دیگر سازه‌های دریایی، برای تضمین استحکام و پایداری این سازه‌ها در محیط دریا بسیار حائز اهمیت است. شمع‌های فولادی به دلیل مقاومت بالا در برابر تنش‌های مکانیکی و تاثیرات محیط دریا، به عنوان پایه‌های استوانه‌ای زیر سازه‌های دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شمع‌ها می‌توانند به عنوان پشتیبان‌های اصلی برای نصب توربین‌های بادی در دریاها عمل کنند همچنین، بتن نیز به عنوان ماده‌ای سازه‌ای که در ساخت و سازهای دریایی استفاده می‌شود، اهمیت دارد. از بتن مقاوم در برابر آب شور در سازه‌های دریایی مانند موانع ساحلی، دیوارهای دریاچه، و پایه‌های توربین‌های بادی استفاده می‌شود. این بتن‌ها باید به طور موثر در مقابل خوردگی نمک و تاثیرات زلزله مقاومت داشته باشند. به کمک ترکیب شمع‌های فولادی و بتنی در سازه‌های دریایی، ایمنی و استحکام این سازه‌ها در محیط دریا تضمین می‌شود و امکان اجرای پروژه‌های پایدار در مناطق ساحلی و دریایی فراهم می‌شود. همچنین، توربین‌های بادی که بر روی پایه‌های شمعی بتنی نصب می‌شوند، به

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

تولید انرژی پایدار و نیروی پاک از باد در مناطق ساحلی کمک می‌کنند.

در شمع‌های اصطکاکی، یکی از عوامل مهم مقاومت در برابر بارهای خارجی، اصطکاک بسیج شده در جداره شمع با خاک است که موضوع اصلی این پژوهش تعیین عوامل موثر بر روی این مقدار اصطکاک ایجاد شده است. میزان اصطکاک بین شمع و خاک به عوامل زیادی همچون میزان سربار، جنس شمع، زبری سطح شمع، نوع شمع و جنس خاک دارد. این عوامل ذکر شده در زاویه اصطکاک بین شمع و خاک تاثیرگذار هستند. زاویه اصطکاک بین شمع و خاک پارامتر مهمی است که معمولا مقدار دقیق آن در محاسبات در نظر گرفته نمی شود و به صورت ضریبی از اصطکاک خاک برای سهولت در محاسبات در نظر گرفته می‌شود [9, 10, 16, 17]. یکی از هدف‌های اصلی این پژوهش بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی ضریب اصطکاک بین شمع و ماسه کربناته است.

تاکنون اصطکاک بین مصالح خاکی و مصالحی همچون بتن، فولاد و ژئوتکستایل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. اگر چه هر کدام از این مطالعات پارامترهای خاصی را در نظر داشته اند. اکثر این مطالعات با استفاده از دستگاه برش مستقیم بوده است [18–21]. معمولا برای بررسی اندرکنش خاک با سایر مصالح از آزمایش برش مستقیم کوچک یا بزرگ مقیاس استفاده می شود. بدین صورت که خاک در جعبه فوقانی برش مستقیم و مصالح مورد نظر در جعبه تحتانی برش مستقیم قرار می‌گیرد [17, 22–28]. در بیشتر این پژوهش‌ها از ماسه سیلیسی استفاده شده است و رفتار اندرکنش ماسه کربناته با شمع‌های فولادی و بتنی تا حدودی ناشناخته است.

در این زمینه می‌توان به پژوهش سو و همکاران [18] اشاره کرد. ایشان با استفاده از آزمایش برش مستقیم اثر اندازه متوسط دانه‌های ماسه و زبری سطح فولاد را بر روی اصطکاک ایجاد شده در مرز بین این دو مصالح را بررسی کرد. نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان داد که اندازه متوسط ذرات ماسه‌ای در یک مقدار زبری ثابت روی سطح فولاد، تاثیر ناچیزی بر روی مقدار اصطکاک ایجاد شده بین دو مصالح داشته است.

دیدونا و همکاران [29] جهت بررسی رفتار شمع‌های بتنی شناور در مصالح دانه‌ای، برهم کنش این مصالح دانه‌ای را با بتن مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش هم از دستگاه برش مستقیم برای نشان دادن رفتار اصطکاکی بین مرز دو مصالح استفاده شده است. در این پژوهش علاوه بر بررسی پارامترهای معمول همچون سطح تنش قائم اعمالی، اثر درجه حرارت نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

انگمر و همکاران [30] با آزمایش بر روی شمع‌ها در خاک‌های ماسه ی کربناته در استرالیا به این نتیجه رسید که ماسه‌های کربناته کاملا متفاوت با ماسه‌های سیلیسی عمل می‌کنند و پیش بینی ظرفیت باربری شمع‌ها بر اساس معادلات معمول و روش‌های معمول در خاک‌های ماسه سیلیسی با مقادیر واقعی متفاوت است و بیشتر از مقادیر واقعی ظرفیت باربری به دست می‌آید. برخی از نتایج این پژوهشگران به این صورت است که اصطکاک جانبی در شمع‌های فولادی در ماسه‌های کربناته بسیار کم است و تقریباً در طول‌های مختلف شمع تقریباً یکسان است و مستقل از عمق شمع (در واقع تنش همه جانبه) است.

دیسون و راندولف [31] ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در ماسه کربناته را در دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی بررسی کردند. آنها نیز به این نتیجه رسیدند که رفتار شمع‌ها و یا به عبارت دیگر ظرفیت باربری جانبی آنها در خاک ماسه کربنات کاملا متفاوت با بقیه خاک‌ها است.

تابوکانون و همکاران [32] نشان دادند که اصطکاک جداره بین شمع و خاک در زمان بارگذاری سیکلیک کاهش یافته و به دنبال آن مقدار ظرفیت باربری اصطکاکی شمع کاهش می‌یابد که مقدار آن در ماسه‌های سست بیشتر و همچنین این کاهش ظرفیت باربری در زمان افزایش سختی و جابجایی‌های بزرگتر افزایش می‌یابد.

لهان و همکاران [33] با استفاده از آزمایش‌های صحرایی رفتار شمع‌ها را در خاک‌های ماسه‌ای کربناته را بررسی کردند. همچنین تعدادی آزمایش برش مستقیم استاتیکی و سیکلیک بر روی نمونه‌های بازسازی شده از همان خاک انجام شد. نتایج این پژوهش براساس مقادیر ثبت شده سنسورها نشان می‌دهد که تنش‌های اطراف شمع در محل خیلی پایین است و حدود ۲ تا ۵ کیلو پاسکال است و همچنین اتساع خاک عمدتا ظرفیت باربری شمع را افزایش می‌دهد.

جیانگ و همکاران [34] با استفاده از یک مدل فیزیکی ظرفیت باربری و تغییرشکل شمع‌های فولادی در خاک‌های ماسه کربناته را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار خاک‌های ماسه کربناته بهسازی شده با شمع‌های فولادی کاملاً متفاوت با خاک‌های ماسه سیلیسی است. برای ماسه‌های با دانسیته نسبی یکسان، ظرفیت باربری نهایی در ماسه‌های کربناته تقریباً ۶۶ تا ۷۰ درصد نمونه مشابه در ماسه سیلیسی است و همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اصطکاک جانبی در شمع‌های با انتهای باز کمتر از مقدار مشابه در شمع‌ها با انتهای بسته در خاک‌های ماسه کربناته است، با این حال این مقدار در بهترین حالت حدود ۲۰ تا ۲۷ در صد در نمونه مشابه در ماسه سیلیسی است. ایشان دلیل کاهش اصطکاک جانبی در خاک‌های ماسه کربناته را به دلیل خرد شدن خاک‌های ماسه کربناته در تنش‌های بالا در زمان شمع‌کوبی بیان کرده‌اند.

ناروی و لتیران [35] با استفاده از یک مدل فیزیکی رفتار خاک ماسه کربناته بهسازی شده با شمع را مورد بررسی قرار داد. در این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

مدل فیزیکی سه نوع شمع ، شمع‌های کوبشی، شمع‌های حفاری شده و تزریق شده با استفاده از آزمایش بیرون کشیدگی (Pull Out) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که اصطکاک جانبی شمع‌های تزریق شده و حفاری شده خیلی بالاتر از شمع‌های کوبشی در شرایط یکسان می‌باشد.

مکدوئل و بولتن [36] ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های ماسه کربناته با دانه بندی های متفاوت بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که در عمق‌های کم خرد شدگی ماسه بسیار ناچیز بوده ولی در عمق‌های پایین‌تر خورد شدگی ذرات در دستگاه سانتریفیوژ زیاد بوده است. همچنین مقاومت نوک شمع در عمق‌های کم در خاک‌های خوب دانه بندی شده بیشتر بوده ولی مقدار آن در عمق‌های پایین و یا در واقع با افزایش سربار مستقل از دانه بندی اولیه خاک بوده است.

اسماعیل [37] با استفاده از آزمایش در محل اصطکاک جانبی شمع‌های بتنی کوبشی در خاک‌های ماسه کربناته متراکم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش با حالت های مشابه در خاک‌های ماسه سیلیسی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اصطکاک جانبی شمع‌های کوبشی در خاک‌های ماسه کربناته متراکم کمتر از نمونه‌های مشابه در ماسه‌های سیلیسی است. اسماعیل و الثناد [38] با استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس در محل مقاومت بیرون‌کشی شمع‌های حفاری شده در خاک‌های ماسه کربناته متراکم را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اصطکاک جانبی شمع‌ها با عدد SPT بدست آمده در محل رابطه دارد.

با توجه به موارد ذکر شده در بالا، بیشتر کارهای انجام شده در این زمینه بر روی شمع‌ها در محل انجام شده است، اگرچه آزمایش‌های در محل ارزش زیادی دارند ولی کنترل اصطکاک جانبی شمع‌ها و ارائه یک مطالعه جامع و پارامتریک در مورد اجرای شمع‌ها در خاک‌های ماسه کربناته و پارامترهای موثر بر این پدیده بسیار مشکل است. همچنین اکثر مطالعات گذشته بر روی ماسه سیلیسی انجام شده است و پژوهش‌های کمی بر روی ماسه کربناته انجام شده است. از طرف دیگر، برخلاف مطالعات قبلی که اغلب به یک نوع مصالح شمع محدود می شدند، در این پژوهش شمع‌ها به دو صورت فلزی و بتنی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این تنوع در انتخاب مصالح شمع، این امکان را مهیا می‌کند تا تأثیر نوع مصالح شمع بر اندرکنش با ماسه کربناته و ویژگی‌های آن مورد برر سی قرار گیرد. همچنین، متغیرهای مهمی مانند سطح تنش نرمال، دانسیته نسبی خاک، زبری سطح شمع و زاویه سطح برش نسبت به شیارهای ایجاد شده بر روی مصالح شمع، به عنوان پارامترهای اصلی در این پژوهش مدنظر قرار گرفته‌اند.

۲ – مواد و روش‌ها

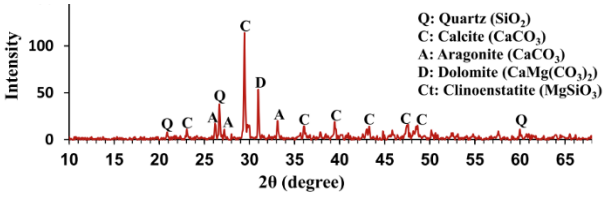
همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در این پژوهش از ماسه کربناته استفاده شده است. ماسه کربناته مورد استفاده در این آزمایش از جزیره کیش در خلیج فارس تهیه شده است. بررسی شکل ماسه کربناته نشان می‌دهد که این ماسه فضای خالی درون‌ذره‌ای زیادی دارد و سطوح ذرات کربناته ناهموار بوده که باعث افزایش اصطکاک بین ذرات می‌شود. این ماسه دارای ذرات مایل به قهوه‌ای، شکل نیمه گرد و تقریباً صفحه‌ای است. طبق نتایج بدست آمده از آزمایش XRF مطابق با ASTM-E1621، ترکیب شیمیایی ماسه کربناته استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج آزمایش XRD در شکل ۲ نیز نشان می‌دهد که غالب‌ترین ترکیب شیمیایی ماسه، کربنات کلسیم ($CaCO_3$) است. دانه‌بندی ماسه مورد استفاده نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل۱- ماسه کربناته استفاده شده در این پژوهش

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ماسه کربناته

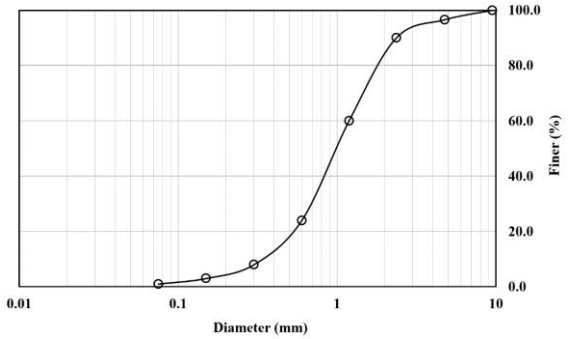
Characteristics	Calcareous Sand
CaO	49.91
Na_2O	1.78
MgO	1.91
Al_2O_3	1.28
SiO_2	1.92
P_2O_5	0.14
SO_3	0.57
Cl	0.45
Fe_2O_3	0.46
SrO	0.31
Others	41.27



شکل ۲- نتایج آزمایش X-ray بر روی ماسه کربناته

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

آزمایش دانه‌بندی برای تعیین اندازه‌ی دانه‌های خاک و طبقه‌بندی خاک برای بخش درشت دانه خاک مطابق با استاندارد ASTM D-422 انجام گردید. سایر مشخصات ماسه در جدول ۱ ارائه شده است. برای تعیین مقدار e_{max} از روش A معرفی شده در ASTM D-4254 استفاده شده است که خاک در سست‌ترین حالت از طریق یک قیف داخل قالب ریخته شده است و در نهایت بر اساس وزن خاک و حجم قالب، پارمتر e_{max} تعیین شده است. برای بدست آوردن مقدار e_{min} نیز از روش 1A معرفی شده در ASTM D4253 استفاده شده است. از میز لرزه کوچک طراحی شده برای این آزمایش استفاده شده است که در این روش خاک از طریق ارتعاش درون قالب متراکم شده و در نهایت با درنظرگیری حجم قالب و وزن خاک، مقدار e_{min} بدست آمده است.

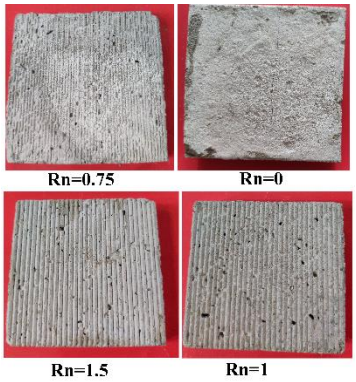


شکل ۳- منحنی دانه‌بندی ماسه کربناته

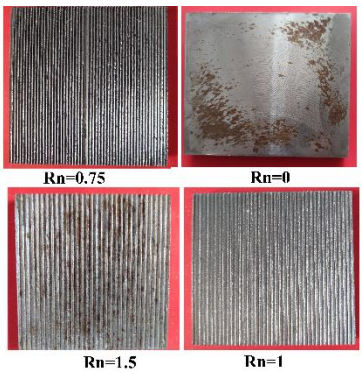
جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی ماسه کربناته

Characteristics	Calcareous Sand
Gs (-)	2.73
D_{10} *(mm)*	0.4
D_{30} *(mm)*	0.7
D_{50} *(mm)*	1
D_{60} *(mm)*	1.19
Cu (-)	2.98
Cc (-)	1.03
e_{min}	0.61
e_{max}	0.96
γ_{min} *(g/cm³)*	1.36
γ_{max} *(g/cm³)*	1.69
MDD (g/cm³)	1.521
OMC (٪)	4
Soil Type (UCSC)	SP

برای شبیه سازی شمع بتنی و فولادی از قطعات بتنی و فولادی با سطح زبری متفاوت استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌های بتنی از ماسه سیلیسی ریزدانه و سیمان تیپ ۲ با یک طرح اختلاط ثابت استفاده شده است. نمونه‌ای از نمونه‌های بتنی و فولادی ساخته شده در این پژوهش در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. در این پژوهش از سه نمونه بتنی با مقدار Rn (نسبت عمق شیار ایجاد شده روی سطح بتن یا فولاد به قطر متوسط ذرات ماسه) برابر با ۰، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵ استفاده شده است. از این پارامتر بعنوان یک پارامتر بدون بعد برای نشان دادن اثر عمق شیار روی سطوح فولادی و بتنی استفاده شده است. با توجه به ثابت بودن خاک یا در واقع مقدار قطر متوسط ذرات ماسه (D_{50}) افزایش Rn، افزایش عمق شیار روی سطح فولادی یا بتنی را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری در آزمایش‌های اندرکنش در دستگاه برش مستقیم استفاده شده است.



شکل۴- نمونه بتنی ساخته شده این پژوهش



شکل۵- نمونه فولادی ساخته شده این پژوهش

برای برش صفحات فلزی، از برش CNC با دقت بالا استفاده شده است. برای ساخت صفحات بتنی نیز از صفحات فولادی ساخته شده بعنوان قالب استفاده شده است تا عمق شیارهای صفحات بتنی دقیقا مشابه صفحات فولادی شود. از آنجاکه صفحات فولادی در آزمایش‌ها تخریب نشده، دوباره در آزمایش‌های بعدی از آنها استفاده شده است. ولی نتایج آزمایش‌های اولیه بر روی نمونه‌های بتنی نشان داده که این نمونه‌ها آسیب‌پذیر هستند و بعد از آزمایش، لبه‌های تیزگوشه بتن تخریب شده است و برای هر آزمایش از یک نمونه بتنی خاص استفاده شده است و بعد از آزمایش دیگر از آنها استفاده مجدد نشده است. لازم بذکر است که پارامترهای مقاومت برشی بدست آمده بر اساس مقاومت نهایی بوده که در اکثر آزمایش‌ها این مقدار در دامنه کرنش‌های بزرگ بد ست آمده است. در این سطح از کرنش، شکستگی لبه‌های بتنی ممکن است بر روی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

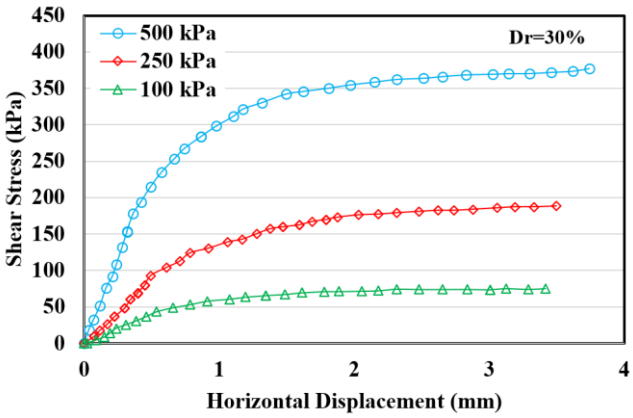
نتایج اثرگذار بوده و بدلیل مقاومت بالاتر فولاد این پدیده در سطوح فولادی مشاهده نشده است. در پروژه‌های واقعی نیز این اتفاق می‌افتد، بعبارت دیگر این پدیده در شمع‌های بتنی در پروژه‌های عمرانی اتفاق خواهد افتاد که می‌توان گفت این شرایط موجود در آزمایش‌ها تقریبا مشابه با شرایط واقعی است.

آزمایش‌ها در جعبه دستگاه برش مستقیم با مقیاس ۱۰ × ۱۰ سانتی‌متر انجام شده است. برای آماده‌سازی بستر ماسه ابتدا خاک تهیه شده از محل را کوبیده تا کلوخه‌های آن از هم جدا شوند. سپس خاک را از الک مورد نظر عبور می‌دهیم تا به دانه‌بندی یکنواختی برسیم. ابتدا شمع شیارزده را در کف دستگاه برش قرار داده (به هیچ عنوان نباید شمع مورد نظر در جعبه‌ی برش لقی داشته باشد) سپس خاک ماسه کربناته خشک شده را با توجه به وزن مخصوص مورد نظر، در یک لایه با ارتفاع مورد نظر در داخل جعبه برش ریخته و بعد از ریختن آن را توسط چکش دستگاه برش مستقیم کوبیده تا به ارتفاع موردنظر برسد. شیارهای ایجاد شده بر روی صفحات فولادی و بتنی برای محاسبه دانسیته نسبی ماسه در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، فضای خالی بین شیارها در محاسبات مقدار ماسه لازم جهت تراکم نمونه حساب شده است. قابل ذکر است در تمامی آزمایش‌ها از خاک خشک استفاده شده است. بعد از متراکم‌کردن ماسه، وزنه‌ی مربوطه را برداشته و درپوش مخصوص جعبه‌ی برش را که قرار است نیروی نرمال بر آن وارد شود، بر روی نمونه قرار می‌دهیم و بعد از تمیزکردن جعبه آن را در زیر دستگاه می‌گذاریم .

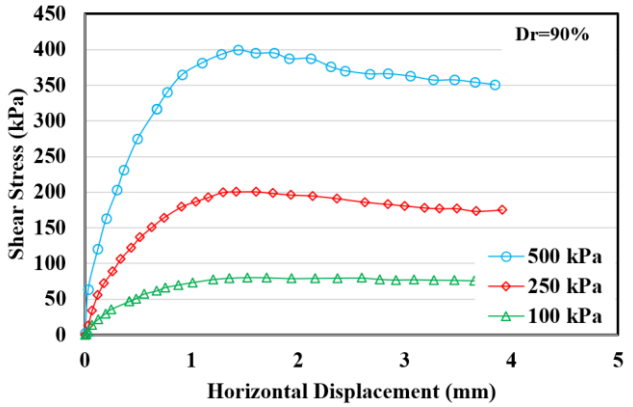
پس از آماده سازی نمونه‌ها، بار نرمال به نمونه اعمال شد. آزمایش‌ها در سه تنش نرمال ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال انجام شد. اعمال بار نرمال تا زمانی که نشست قائم متوقف شود ادامه یافت. سپس جابجایی افقی به نمونه‌ها اعمال شد. بارگذاری جانبی با سرعت متوسط ۱ میلی‌متر بر دقیقه مطابق با استاندارد ASTM D3080 انجام شده است.

۳ – نتایج آزمایش‌ها

در آزمایش‌های اولیه، تعدادی آزمایش بر روی نمونه ماسه کربناته انجام شده است تا پارامترهای مقاومت برشی خاک‌ها در دانسیته نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد مشخص شود. شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای مربوط به ماسه کربناته در دانسیته نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت نمونه‌ها با دانسیته ۹۰٪ دارای نقطه پیک هستند ولی نمونه‌ها با دانسیته ۳۰٪ نقطه پیک از خود نشان نداده‌اند. از طرف دیگر، به ازای یک تنش نرمال ثابت، مقاومت برشی ماکزیمم در نمونه‌ها با دانسیته بال ۹۰٪ بیشتر از مقدار متناظر در دانسیته ۶۰٪ است.

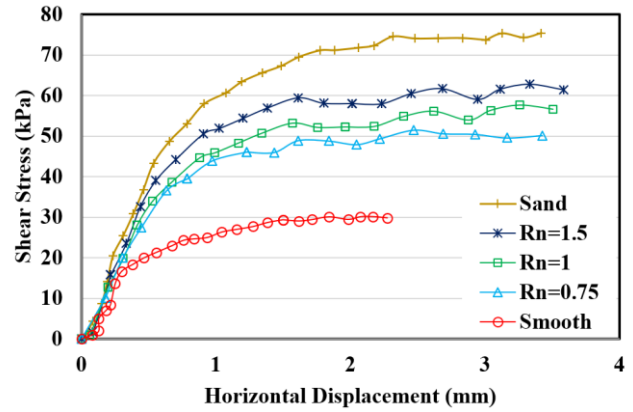


شکل ۶- نمودار تنش برشی – کرنش برشی برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۳۰٪



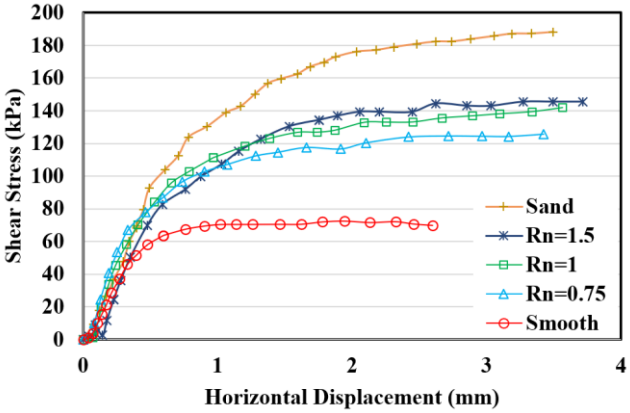
شکل ۷- نمودار تنش برشی – کرنش برشی برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰٪

در این بخش نتایج بدست آمده برای نمونه ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۳۰٪ همراه با صفحات فولادی با سطوح زبری متفاوت ارائه شده است. از ۴ سطح زبری یعنی Rn برابر با ۰، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵ استفاده شده است. نتایج بدست آمده برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۳۰٪ و سطوح زبری متفاوت در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. فرم منحنی تنش برشی در مقابل کرنش برشی برای همه نمونه‌ها تقریبا مشابه است و هیچ کدام نقطه پیک از خود نشان نداده‌اند. در تمامی نمودارها نیز با افزایش تنش نرمال از ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال یک افزایش نسبی در تنش ماکزیمم بدست آمده است.

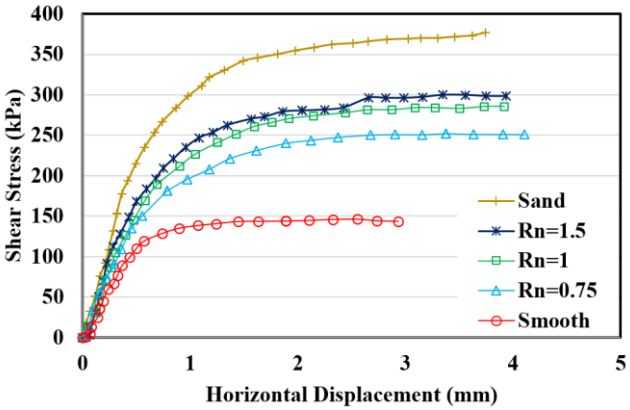


[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

شکل ۸- اثر زبری نسبی سطح فولاد برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۳۰٪ در تنش نرمال ۱۰۰ کیلوپاسکال



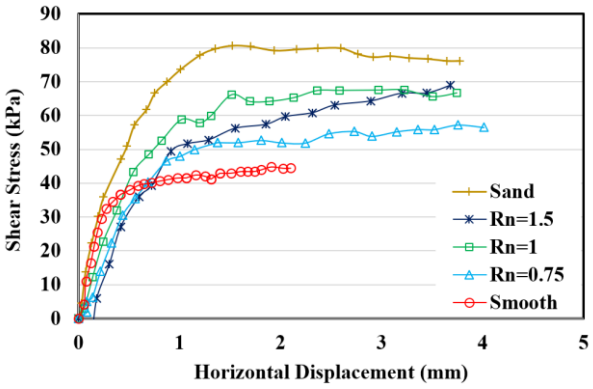
شکل ۹- اثر زبری نسبی سطح فولاد برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۳۰٪ در تنش نرمال ۲۵۰ کیلوپاسکال



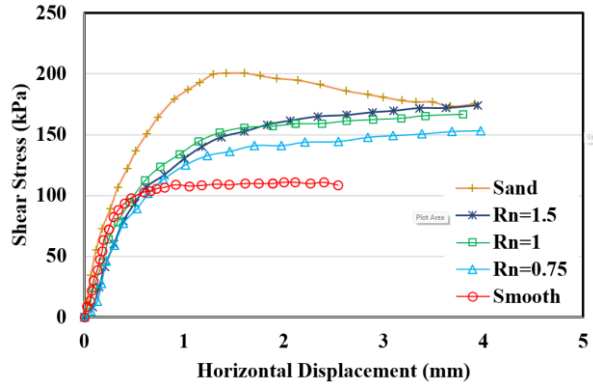
شکل ۱۰- اثر زبری نسبی سطح فولاد برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۳۰٪ در تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال

همانطور که در اینجا مشاهده می‌شود، تمامی نمودارها زیر نمودار مربوط به ماسه خالص قرار دارد. به عبارت دیگر در تمامی نمونه‌های اندرکنشی فولاد و ماسه کربناته، مقاومت برشی بدست آمده کمتر از خود ماسه است. از طرف دیگر، نمونه حاوی صفحه فولادی صاف (زبری نسبی صفر) کمترین مقاومت برشی را بدست آورده است. با افزایش زبری نسبی از ۰ تا ۱/۵، مقاومت برشی نمونه‌ها نیز برای همه مقادیر تنش نرمال افزایش یافته است. اختلاف بین مقاومت برشی حالت صاف با زبری نسبی ۰/۷۵ به نسبت سایر نمودارها بیشتر است و بعد از آن با افزایش بیشتر زبری نسبی افزایش کمی در نمودارها مشاهده شده است. بعنوان مثال، در تنش نرمال ۱۰۰ کیلوپاسکال، با افزایش زبری نسبی از صفر تا ۰/۷۵، مقدار مقاومت برشی از ۳۰ کیلوپاسکال به ۵۰ کیلوپاسکال افزایش یافته است. درحالیکه با افزایش زبری نسبی از ۰/۷۵ تا ۱، مقدار آن از ۵۰ کیلوپاسکال به ۵۸ کیلوپاسکال افزایش یافته است. اختلاف بین مقاومت برشی بدست آمده برای تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال محسوس‌تر از اختلاف بدست آمده برای تنش نرمال ۱۰۰ کیلوپاسکال است که در واقع اهمیت زبری نسبی را در تنش‌های نرمال بالاتر نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر دانسیته نسبی ماسه کربناته بر روی اندرکنش ماسه و فولاد، آزمایش‌هایی مشابه مرحله قبل در دانسیته نسبی ۹۰٪ انجام شده است. در اینجا نیز افزایش تنش نرمال و زبری نسبی باعث افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها شده است. مقایسه نتایج بدست آمده برای نمونه‌ها با دانسیته نسبی ۹۰٪ و ۳۰٪ نشان می‌دهد که افزایش دانسیته نسبی ماسه باعث افزایش مقاومت برشی شده است. در واقع با افزایش دانسیته نسبی ماسه، درگیری بین ذرات ماسه و خاک افزایش یافته و این امر موجب افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها شده است. برای بررسی دقیق‌تر اثر زبری نسبی در اینجا نیز نتایج برای مقادیر مختلف زبری در تنش‌های نرمال یکسان در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ ارائه شده است. در اینجا نیز برای یک تنش نرمال یکسان، بیشترین مقاومت برشی مربوط به ماسه خالص و کمترین آن مربوط به حالت زبری صفر است. مقایسه نتایج بدست آمده برای دانسیته نسبی ۳۰٪ و ۹۰٪ نشان می‌دهد که با افزایش دانسیته نسبی ماسه اختلاف بین مقاومت برشی برای مقادیر مختلف زبری نسبی مخصوصا در سطوح کرنش‌های بزرگ کمتر شده است.

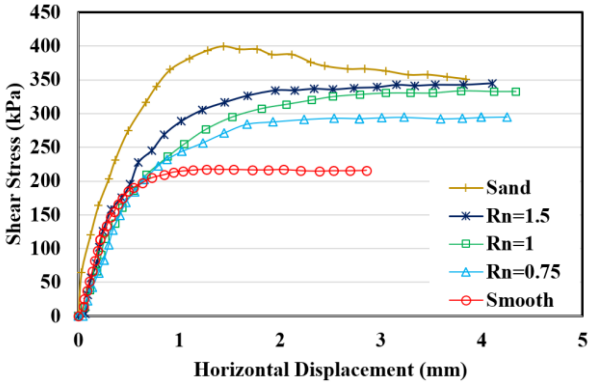


شکل ۱۱- اثر زبری نسبی سطح فولاد برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰٪ در تنش نرمال ۱۰۰ کیلوپاسکال



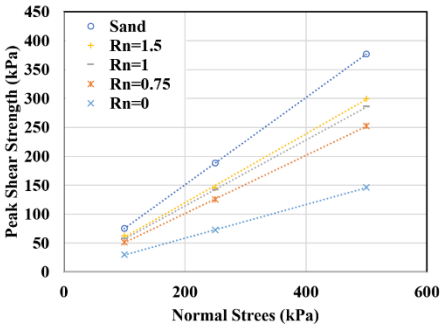
شکل ۱۲- اثر زبری نسبی سطح فولاد برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰٪ در تنش نرمال ۲۵۰ کیلوپاسکال

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

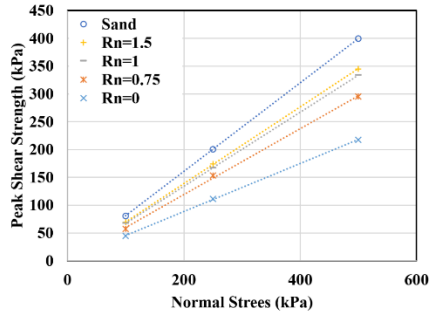


شکل ۱۳- اثر زبری نسبی سطح فولاد برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰٪ در تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال

برای بررسی دقیق‌تر اثر دانسیته نسبی ماسه کربناته و زبری سطح فولاد، پوش گسیختگی متناظر با تنش برشی ماکزیمم در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. افزایش شیب خط به دلیل افزایش زبری نسبی در هر دو گروه از آزمایش‌ها مشاهده می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اثر زبری نسبی در دانسیته کمتر بیش‌تر است و خطوط در دانسیته نسبی کمتر فاصله بیشتری نسبت به هم دارند.



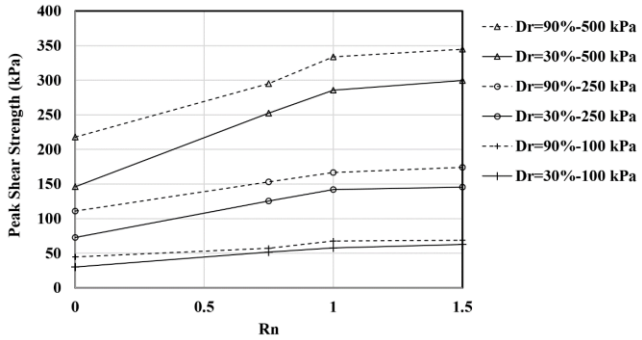
شکل ۱۴- پوش مقاومت برشی متناظر با تنش برشی ماکزیمم برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۳۰٪ و صفحات فولادی با زبری مختلف



شکل ۱۵- پوش مقاومت برشی متناظر با تنش برشی ماکزیمم برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰٪ و صفحات فولادی با زبری مختلف

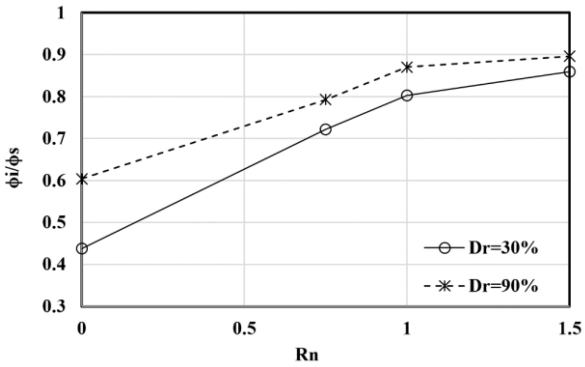
برای مقایسه دقیق‌تر اثر دانسیته نسبی و زبری سطح فولادی، مقادیر مقاومت برشی ماکزیمم نمونه‌ها در مقابل مقدار زبری نسبی در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانطور که در اینجا دیده می‌شود، با افزایش تنش نرمال، اثر زبری نسبی افزایش یافته است و شیب خطوط در تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال از بقیه موارد بیشتر است.

اختلاف نتایج بین نمونه‌ها با دانسیته نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد نیز با افزایش تنش نرمال بیشتر شده است. در همه موارد، افزایش زبری نسبی باعث افزایش مقاومت برشی ماکزیمم شده است، اگر چه مقدار این افزایش تابعی از سطح تنش نرمال اعمالی و دانسیته ماسه کربناته است.



شکل ۱۶- مقادیر مقاومت برشی ماکزیمم برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد به ازای زبری متفاوت سطح فولادی

تغییرات نسبت زاویه اصطکاک در حالت اندرکنش $\emptyset_i$ به زاویه اصطکاک ماسه کربناته خالص در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همانطور که در اینجا دیده می‌شود تمامی مقادیر بدست آمده کمتر از یک است که نشان می‌دهد زاویه اصطکاک در حالت اندرکنش ماسه و فولاد همواره کوچکتر از خود ماسه است. برای یک مقدار زبری نسبی ثابت، نسبت زاویه اصطکاک در حالت دانسیته نسبی ۹۰٪ بیشتر از ۳۰٪ است. نتایج نشان می‌دهد اختلاف بدست آمده برای دو دانسیته نسبی در مقادیر زبری نسبی کوچکتر، بیشتر است نسبت به زمانی که مقدار زبری افزایش می‌یابد.

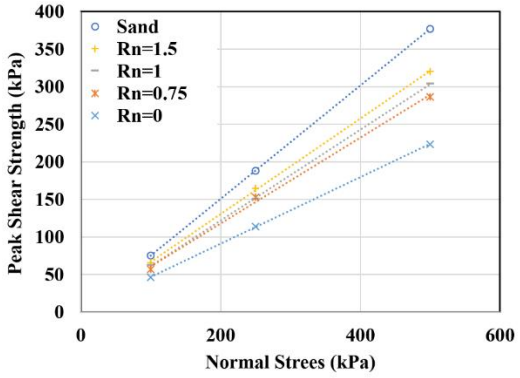


شکل ۱۷- تغییرات نسبت زاویه اصطکاک اندرکنش ماسه کربناته و صفحه فولادی به ماسه کربناته خالص برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد

برای نشان دادن اختلاف اندرکنش فولاد و ماسه کربناته با بتن و ماسه کربناته، در اینجا تعدادی آزمایش بر روی نمونه‌های حاوی ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰٪ و صفحات بتنی انجام شده است. مقدار زبری نسبی صفحات بتنی مشابه صفحات فولادی در نظر گرفته شده است. تنها اختلاف بین این گروه آزمایش‌ها با آزمایش‌های قبلی جنس صفحات است. فرم منحنی تنش-کرنش در آزمایش‌های حاوی صفحات بتنی مشابه نمودارهای بدست آمده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

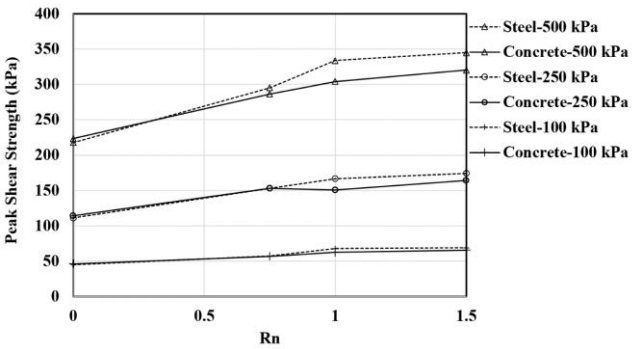
برای صفحات فولادی بوده است. مشابه آزمایش‌های انجام شده بر روی صفحات فولادی در اینجا نیز افزایش زبری نسبی و تنش نرمال باعث افزایش مقاومت برشی ماکزیمم اندرکنش شده است. پوش گسیختگی بدست آمده برای این گروه از آزمایش‌ها در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در اینجا نیز افزایش زبری نسبی باعث افزایش شیب خطوط شده است که مشابه نتایج بدست آمده برای صفحات فولادی است.



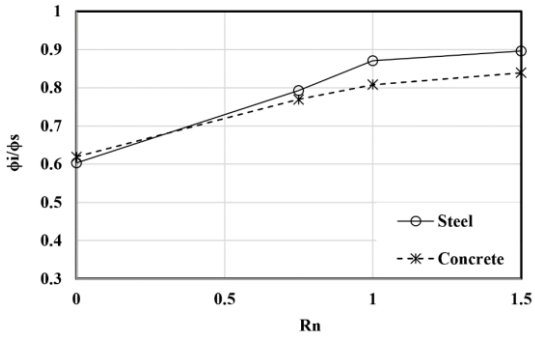
شکل ۱۸- پوش مقاومت برشی متناظر با تنش برشی ماکزیمم برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰٪ و صفحات بتنی با زبری مختلف

کمترین مقاومت برشی نیز برای حالت زبری نسبی صفر و بیشترین آن برای حالت اندرکنش برای زبری نسبی ۱/۵ بدست آمده است. به ازای یک مقدار زبری نسبی ثابت، افزایش تنش نرمال باعث افزایش مقاومت شده است.

برای بررسی دقیق‌تر اثر صفحات فولادی و بتنی، مقادیر مقاومت برشی ماکزیمم برای هر دو صفحات برای تنش‌های نرمال ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۱۹ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این قسمت نشان می‌دهد که به ازای یک تنش نرمال ثابت و مقدار Rn بزرگتر از ۰/۷۵، مقدار مقاومت برشی بسیج شده بین ماسه و صفحه فولادی بیشتر از مقدار متناظر برای ماسه و صفحه بتنی است. در مقادیر Rn برابر با ۰ و ۰/۷۵ اختلاف بین نتایج صفحه فولادی و بتنی کم است. از طرف دیگر با افزایش تنش نرمال، اختلاف بین نتایج بدست آمده برای Rn برابر با ۱ و ۱/۵، بیشتر شده است.



شکل ۱۹- مقادیر مقاومت برشی ماکزیمم برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰ درصد به ازای زبری متفاوت سطح فولادی و بتنی



شکل ۲۰- تغییرات نسبت زاویه اصطکاک اندرکنش ماسه کربناته و صفحه فولادی و بتنی به ماسه کربناته خالص برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰ درصد

تغییرات نسبت زاویه اصطکاک اندرکنش ماسه کربناته و صفحه فولادی و بتنی به ماسه کربناته خالص برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰ درصد در شکل ۲۰ نشان داده شده است. در مقدار Rn برابر با صفر، زاویه اصطکاک بین سطح بتن و ماسه کربناته کمی بیشتر از مقدار متناظر آن برای سطح بین ماسه کربناته و فولاد است. دلیل این اختلاف می‌تواند به ناصاف بودن سطح بتن نسبت به سطح فولاد در حالت مقدار زبری صفر اشاره کرد. برای مقادیر Rn بزرگتر از صفر، مقدار زاویه اصطکاک برای صفحات فولادی بیشتر از صفحات بتنی است. در واقع تیزگوشه بودن فولاد در مرزهای برش خورده نسبت به بتن باعث این اتفاق شده است. بیشترین اختلاف برای زاویه اصطکاک نسبی در ماکزیمم مقدار Rn اتفاق افتاده است.

قابل ذکر است ثبت رفتارهای تغییر حجمی نمونه‌ها در طول آزمایش‌های برش مستقیم برای نمونه های ماسه خالص و همچنین در حالت اندرکنش با صحفات فولادی و بتنی بصورت کلی نشان از رفتار اتساعی در حالت سست (D_r = 30%) و رفتار انقباضی در حالت متراکم (D_r = 90%) را نشان می‌دهد.

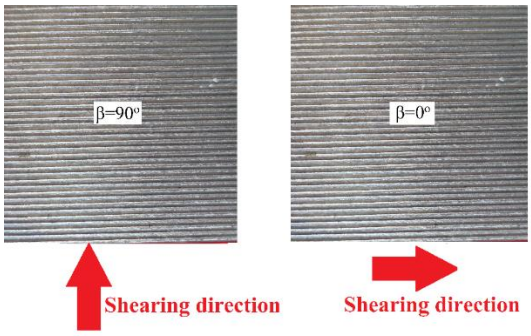
همانطور که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، در آزمایش‌های اندرکنش، لبه‌های برش داده شده در صفحات بتنی بعد از آزمایش دچار شکست شده‌اند. اگر چه در صفحات فولادی این اتفاق نیفتاده است.



شکل ۲۱- تخریب لبه‌های برش خورده نمونه بتنی بعد از آزمایش

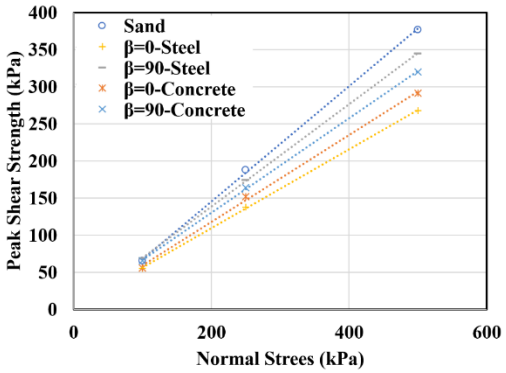
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

در این بخش، دو سری آزمایش‌های برش مستقیم برای اندرکنش فولاد و بتن با ماسه کربناته در جهت بررسی اثر جهت برش انجام شده است. همانطور که در شکل ۲۲ نشان داده شده است، در این بخش مقدار زاویه بین جهت برش و شیارها (β) صفر درجه در نظر گرفته شده است. در تمامی آزمایش‌های قبلی، مقدار این زاویه ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است.



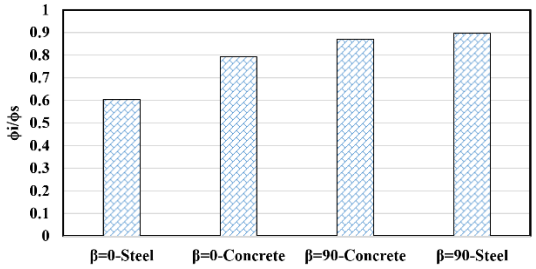
شکل ۲۲- تعریف زاویه برش

در تمامی موارد مقاومت برشی ماکزیمم در حالت زاویه برش ۹۰ درجه بیشتر از حالت زاویه برش صفر درجه است. این اختلاف بین نتایج برای زوایای صفر و نود درجه با افزایش تنش نرمال بیشتر شده است. اثر زاویه برش بر روی پوش مقاومت برشی برای صفحات بتنی و فولادی در شکل ۲۳ نشان داده شده است. همانطور که در اینجا مشاهده می‌شود، افزایش زاویه برش از صفر به ۹۰ درجه باعث افزایش شیب خط شده است. در تمامی موارد پوش گسیختگی اندرکنش زیر پوش گسیختگی مربوط به ماسه خالص قرار گرفته است.



شکل ۲۳- پوش مقاومت برشی متناظر با تنش برشی ماکزیمم برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰٪ و صفحات بتنی و فولادی با Rn=1.5 در حالت زاویه برش صفر و نود درجه

پوش گسیختگی مربوط به زاویه برش صفر درجه نیز زیر پوش گسیختگی مربوط به زاویه برش ۹۰ درجه قرار گرفته است. اثر زاویه برش بر روی پوش گسیختگی برای صفحات فولادی بیشتر از صفحات بتنی است.

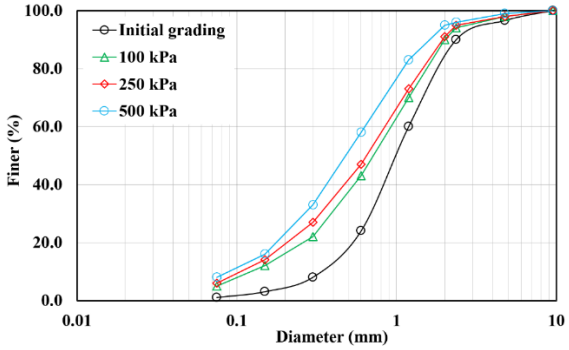


شکل ۲۴- تغییرات نسبت زاویه اصطکاک اندرکنش ماسه کربناته و صفحه فولادی و بتنی با توجه به زاویه برش به ماسه کربناته خالص برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰ درصد

تغییرات نسبت زاویه اصطکاک برای آزمایش‌های انجام شده در این بخش در شکل ۲۴ نشان داده شده است. همانطور که در اینجا مشاهده می شود، همواره این نسبت کوچکتر از یک است. کمترین مقدار این نسبت برای صفحات فولادی با زاویه برش صفر درجه و بیشترین مقدار این نسبت برای صفحات فولادی با زاویه برش ۹۰ درجه بدست آمده است. با افزایش تنش نرمال اثر زاویه برش و جنس صفحات بر روی مقدار مقاومت برشی بدست آمده بیشتر شده است و در تمامی تنش‌های نرمال اعمال شده، صفحات فولادی با زاویه برش ۹۰ درجه بیشترین مقاومت را نشان داده است.

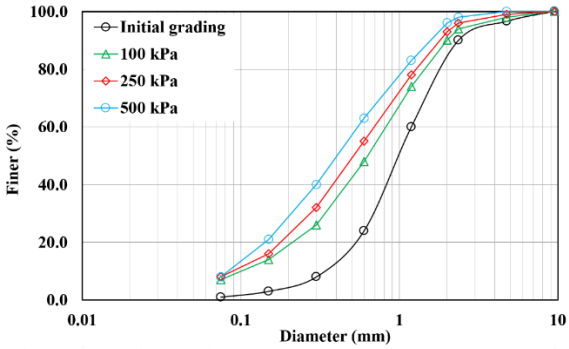
یکی از مشکلات اساسی در پروژه‌های عمرانی، خرد شوندگی بالای ماسه کربناته در زمان اعمال تنش‌های نرمال و برشی است [39–44]. در این پژوهش در انتهای برخی از آزمایش‌های انجام شده بر روی ماسه کربناته، آزمایش مجدد دانه‌بندی با الک انجام شده است. از آنجا که حجم خاک مورد آزمایش مخصوصا در حالت اندرکنشی محدود بوده، برخی از آزمایش‌ها سه بار تکرار شده تا بتوان حجم معقولی از خاک بعد از آزمایش جهت انجام مجدد آزمایش دانه‌بندی بدست آید.

برای آزمایش‌های ماسه کربناته خالص در دو دانسیته نسبی ۳۰٪ و ۹۰٪ در تنش‌های نرمال ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال، منحنی دانه‌بندی مجدد در شکل ۲۵ و ۲۶ ارائه شده است. برای بررسی دقیق‌تر میزان خردشدگی، منحنی دانه‌بندی اولیه یعنی قبل از آزمایش هم ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد افزایش تنش نرمال باعث افزایش خردشدگی در ماسه شده است.



شکل ۲۵- منحنی دانه‌بندی مجدد برای ماسه کربناته در دانسیته نسبی ۳۰٪

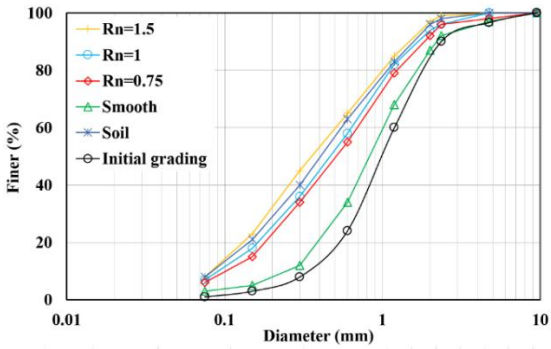
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]



شکل ۲۶- منحنی دانه‌بندی مجدد برای ماسه کربناته در دانسیته نسبی ٪۹۰

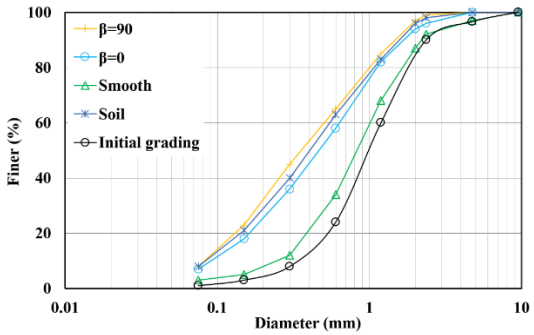
مقایسه نتایج بدست آمده در دانسیته نسبی ۳۰٪ و ۹۰٪ نشان می‌دهد که افزایش دانسیته نسبی اولیه نمونه‌ها نیز باعث افزایش خرد شدگی شده است. برای مثال در فشار همه جانبه ۵۰۰ کیلو پاسکال ذرات کوچکتر از ۰/۶ میلی متر در دانسیته نسبی ۹۰٪، نزدیک به ۶۳٪ و برای نمونه‌ها با دانسیته نسبی ۳۰٪ نزدیک به ۵۸٪ است.

شکل ۲۷ منحنی دانه‌بندی مجدد ماسه کربناته بعد از آزمایش‌های اندرکنش ماسه وفولاد برای مقادیر زبری متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که در زیر نویس شکل نیز اشاره شده است، این آزمایش‌ها برای حالت β برابر با ۹۰ درجه وتنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال است. از آنجاکه در نمونه‌های اندرکنشی ماسه و بتن بعد از آزمایش، مقداری از لبه‌های بتن تخریب شده، بدست آوردن مقدار دقیق خردشدگی در این آزمایش‌ها امکان پذیر نبوده است. بنا به دلیل ذکر شده، آزمایش دانه‌بندی مجدد فقط برای آزمایش های اندرکنشی ماسه کربناته و فولاد انجام شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، افزایش زبری نسبی در صفحات فولادی باعث افزایش خردشدگی در ماسه کربناته شده است. در حالت سطح صاف مقدار خردشدگی خیلی کم است ولی در حالت زبری بیش از صفر (یعنی مقدار Rn برابر با ۰/۷۵، ۱ و ۱/۵) مقدار آن قابل توجه است. نکته جالب بدست آمده در این بخش این است که در حالت مقدار Rn برابر با ۱/۵، مقدار خردشوندگی از نمونه ماسه کربناته خالص بیشتر شده است. در واقع تیزگوشگی بالای سطح فولاد باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در خردشوندگی شده است.



شکل ۲۷- منحنی دانه‌بندی مجدد برای حالت اندرکنش ماسه کربناته و فولاد در دانسیته نسبی ٪۹۰ برای حالت $\beta=90^o$ و تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال

برای بررسی اثر زاویه برش (β) بر روی میزان خردشوندگی ماسه کربناته در آزمایش‌های اندرکنشی ماسه و فولاد در تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال، آزمایش دانه‌بندی مجدد انجام شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش دانه‌بندی مجدد در شکل ۲۸ ارائه شده است. مقدار Rn برای زاویه برش صفر و ۹۰ درجه در اینجا برابر با ۱/۵ است. همانطور که در اینجا مشاهده می‌شود، میزان خردشوندگی در حالت زاویه برش ۹۰ درجه بیشتر از صفر درجه است. مقدار خردشوندگی برای زاویه برش صفر درجه نیز بیشتر از حالت سطح صاف و کمتر از ماسه کربناته خالص است. در واقع در حالت زاویه برش ۹۰ درجه به دلیل حرکت دانه‌ها در جهت عمود بر جهت شیارها میزان خردشدگی بیشتر از حالت زاویه برش صفر درجه است. قابل ذکر است که خردشدگی ماسه کربناته در بارگذاری‌های برشی باعث می‌شود تا زاویه اصطکاک آن کاهش یابد و در نتیجه میزان مقاومت برشی آن نسبت به حالت قبل از خردشدگی کاسته می‌شود.



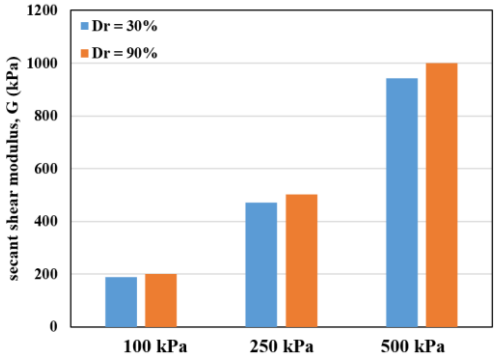
شکل ۲۸- منحنی دانه‌بندی مجدد برای حالت اندرکنش ماسه کربناته و فولاد در دانسیته نسبی ٪۹۰ و تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال

مدول برشی سکانتی یکی از پارامترهای مهم در زمینه مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک است که به ما اطلاعات ارزشمندی از رفتار خاک در شرایط برشی فراهم می‌کند. این پارامتر، توانایی خاک در انتقال تنش‌های برشی و جذب انرژی در شرایط اندک تغییرات شکل را نمایان می‌سازد. در محاسبات طراحی سازه‌ها، ارزیابی پایداری سواحل، تحلیل لرزه‌ای، و سایر زمینه‌های مهندسی، مدول برشی سکانتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. این پارامتر نقش کلیدی در تخمین تغییرات حجمی و شکل‌پذیری خاک در پاسخ به بارگذاری‌های دینامیکی نیز ایفا می‌کند. از اطلاعات دقیق در مورد مدول برشی سکانتی می‌توان بهبود در طراحی‌ها، افزایش ایمنی سازه‌ها، و بهینه‌سازی عملکرد خاک در شرایط مختلف حاصل کرد. یکی از روابط تجربی که برای تخمین مدول برشی سکانتی از طریق مقاومت برشی در ژئوتکنیک استفاده می‌شود بصورت زیر است [45, 46]:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

$$G = 2.5 \times Su \quad (1)$$

که در اینجا G، مدول برشی سکانتی و Su مقاومت برشی نمونه است. در این قسمت از مقاله، تغییرات این پارامتر با استفاده از رابطه تجربی ارائه شده در رابطه (۱) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در شکل ۲۹ ارائه شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، افزایش تنش نرمال و دانسیته نسبی باعث افزایش مدول برشی سکانتی در ماسه کربناته شده است. همانطور که نتایج آزمایش‌های اندرکنش نشان دادند، مقامت برشی بسیج شده در حالت اندرکنش تابعی از مقاومت برشی خاک است. از آنجاکه مدول برشی سکانتی رابطه مستقیمی با مقاومت برشی خاک دارد می‌توان از این پارامتر نیز جهت تخمین مقاومت برشی بسیج شده در حالت اندرکنش استفاده کرد.



شکل ۲۹- تغییرات مدول برشی سکانتی ماسه کربناته

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اندرکنش خاک ماسه کربناته با شمع فولادی و بتنی بررسی شده است. تاثیر درجه زبری سطح فولاد و بتن و زاویه آن با راستای برش، سطح تنش اعمال شده، دمای انجماد، درصد رطوبت اولیه و تراکم نسبی نمونه بر پارامترهای مقاومت برشی سطح اندرکنش با استفاده از آزمایش برش مستقیم بررسی شد. نتایج به دست آمده از این مطالعه در ادامه بیان شده است.

- در تمامی نمونه‌ها مقاومت اندرکنش فولاد و بتن با ماسه کربناته با درجه زبری متفاوت، کمتر از مقاومت برشی خود ماسه است. در سطح تنش نرمال یکسان، بیشترین مقاومت برشی مربوط به ماسه خالص و کمترین آن مربوط به حالت زبری صفر است. با افزایش زبری نسبی مقاومت برش در سطح اندرکنش افزایش می‌یابد. تغییرات شیب پوش گسیختگی بدلیل تغییر زبری صفحات فولادی در ماسه کربناته تقریبا روند مشابهی دارد.
- با افزایش دانسیته نسبی ماسه، اختلاف بین مقاومت برشی برای مقادیر مختلف زبری نسبی مخصوصا در سطوح کرنش‌های بزرگ کمتر می شود. افزایش زبری نسبی در دانسیته ۳۰٪، بیش تر از نمونه‌های با دانسیته ۹۰٪ است به طوری که پوش مقاومت برشی برای نمونه‌ها با دانسیته ۹۰٪ به هم نزدیک‌تر است.
- با افزایش تنش نرمال، اثر زبری نسبی افزایش می‌یابد و شیب خطوط در تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال از بقیه موارد بیشتر است. اختلاف مقاومت برشی سطح اندرکنش بین نمونه‌های با دانسیته نسبی ۳۰٪ و نمونه‌های ۹۰٪ نیز با افزایش تنش نرمال بیشتر است. در همه موارد، افزایش زبری نسبی باعث افزایش مقاومت برشی ماکزیمم شده است، اگر چه مقدار این افزایش تابعی از سطح تنش نرمال اعمالی و دانسیته ماسه است.
- در سطوح تنش‌های نرمال ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال در مقادیر زبری نسبی بزرگتر از ۰/۷۵ و در سطح تنش برابر، مقدار مقاومت برشی بسیج شده بین ماسه و صفحه فولادی بیشتر از مقدار متناظر برای ماسه و صفحه بتنی است. این اختلاف در درجه زبری ۰ تا ۰/۷۵ ناچیز است. از سوی دیگر افزایش تنش نرمال این اختلاف بین نتایج بدست آمده را برای زبری نسبی برابر با ۱ و ۱/۵، بیشتر می‌کند.
- در تمامی موارد مقاومت برشی ماکزیمم در حالتی که راستای برش عمود بر شیارهای صفحه بتنی یا فولادی است بزرگتر است. این اختلاف در مقاومت برش در سطح اندرکنش با افزایش تنش نرمال بیشتر شده است.
- خرد شدگی خاک در نمونه‌های ماسه کربناته در دانسیته نسبی ۹۰٪ بیشتر است. آزمایش دانه‌بندی مجدد نشان می‌دهد که افزایش زبری نسبی در صفحه فولادی باعث افزایش خرد شدگی در ماسه کربناته خواهد شد. در درجه زبری برابر با ۱/۵، مقدار خرد شدگی خاک از نمونه ماسه کربناته خالص بیشتر است. در واقع تیزگو شگی بالای سطح فولاد باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در خردشوندگی شده است. در حالت زاویه برش ۹۰ درجه به دلیل حرکت دانه‌ها در جهت عمود بر جهت شیارها، میزان خردشدگی بیشتر از حالت زاویه برش صفر درجه است.

۶ – مراجع

1. Mohammad Alinejad R, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS (2021) Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading. Arabian Journal of Geosciences 14:1–12. https://doi.org/10.1007/s12517-021-09123-7

2. Bian X, Liang Y, Zhao C, et al (2020) Centrifuge testing and numerical modeling of single pile and long-pile groups adjacent to surcharge loads in silt soil. Transportation Geotechnics 25:100399. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100399

3. Malik AA, Kuwano J, Tachibana S, Maejima T (2017) End bearing capacity comparison of

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

13. Al-Mhaidib AI (2005) Loading rate effects on pile groups in clay. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 10 E:

14. Tomlinson M, Woodward J (2007) Pile Design and Construction Practice. In: Pile Design and Construction Practice. https://www.routledge.com/Pile-Design-and-Construction-Practice/Tomlinson-Woodward/p/book/9780367659011. Accessed 13 Apr 2021

15. Alinejad RM, Bayat M, Nadi B, Pakbaz MS (2023) Experimental Study of Axially Loaded Pile Group Near a Sloping Ground. Period Polytech Civil Eng. https://doi.org/10.3311/PPci.18334

16. Aldaeef AA, Rayhani MT (2019) Interface shear strength characteristics of steel piles in frozen clay under varying exposure temperature. Soils and Foundations 59:2110–2124. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.003

17. Aldaeef AA, Rayhani MT (2021) Pile-soil interface characteristics in ice-poor frozen ground under varying exposure temperature. Cold Regions Science and Technology 191:103377. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103377

18. Su LJ, Zhou WH, Chen W Bin, Jie X (2018) Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation 122:339–346. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.003

19. Noroozi AG, Ajalloeian R, Bayat M (2022) Effect of FTC on the interface between soil materials and asphalt concrete using a direct shear test. Case Studies in Construction Materials 17:e01632. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01632

20. Noroozi AG, Ajalloeian R, Bayat M (2022) Experimental study of the role of interface element in earth dams with asphalt concrete core - Case study: Mijran dam. Case Studies in Construction Materials 16:e01004. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01004

21. Janipour AK, Mousivand M, Bayat M (2022) Study of interface shear strength between sand and concrete. Arab J Geosci 15:172. https://doi.org/10.1007/s12517-021-09394-0

screw pile with straight pipe pile under similar ground conditions. Acta Geotechnica 12:415–428. https://doi.org/10.1007/s11440-016-0482-4

4. Haghbin M, Ghazavi M (2016) Seismic Bearing Capacity of Strip Footings on Pile-Stabilized Slopes. Civil Engineering Infrastructures Journal 49:111–126. https://doi.org/10.7508/ceij.2016.01.008

5. 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:e02014. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02014

6. 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 J Civ Eng. https://doi.org/10.1007/s12205-023-0695-7

7. Choo H, Kwon M, Touiti L, Jung YH (2020) Creep of calcareous sand in Tunisia: effect of particle breakage at low stress level. International Journal of Geo-Engineering 11:. https://doi.org/10.1186/s40703-020-00123-2

8. Wang Z (2010) Soil creep behavior: laboratory testing and numerical modelling. University of Calgary

9. Ramadan MI, Meguid M (2020) Behavior of cantilever secant pile wall supporting excavation in sandy soil considering pile-pile interaction. Arabian Journal of Geosciences 13:1–13. https://doi.org/10.1007/s12517-020-05483-8

10. Reddy ES, Chapman DN, Sastry VVRN (2000) Direct Shear Interface Test for Shaft Capacity of Piles in Sand. Geotechnical Testing Journal 23:199–205. https://doi.org/10.1520/gtj11044j

11. Chen RP, Zhou WH, Chen YM (2009) Influences of soil consolidation and pile load on the development of negative skin friction of a pile. Computers and Geotechnics 36:1265–1271. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.05.011

12. Deb P, Pal SK (2021) Interaction behavior and load sharing pattern of piled raft using nonlinear regression and LM algorithm-based artificial neural network. Frontiers of Structural and Civil Engineering 15:1181–1198. https://doi.org/10.1007/s11709-021-0744-6

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

testing in Calcareous soils. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference 1973-April:II677–II692. https://doi.org/10.4043/1894-ms

31. Dyson GJ, Randolph MF (2001) Monotonic Lateral Loading of Piles in Calcareous Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127:346–352. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:4(346)

32. Tabucanon JT, Airey DW, Poulos HG (1995) Pile skin friction in sands from constant normal stiffness tests. Geotechnical Testing Journal 18:350–364. https://doi.org/10.1520/gtj11004j

33. Lehane BM, Schneider JA, Lim JK, Mortara G (2012) Shaft Friction from Instrumented Displacement Piles in an Uncemented Calcareous Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 138:1357–1368. https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000712

34. Jiang H, Wang R, Lü YH, Meng QS (2010) Test study of model pile in calcareous sands. Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics 31:780–784

35. Nauroy JF, LeTirant P (1985) Driven piles and drilled and grouted piles in calcareous sands. Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference 1985-May:83–91. https://doi.org/10.4043/4850-ms

36. McDowell GR, Bolton MD (2000) Effect of particle size distribution on pile tip resistance in calcareous sand in the geotechnical centrifuge. Granular Matter 2:179–187. https://doi.org/10.1007/PL00010913

37. Ismael NF (1989) Skin Friction Of Driven Piles In Calcareous Sands. Journal of Geotechnical Engineering 115:135–139. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(135)

38. Ismael NF, Al-Sanad HA (1986) Uplift capacity of bored piles in calcareous soils. Journal of Geotechnical Engineering 112:928–940. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:10(928)

39. Cui MJ, Zheng JJ, Chu J, et al (2021) Bio-mediated calcium carbonate precipitation and its effect on the shear behaviour of calcareous sand. Acta Geotechnica 16:1377–1389. https://doi.org/10.1007/s11440-020-01099-0

22. Tang L, Du Y, Liu L, et al (2021) Experimental study of the frozen soil–structure interface shear strength deterioration mechanism during thawing. Arabian Journal of Geosciences 14:. https://doi.org/10.1007/s12517-021-08673-0

23. Zhao L, Yang P, Wang JG, Zhang LC (2014) Cyclic direct shear behaviors of frozen soil-structure interface under constant normal stiffness condition. Cold Regions Science and Technology 102:52–62. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.03.001

24. Chen X, Zhang J, Xiao Y, Li J (2015) Effect of roughness on shear behavior of red clay-concrete interface in large-scale direct shear tests. Canadian Geotechnical Journal 52:1122–1135. https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0399

25. Wang H-L, Zhou W-H, Yin Z-Y, Jie X-X (2019) Effect of Grain Size Distribution of Sandy Soil on Shearing Behaviors at Soil–Structure Interface. Journal of Materials in Civil Engineering 31:04019238. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002880

26. Yang P, Xue SB, Song L, Duan M shi (2018) Interface shear characteristics of dredger fill and concrete using large size direct shear test. International Journal of Geo-Engineering 9:. https://doi.org/10.1186/s40703-018-0081-3

27. Hu L, Pu J (2004) Testing and Modeling of Soil-Structure Interface. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130:851–860. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:8(851)

28. Jotisankasa A, Rurgchaisri N (2018) Shear strength of interfaces between unsaturated soils and composite geotextile with polyester yarn reinforcement. Geotextiles and Geomembranes 46:338–353. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.12.003

29. Di Donna A, Ferrari A, Laloui L (2016) Experimental investigations of the soil–concrete interface: Physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures. Canadian Geotechnical Journal 53:659–672. https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0294

30. Angemeer J, Carlson E, Klick JH (1978) Techniques and results of offshore pile load

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]

40. Donohue S, O'Sullivan C, Long M (2009) Particle breakage during cyclic triaxial loading of a carbonate sand. Geotechnique 59:477–482. https://doi.org/10.1680/geot.2008.T.003

41. Jafarian Y, Javdanian H (2020) Dynamic Properties of Calcareous Sand from the Persian Gulf in Comparison with Siliceous Sands Database. International Journal of Civil Engineering 18:245–249. https://doi.org/10.1007/s40999-019-00402-9

42. Spagnoli G, Doherty P, Wu D, Doherty M (2015) Some mineralogical and geotechnical properties of carbonate and silica sands in relation to a novel mixed-in-place pile. Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, OMC 2015

43. Kou H lei, Diao W zhou, Zhang W chun, et al (2021) Experimental Study of Interface Shearing between Calcareous Sand and Steel Plate Considering Surface Roughness and Particle Size. Applied Ocean Research 107:102490. https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102490

44. He SH, Shan HF, Xia TD, et al (2021) The effect of temperature on the drained shear behavior of calcareous sand. Acta Geotechnica 16:613–633. https://doi.org/10.1007/s11440-020-01030-7

45. Das BM (2021) Principles of geotechnical engineering. Cengage learning

46. Bowles JE (1988) Foundation analysis and design

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.5.5]

[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.59]