بررسی آزمایشگاهی مقاومت برشی ایجاد شده بین ماسه کربناته با شمعهای فولادی و بتنی با استفاده از آزمایش برش مستقیم ابوالقاسم احمدی⁽، محمد امین نوذری^{۲٬۳}، میثم بیات^٤، احسان دلاوری[°]

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران <u>faraznam_company@yahoo.com</u>

- ^۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران <u>ma.nozari@iau.ac</u>
 - ^۳ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ماسال، دانشگاه آزاد اسلامی، ماسال، ایران <u>ma.nozari@iau.ac</u>
- ^{*} استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، <u>bayat.m@pci.iaun.ac.ir</u>
- ^۵ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران e <u>delavari@pci.iaun.ac.ir</u>

چکیدہ	اطلاعات مقاله
 در این مقاله به منظور بررسی اندرکنش ماسه کربناته و شمع، مجموعهای از آزمایشهای برش مست	ناریخچه مقاله:
انجام شده است. برای رسیدن به این هدف، شمعها نیز به دوصورت فلزی و بتنی در نظر گرفته شده اد	تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸
مصالح نماینده شمع در جعبه برش پایین و مصالح خاکی در جعبه برش بالا قرار گرفته است. متغیره	تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۶
اصلی این پژوهش عبارت است از مصالح شمع (فولادی و بتنی)، سطح تنش نرمال، دانسیته نسبی خ	تاريخ انتشار مقاله: ۱۲۰۱/۱۱/۰۶
زبری سطح شمع و زاویه سطح برش نسبت به شیارهای ایجاد شده بر روی مصالح شمع. نتایج بدست آ	كلمات كليدى:
نشان میدهد که پارامترهای مقاومت برشی بدست آمده در مرز بین شمع و خاک تابعی از عوامل مخ	اندركنش
همچون خصوصیات ژئوتکنیکی خاک و زبری سطح شمع است. به طوریکه با افزایش دانسیته نسبی خ	ماسه كربناته
و افزایش زبری سطح شمع، مقدار زاویه اصطکاک بسیج شده در سطح بین شمع و خاک افزایش می	شمع
با یک سطح زبری یکسان، مقدار زاویه اصطکاک بین شمع و خاک در نمونههای فولادی بیشتر از نمونه	برش مستقيم
بتنی است. نتایج آزمایشها نشان میدهد مقاومت برشی بین صفحات و ماسه در حالت جهت برش ع	
بر جهت شیارهای صفحات بیشتر است. خردشدگی در ماسه کربناته بعد از اعمال تنش برشی در انتر	
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 Ahmadi¹, Mohammad Amin Nozari^{2,3*}, Meysam Bayat³, Ehsan Delavari³

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

Interaction Calcareous sand Pile Direct shear 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 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.

۱ – مقدمه

بهسازی خاک شامل روشهای مختلف تغییر خصوصیات خاک بوده که نهایتاً افزایش مقاومت برشــی خاک، کاهش تغییرات حجمی و تأمین رفتار خاک را به همراه دارد. خاک های مسیئلهدار مثل خاکهای واگرا، روانگرا، رومبنده، متورمشونده، خاکهای نرم و یا خاکهایی که دچار تغییر شــکل زیاد هســتند که دارای پایداری حجمی پایین و مقاومت کم بوده و زمانی که تحت بار گذاریهای شدیدتری قرار می گیرند، بافت داخلی بهم ریخته و نشست زیادی می کند. ماسه کربناته علی رغم مقاومت برشی بالا، در زمان بار گذاری معمولا دچار خرد شدگی می شود که این پدیده با تغییر شکل زیاد همراه است. برای جلوگیری و کاهش نشیست میتوان از انواع روشهای مختلف بهسازی استفاده نمود. بکارگیری یک روش خاص بستگی به عوامل اقتصادی، کارایی در خاک موجود، د ستر سی به تجهیزات و مصالح و مهارت ها و اثر گذاری 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 پایین تر در صورت وجود لايه هاي سطحي ضعيف 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 ماسیه کربناته به نگرانی مهمی در مهندسی ژئوتکنیک تبدیل شده است. با اجرای ساختمانها، خاکریزها، جادهها و… اغلب نشستهای قابل توجهی ایجاد می شود. این نشستها را مخصوصاً زمانی می توان خیلی مهم دانست که سازه سینگین 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 می گیرد، با گذشت زمان تغییر شیکلهای را تجربه می کند که خزش نامیده می شود. این تغییر شکلهای وابسته به زمان، به خصوص زمانی که تغییر شکلهای درازمدت مطرح می شود، در مهندسی ژئوتکنیک اهمیت زیادی دارند. این تغییر شیکلها، شامل نشست سازه (متقارن یا غیر متقارن) بر روی زمینهای تراکمپذیر، حرکات شیبهای طبیعی و یا گودبرداری شده، فشرده شدن زمینهای نرم اطراف تونل و... میباشد [8,7]. یکی از راه حلهای 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[41–9] . گاهی لایمهای عمیق سخت ر از لایه های سطحی است و در این حالت شمع وظیفه انتقال بار از لایه های سطحی به لایه های محیق 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 یایداری 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 می گیرند. این شمعها می توانند 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 می شود، اهمیت دارد. از بتن مقاوم در برابر آب شور در سازههای دریایی مانند موانع ساحلی، دیوارهای دریاچه، و پایههای توربینهای بادی استفاده می شود. این بتن ها 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 می شود و امکان اجرای پروژههای پایدار در مناطق ساحلی و دریایی فراهم می شود. همچنین، توربینهای بادی که بر روی پایههای شمعی بتنی نصب میشوند، به

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

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 ا صطکاک ایجاد شده است. میزان ا صطکاک 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 ا صطکاک بین شمع و خاک تاثیرگذار هستند. زاویه ا صطکاک بین شمع و خاک پارامتر مهمی است که معمولا مقدار دقیق آن در محا سبات در نظر گرفته نمی شود و به صورت ضریبی از اصطکاک خاک برای سهولت در محاسبات در نظر گرفته می شود , 9, 10 (یا رامترهای 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 دا شته اند. اکثر این مطالعات با استفاده از دستگاه برش مستقیم بوده است [21–18]. 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 می گیرد [28–22, 17]. 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 می توان 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 ا صطکاک ایجاد شده بین دو مصالح داشته است.

دیدونا و همکاران [29] جهت برر سی 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 در جه 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 شـمعها بر اسـاس معادلات معمول و روشهای معمول در خاکهای ماسه سیلیسی با مقادیر واقعی متفاوت است و بیشـتر از مقادیر واقعی ظرفیت باربری به دسـت میآید. برخی از نتایج این پژوه شگران 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 ر سیدند 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 در زمان افزایش سختی و جابجاییهای بزرگتر افزایش مییابد. لهان و همکاران [33] با استفاده از آزمایشهای صحرایی رفتار شمعها را در خاکهای ما سهای کربناته را برر سی کردند. همچنین تعدادی آزمایش برش مستقیم استاتیکی و سیکلیک بر روی نمونههای بازسازی شده از همان خاک انجام شد. نتایج این پژوهش برا ساس مقادیر ثبت شده سن سورها نشان میدهد که تنشهای اطراف شمع در محل خیلی پایین است و حدود ۲ تا ۵ کیلو پاسکال

مىدھد.

جیانگ و همکاران [34] با استفاده از یک مدل فیزیکی ظرفیت باربری و تغییر شکل 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 این پژوهش نشان میدهد که اصطکاک جانبی در شمعهای با این پژوهش نشان میدهد که اصطکاک جانبی در شمعهای با حالت حدود ۲۰ تا ۲۷ در صد در نمونه مشابه در ما سه سیلیسی حالت حدود ۲۰ تا ۲۷ در صد در نمونه م شابه در ما سه سیلیسی است. ایشان دلیل کاهش اصطکاک جانبی در خاکهای ماسه کربناته را به دلیل خرد شدن خاکهای ما سه 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

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 ما سه 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.

اسـماعیل [37] با اسـتفاده از آزمایش در محل اصـطکاک جانبی شمعهای بتنی کوبشی در خاکهای ما سه کربناته متراکم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش با حالت های مشـابه در خاکهای ماسه سیلیسی مقایسه شده است. نتایج نشان میدهد که اصـطکاک جانبی شـمعهای کوبشـی در خاکهای ماسـه کربناته متراکم کمتر از نمونههای مشابه در ماسـههای سیلیسی است. اسـماعیل و الثناد [38] با استفاده از آزمایشهای بزرگ مقیاس در محل مقاومت بیرون کشی شمعهای حفاری شده در خاکهای ماسه کربناته متراکم را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان میدهد که اصطکاک جانبی شـمعها 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 شـمعها در خاکهای ماسیه 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 م صالح 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 می کند تا تأثیر نوع مصالح شمع بر اندرکنش با ما سه 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 ا ست، 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 درون ذرهای زیادی دارد و سطوح ذرات کربناته ناهموار بوده که باعث افزایش اصطکاک بین ذرات می شود. 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 می دهد که غالب ترین ترکیب شیمیایی ماسه، کربنات کلسیم (CaCO₃) است. دانه بندی ماسه مورد استفاده نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. است. ماسه مورد استفاده نیز در شکل ۳ نشان داده شده



شکل۱- ماسه کربناته استفاده شده در این پژوهش

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ماسه کربناته

Characteristics	Calcareous Sand
CaO	49.91
Na ₂ O	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



آزمایش دانه بندی برای تعیین اندازه ی دانه های خاک و طبقه بندی خاک برای بخش درشت دانه خاک مطابق با استاندارد D ASTM 422 انجام گردید. سایر مشخصات ماسه در جدول ۱ ارائه شده است. 425 انجام گردید. سایر مشخصات ماسه در جدول ۱ ارائه شده است. 4254 استفاده شده است که خاک در سست ترین حالت از طریق یک قیف داخل قالب ریخته شده است و در نهایت بر اساس وزن 4254 و حجم قالب، پارمتر emax تعیین شده است. برای بدست آوردن مقدار min نیز از روش 1A معرفی شده در 4253 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 درنظر گیری حجم قالب و وزن خاک، مقدار emin بدست آمده است.



., ., .,	
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
Си (-)	2.98
Сс (-)	1.03
e _{min}	0.61
e _{max}	0.96
$Y_{min}(g/cm^3)$	1.36
$Y_{max}(g/cm^3)$	1.69
$MDD (g/cm^3)$	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، ۸۰/۷۵ 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 (D50) افزایش Rn افزایش عمق شیار روی سطح فولادی یا بتنی را نشان میدهد. قابل ذکر است که نمونههای بتنی بعد از ۲۸ روز عمل آوری در آزمایشهای اندر کنش در دستگاه برش مستقیم استفاده شده است.





شکل۵- نمونه فولادی ساخته شده این پژوهش برای برش صفحات فلزی، از برش CNC با دقت بالا ا ستفاده شده است. برای ساخت صفحات بتنی نیز از صفحات فولادی ساخته شده بعنوان قالب ا ستفاده شده ا ست تا عمق شیارهای صفحات بتنی دقیقا م شابه صفحات فولادی شود. از آنجاکه صفحات فولادی در آز مایش ها تخریب نشـده، دوباره در آز مایش های بعدی از آنها ا ستفاده شده ا ست. ولی نتایج آزمایشهای اولیه بر روی نمونههای بتنی نشان داده که این نمونهها آسیب پذیر هستند و بعد از آزمایش، ا بههای تیزگو شه بتن تخریب شده ا ست و برای هر آزمایش از یک نمونه بتنی خاص ا ستفاده شده ا ست و برای هر آزمایش از یک ا ستفاده مجدد نشده ا ست. لازم بذکر ا ست که پارامترهای مقاومت برشـی بدسـت آمده بر اسـاس مقاومت نهایی بوده که در اکثر آزمایشها این مقدار در دامنه کرنشهای بزرگ بد ست آمده ا ست. در این سطح از کرنش، شکستگی لبههای بتنی ممکن است بر روی

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 آماده سازی بستر ماسه ابتدا خاک تهیه شـده از محل را کوبیده تا کلوخههای آن از هم جدا شـوند. سیس خاک را از الک مورد نظر عبور میدهیم تا به دانهبندی یکنواختی بر سیم. ابتدا شمع شیارزده را در کف د ستگاه 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 بر سد. 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 محا سبات مقدار ما سه لازم جهت تراکم نمونه حساب شده است. قابل ذکر است در تمامی آزمایشها از خاک خشک استفاده شده است. بعد از متراکم کردن 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 می گذاریم .

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 متو سط ۱ میلیمتر بر دقیقه مطابق با ۱ ستاندارد ASTM D3080 انجام شده است.

۳ – نتایج آزمایشها

در آزمایشهای اولیه، تعدادی آزمایش بر روی نمونه ماسه کربناته انجام شده است تا پارامترهای مقاومت بر شی خاکها در دانسیته نسبی ۳۰ و ۹۰ در صد مشخص شود. شکلهای ۶ و ۷ نمودارهای مربوط به ماسه کربناته در دانسیته نسبی ۳۰ و ۹۰ در صد 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.



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 شـده است. از ۴ سـطح زبری یعنی Rn برابر با ۰، ۲۵/۰، 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 شـده است. فرم منحنی تنش برشی در مقابل کرنش برشی برای همه نمونهها تقریبا مشـابه اسـت 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.







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

3

2

همانطور که در اینجا مشاهده می شود، تمامی نمودارها زیر نمودار مربوط به ماسه خالص قرار دارد. به عبارت دیگر در تمامی نمونههای اندر کنشی فولاد و ما سه کربناته، مقاومت بر شی بد ست آمده کمتر از خود ماسه است. از طرف دیگر، نمونه حاوی صفحه فولادی صاف (زبری نسبی صفر) کمترین مقاومت بر شی را بدست آورده است. با افزایش زبری نسبی از ۰ تا ۱/۵، مقاومت برشبی نمونهها نیز برای همه مقادير تنش نرمال افزايش يافته است. اختلاف بين مقاومت برشی حالت صاف با زبری نسبی ۷۵/۰ 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 کیلوپا سکال، با افزایش زبری نسبی از صفر تا ۰/۷۵، مقدار مقاومت برشی از ۳۰ کیلوپاسکال به ۵۰ کیلوپاسکال افزایش یافته است. در حالیکه با افزایش زبری نسبی از ۰/۷۵ تا ۱، مقدار آن از ۵۰ كيلوپاسـكال به ۵۸ كيلوپاسـكال افزايش يافته اسـت. اختلاف بين مقاومت برشی بدست آمده برای تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال سوس تر از اختلاف بدست آمده برای تنش نر مال 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 مىدهد كه افزايش دانسيته نسبى ماسه باعث افزايش مقاومت بر شی شده است. در واقع با افزایش دانسیته نسبی ماسه، در گیری 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 بد ست آمده برای دانسیته نسبی ۳۰٪ و ۹۰٪ نشان می دهد که با افزایش دانسیته نسبی ماسه اختلاف بین مقاومت بر شی برای مقادیر مختلف زبری نسبی مخصو صا در سطوح کرنشهای بزرگ کمتر شده است.





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

برای بررسی دقیق تر 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 بیش تر 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 مقایسـه دقیق تر اثر دانسـیته نسـبی و زبری سـطح فولادی، مقادیر مقاومت بر شی ماکزیمم نمونه ها در مقابل مقدار زبری نسبی در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانطور که در اینجا دیده می شود، با افزایش تنش نرمال، اثر زبری نسـبی افزایش یافته اسـت و شـیب خطوط در تنش نرمال ۵۰۰ کیلوپا سکال از بقیه موارد بیشتر است.

اختلاف نتایج بین نمونه ها با دانسیته نسبی ۳۰ و ۹۰ در صد 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 کریناته 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 ۹ به زاویه اصطکاک ما سه کربناته خالص در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همانطور که در اینجا دیده می شود 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 ۸۰/۰ 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 اندر کنش 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

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 اندر کنش برای زبری نسبی ۱/۵ بد ست آمده است. به ازای یک مقدار زبری نسبی ثابت، افزایش تنش نرمال باعث افزایش مقاومت شده است.

برای بررسی دقیق تر اثر صفحات فولادی و بتنی، مقادیر مقاومت برشی ماکزیمم برای هر دو صفحات برای تنشهای نرمال ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلوپا سکال 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 بر شی بسیج شده بین ما سه و صفحه فولادی بیشتر از مقدار متناظر برای ما سه 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 ۱/۵۰



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 اندر کنش ماسه کربناته و صفحه فولادی و بتنی به ماسه کربناته خالص برای ماسه کربناته با دانسیته نسبی ۹۰ در صد در شکل ۲۰ نشان داده شده است. در مقدار Rn برابر با صفر، زاویه اصصکاک بین سطح بتن و ما سه کربناته کمی بیشتر از مقدار متناظر آن برای سطح بین ماسه کربناته و فولاد است. دلیل این اختلاف میتواند به نا صاف بودن سطح بتن نسبت به سطح فولاد در حالت مقدار زبری صفر اشاره کرد. برای مقادیر به سطح فولاد در حالت 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. Rn بیشترین اختلاف برای زاویه اصطکاک نسبی در ماکزیمم مقدار Rn بیشترین اختلاف برای زاویه اصطکاک نسبی در ماکزیمم مقدار Rn

قابل ذکر است ثبت رفتار های تغییر حجمی نمونه ها 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 انقبا ضی 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

در این بخش، دو سـری آزمایشهای برش مسـتقیم برای اندرکنش فولاد و بتن با ماسـه کربناته در جهت بررسـی 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 برشـی ماکزیمم در حالت زاویه برش ۹۰ درجه بیشتر از حالت زاویه برش صفر درجه است. این اختلاف بین نتایج برای زوایای صـفر و نود درجه با افزایش تنش نرمال بیشـتر 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 شـیب خط شـده است. در تمامی موارد پوش گسـیختگی اندرکنش زیر پوش گسـیختگی مربوط به ماسـه 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 بی شترین مقدار این نسبت برای صفحات فولادی با زاویه برش و درجه بدست آمده است. با افزایش تنش نرمال اثر زاویه برش و جنس صفحات بر روی مقدار مقاومت برشی بدست آمده بیشتر

با زاویه برش ۹۰ درجه بیشترین مقاومت را نشان داده است. یکی از مشکلات ا سا سی در پروژههای عمرانی، خرد شوندگی بالای ما سه کربناته در زمان اعمال تنشهای نرمال و بر شی ا ست –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 مخصو صا 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 ۸۰۰ در تنشهای نرمال ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلوپاسیکال، منحنی دانهبندی مجدد در شکل ۲۵ و ۲۶ ارائه شده است. برای بررسی دقیق تر میزان خردشیدگی، 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٪



شکل ۲۶- منحنی دانهبندی مجدد برای ماسه کربناته در دانسیته نسبی ۰/۹۰

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 ۶/۰ میلی متر در دانسیته نسبی ۹۰٪، نزدیک به ۶۳٪ و برای نمونهها با دانسیته نسبی ۳۰٪ نزدیک به ۸٪۸۵ است.

شکل ۲۷ منحنی دانهبندی مجدد ما سه کربناته بعد از آزمایشهای اندر کنش ماسه وفولاد برای مقادیر زبری متفاوت را نشان میدهد. همانطور که در زیر نویس شکل نیز اشاره شده است، این آزمایشها برای حالت eta برابر با ۹۰ درجه وتنش نرمال ۵۰۰ کیلوپاسکال است. از آنجاکه در نمونه های اندر کنشیی ماسیه 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 شــده، آز مایش دا نهبندی مجدد فقط برای آز مایش های اندر کنشی 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 تیز گوشگی 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 β=90⁰ و تنش نرمال ۵۰۰

كيلوپاسكال

برای بررسی اثر زاویه برش (β) بر روی میزان خردشوندگی ماسه کربناته در آزمایشهای اندرکنشی ماسه و فولاد در تنش نرمال ۹۰۰ کیلوپا سکال، 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 می شود، میزان خردشوندگی در حالت زاویه برش ۹۰ درجه بیشتر از صفر درجه است. مقدار خرد شوندگی برای زاویه برش صفر درجه نیز بیشتر از حالت سطح صاف و کمتر از ماسه کربناته خالص است. در واقع در حالت اسطح صاف و کمتر از ماسه کربناته خالص است. در واقع در جهت شیارها میزان خردشدگی بیشتر از حالت زاویه برش صفر برجه است. قابل ذکر است که خردشدگی ماسه کربناته در بارگذاریهای برشی باعث می شود تا زاویه اصطکاک آن کاهش یابد و در نتیجه میزان مقاومت برشی آن نسبت به حالت قبل از خردشدگی کاسته می شود.



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 و مذب انرژی در شرایط اندک خاک در انتقال تنشهای برشی و جذب انرژی در شرایط اندک ارزیابی پایداری سواحل، تحلیل لرزهای، و سایر زمینههای مهندسی، مدول بر شی سکانتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. این پارامتر نقش کلیدی در تخمین تغییرات حجمی و شکل پذیری خاک در پاسخ به بارگذاریهای دینامیکی نیز ایفا می کند. از اطلاعات دقیق ایمنی سازهها، و بهینهسازی عملکرد خاک در شرایط مختلف حاصل کرد. یکی از روابط تجربی که برای تخمین مدول بر شی سکانتی از طریق مقاومت برشی در ژئوتکنیک استفاده می شود بصورت زیر است [45, 46]:

 $G = 2.5 \times Su \tag{1}$

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 برر سی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در شکل ۲۹ ارائه شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، افزایش تنش نرمال و دانسیته نسبی باعث افزایش مدول بر شی سکانتی در ماسه کربناته شده است. همانطور که نتایج آزمایش های 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 می توان از این پارامتر نیز جهت تخمین مقاومت برشی بسیج شده در حالت اندرکنش استفاده کرد.



۴- نتیجهگیری

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

- در تمامی نمونه مقاومت اندر کنش فولاد و بتن با ماسه کربناته با درجه زبری متفاوت، کمتر از مقاومت بر شی خود ما سه ا ست.
 در سطح تنش نرمال یکسان، بیشترین مقاومت بر شی مربوط به ماسه خالص و کمترین آن مربوط به حالت زبری صفر است. با افزایش زبری نسبی مقاومت برش در سطح اندر کنش افزایش می یابد. تغییرات شیب پوش گسیختگی بدلیل تغییر زبری صفحات فولادی در ماسه کربناته تقریبا روند مشابهی دارد.
- با افزایش دانسیته نسبی ماسه، اختلاف بین مقاومت بر شی 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 اندر کنش 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 ۲۵۵ و در سطح تنش برابر، مقدار مقاومت بر شی بسیج شده بین ما سه و صفحه فولادی بیشتر از مقدار متناظر برای ماسه و صفحه بتنی است. این اختلاف در درجه زبری ۰ تا ۲۵/۵ 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 نمونه های ما سه کربناته در دانسیته نسبی ۸۰٪ بیشتر است. آزمایش دانه بندی مجدد نشان می دهد 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 ما سه کربناته خالص بی شتر 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 دانه ها در جهت عمود بر جهت شیار ها، میزان خردشدگی بیشتر از حالت زاویه برش صفر درجه است.
- 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
- 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

- Al-Mhaidib AI (2005) Loading rate effects on pile groups in clay. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 10 E:
- 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
- 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
- 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.2021.1033 77
- 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.2018.03.0 03
- 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
- 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

- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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

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

- 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)
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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)
- 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)
- Cui MJ, Zheng JJ, Chu J, et al (2021) Biomediated 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 soilstructure interface under constant normal stiffness condition. Cold Regions Science and Technology 102:52–62. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.03.00 1
- Chen X, Zhang J, Xiao Y, Li J (2015) Effect of roughness on shear behavior of red clayconcrete 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
- 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.2017.12.00 3
- 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

- 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
- 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