

مقاومت کششی دونیم‌شدن ماسه تثبیت‌شده با سیمان و مسلح‌شده با الیاف ماسک صورت جراحی

حسین ملاعباسی^{*}

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی مینودشت، دانشگاه گنبد کاووس

پست الکترونیکی نویسنده:

۱- hma@gonbad.ac.ir

چکیده:

باتوجه به همه‌گیری بیماری کرونا از سال ۱۳۹۸، استفاده از ماسک‌های صورت یکبار مصرف در میان عموم رواج یافته تا جایی که دفن یا استفاده مجدد از آن به یکی از معضلات زیست‌محیطی تبدیل شده است؛ در این راستا نمونه‌های ماسه سیمانی مسلح‌شده با مقادیر متفاوت الیاف ماسک صورت جراحی در تراکم نسبی‌های گوناگون آماده و بعد از ۷ روز عمل‌آوری، مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها با استفاده از آزمایش دونیم‌شدن برزیلی مطالعه شده‌اند. نتایج حاصله نشان داد که افزودن درصد سیمان و تراکم نسبی تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود شاخص مقاومت کششی ماسه‌های سیمانی دارد. درصد الیاف ماسک صورت جراحی ۰/۲۵ درصد، مقدار بهینه الیاف اضافه‌شده است که مقاومت کششی در این درصد الیاف، بیشینه می‌باشند. در نهایت پارامتر کلیدی (نسبت پوکی و درصد سیمان) تعریف و چندین رابطه تجربی برای تخمین مقاومت کششی نمونه‌های تثبیت و تسلیح‌شده با دقت بسیار خوب ارائه شده است.

واژگان کلیدی:

ماسه سیمانی، الیاف ماسک صورت جراحی، مقاومت کششی، روابط تجربی.

* حسین ملاعباسی، استادیار دانشکده فنی مهندسی مینودشت، دانشگاه گنبد کاووس.

ایمیل: hma@gonbad.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Splitting tensile strength of cement-stabilized and surgical face mask fiber-reinforced sand

H. MolaAbasi¹

¹- Assistant Prof., Faculty of Minoodasht Engineering, Gonbad Kavous University, Iran.

Abstract:

The tendency towards reinforcement of cement-treated sands with inclusion of fibers has increased in recent years. This is due to the fact that fibers reduce the brittle behavior and improve the mechanical properties of the sandy soil samples. Since 2019, because of the epidemic of coronavirus, the use of disposable surgical face masks has become increasingly popular among the public to the extent that their burial, reproduction and reuse have become one of the major environmental problems. Therefore, in this research, an attempt has been made to reuse the surgical face fibers in the application of cement-reinforced sands. In this regard, samples with 2, 4, 6 and 8% cement contents, reinforced with different amounts of fibers (0, 0.2%, 0.5 and 0.7%) in different relative densities (30%, 50%, and 70% sand) were prepared and after 7 days of curing period, their tensile behavior using Brazilian tensile splitting tests. The results showed that the addition of cement percentage and increasing relative density have a significant effect on improving the tensile strength index of cement sands. The percentage of surgical face mask fibers 0.7% is the optimal amount of added fibers (the maximum tensile strength in this percentage of fibers). The key parameter (the ratio of porosity to cement content) definition and several empirical relations for estimating the tensile strength of reinforced and reinforced samples with very good accuracy are presented.

Keywords: Cemented sand, Surgical face mask, Tensile strength, Empirical correlations.

در اواخر سال ۱۳۹۸ با توجه به همه‌گیری بیماری کرونا، الزام استفاده از لوازم بهداشتی یک‌بار مصرف از جمله ماسک صورت و دستکش در میان عموم جامعه رواج یافت. براساس هدف اصلی استفاده از ماسک‌ها می‌توان آن‌ها را به چند دسته کلی زیر تقسیم کرد، که شامل ماسک‌های سه لایه شامل نوع کش‌دار و بنددار (معروف به ماسک جراحی)، ماسک‌های سوپاپدار FFP۲ و N۹۵ و ماسک‌های بدون سوپاپ FFP۲ و N۹۵ می‌شوند.

به طور عمده ماسک‌های تنفسی از چندین لایه نابافته متشکل از اسپان باند و ملت بلون ساخته می‌شوند که معمولاً جنس هر اسپان باند و ملت بلون عمدتاً از جنس الیاف نابافته پلی پروپیلن هستند و لایه یا لایه‌های ملت بلون نقش اصلی فیلتر کردن هوا از ذرات معلق و غبار را به عهده دارد. اسپان باند در نقش محافظت از این لایه‌ها به کار می‌رود. از رایج‌ترین انواع ماسک‌ها می‌توان به ماسک جراحی اشاره کرد. یک ماسک جراحی از حدود ۱۵ گرم مواد پلاستیکی مانند پلی پروپیلن، پلی اتیلن، پلی اورتان، پلی استایرن، پلی کربنات و پلی اکریلونیتریل تشکیل شده است [۲۲].

امروزه رهاسازی ماسک‌های صورت در طبیعت باعث آسیب‌های زیست‌محیطی بسیاری شده است. به‌عنوان مثال در دو موج اول و دوم کرونا، در استان ویکتوریا استرالیا ۲۶۴ تن ماسک صورت یک‌بار مصرف تولید شد که این ماسک‌ها غیرقابل تجزیه بوده و صدها سال برای تجزیه آن‌ها زمان صرف می‌شود [۲۳]. با توجه به اینکه تقریباً تمامی ماسک‌ها یک‌بار مصرف بوده و از الیاف غیرقابل تجزیه تولید می‌شوند، لذا دفن، یا بازتولید و استفاده مجدد از این الیاف به یکی از مشکلات زیست‌محیطی فعلی جوامع بشری تبدیل شده است. از این رو در دو سال اخیر محققینی در خصوص استفاده مجدد و بهره‌گیری از الیاف ماسک صورت مطالعات مقدماتی را داشته‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

بروجنی و همکاران در سال ۲۰۲۱، مطالعات امکان‌سنجی استفاده از الیاف ریزشده ماسک صورت در بتن‌های باز یافتی جهت ساخته پیاده‌روها را انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها بدین صورت بیان شده است که اضافه کردن ماسک‌های یک‌بار مصرف به بتن‌های باز یافتی باعث بالاتر رفتن مقاومت کششی و انعطاف‌پذیری روسازی شد. الیاف ریزشده ماسک صورت در قیاس با ذرات

ثبیت خاک با سیمان برای طیف وسیعی از خاک‌ها به‌ویژه خاک‌های مسئله‌دار مانند ماسه شل اشباع، توسط مهندسین ژئوتکنیک در کاربردهای گوناگون پی‌های سطحی [۱]، بستر راه‌ها [۲]، خاک‌ریزهای پشت دیوار حائل [۳]، تزریق دوغاب در سیستم‌های ریزشمع [۴] و کانال‌ها [۵] استفاده می‌شود. بکاربردن سیمان به‌عنوان تثبیت‌کننده ماسه در محل، در مقایسه با سایر روش‌های بهسازی از جمله جایگزینی خاک با مصالح مرغوب به‌عنوان یکی از روش‌های مقرون‌به‌صرفه مطرح است [۶].

رفتار ماسه‌های سیمانی متأثر از درصد و نوع ماده سیمانی، تراکم، رطوبت نمونه‌های مورد آزمایش، شرایط بارگذاری و همچنین زمان و نحوه عمل‌آوری می‌باشد [۷]. با مرور ادبیات فنی مرتبط با موضوع، می‌توان دریافت که افزودن سیمان سبب بهبود خواص مکانیکی ماسه‌ها از جمله تراکم [۸]، مقاومت کششی [۹]، مقاومت فشاری محصور نشده [۱۰]، چرخه‌های تر و خشک [۱۱]، و رفتار زهکشی‌شده و زهکشی‌نشده [۱۲]، [۱۳] می‌شود. یکی از معضلات ماسه‌های بهسازی‌شده با سیمان در طی زمان عمل‌آوری، رفتار ترد و شکننده می‌باشد. بدین ترتیب که نمونه تحت بارگذاری محوری مقادیر افت مقاومت زیادی را بعد از مقاومت بیشینه در ازای افزایش کرنش محوری تجربه کرده و به مقاومت پسماند کمتری می‌رسد. همچنین بایستی اشاره کرد که کرنش گسیختگی این نمونه‌ها در مقایسه با خاک پایه بسیار پایین می‌باشد [۱۴].

راه‌حل‌های گوناگونی برای کاهش رفتار ترد ماسه‌های تثبیت‌شده با سیمان پیشنهاد می‌شود که استفاده از الیاف یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها است. الیاف مصنوعی و طبیعی هر کدام با مقاومت کششی خود با بهبود ناحیه شکست در ترک‌ها باعث کاهش رفتار شکننده شده و تا حدودی سبب افزایش استحکام و مقاومت نمونه‌های سیمانی می‌شوند [۱۵].

سابقاً تحقیقات زیادی در خصوص استفاده از الیاف به‌صورت بافته‌شده (از جمله ژئوسنتتیک‌ها) و مجزا برای تسلیح ماسه‌های سیمانی انجام شده که می‌توان به مطالعات مرتبط با پارامترهای مقاومت برشی [۱۶]، کششی [۱۷]، دوام [۱۸] و رفتارهای زهکشی‌شده و زهکشی‌نشده در دستگاه سه‌محوری [۱۹]–[۲۱] اشاره کرد.

روانگرایی می‌شود. همچنین، مدول برشی ماسه‌های تمیز و سیلتی با افزودن الیاف ماسک بهبود یافت.

در این پژوهش هدف بر این است که در ادامه بررسی‌های پیشین، از الیاف ماسک صورت جراحی به صورت بهینه در ماسه‌های سیمانی استفاده شود تا علاوه بر جلوگیری از انتشار آلودگی، باتوجه به دفن و جامدسازی ماسک‌ها، از این ضایعات و زباله‌های تولیدشده به نحوی امن بهره برده شود. در این راستا رفتار کششی ماسه‌های سیمانی مسلح‌شده با الیاف ماسک تحت آزمایش کششی غیرمستقیم دونیم‌شدن برزلی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح مورد استفاده

ماسه مورد استفاده در این تحقیق به عنوان خاک پایه، از ناحیه ساحلی دریاچه خزر در نزدیکی شهر بابلس بوده است. آزمایش‌های شناسایی اولیه انجام‌شده بر روی ماسه نشان داد که خاک پایه، ماسه بددانه‌بندی‌شده بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد [۳۰] می‌باشد. سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل چگالی دانه‌های جامد خاک (G_s) ۲/۷۴، حداقل و حداکثر وزن مخصوص خشک ماسه، $\gamma_d \max = ۱۷/۷$ و $\gamma_d \min = ۱۴/۹$ کیلو نیوتن بر مترمکعب بر اساس استانداردهای به ترتیب ASTM D ۸۵۴ [۳۱]، ASTM ۴۲۵۳ [۳۲] و ASTM D ۴۲۵۴ [۳۳] به دست آمده است. منحنی دانه‌بندی ماسه بابلس همراه با عکس ریزساختاری در شکل (۱) ترسیم شده است.

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه نکا واقع در استان مازندران، نزدیک‌ترین کارخانه سیمان به محل خاک پایه (بابلس)، به عنوان عامل تثبیت‌کننده استفاده شده است.

بتن‌های بازیافتی، انعطاف‌پذیری بالاتری داشتند. در نهایت آن‌ها اشاره داشتند که برای ساخت یک پیاده‌رو دوطرفه به مسافت یک کیلومتر، حدوداً ۳ میلیون ماسک بازیافتی مصرف شده است [۲۴].

رحمان و خلید در سال ۲۰۲۱ در جهت کنترل پویایی تولید زباله روزافزون ماسک صورت و بهسازی خاک‌های رسی با خاصیت خمیری زیاد (CH)، روش نوینی بر پایه تسلیح با الیاف ماسک و تثبیت با دوده سیلیسی پیشنهاد دادند که علاوه بر تسلیح خاک بهبود خواص مهندسی خاک را نیز در بر داشت [۲۵].

لینچ و همکاران در سال ۲۰۲۱ روشی نوآورانه برای استفاده از زباله‌های همه‌گیر بیماری کرونا در ساخت و ساز بتن با تمرکز اصلی بر روی ماسک‌های صورت یک‌بارمصرف را بررسی کردند. آن‌ها ماسک‌های یک‌بارمصرف با برداشتن حلقه‌های گوش و سیم داخلی بینی به اندازه‌های گوناگون در پنج طرح مختلف مخلوط کردند. در نتیجه، فواید و کاربردهای احتمالی در بتن با تمرکز بر روی مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول الاستیسیته و سرعت موج فشاری برای آزمایش کیفیت بتن تولیدشده مورد تحلیل قرار دادند. استفاده از ماسک‌های صورت یک‌بارمصرف منجر به افزایش خواص مقاومتی نمونه‌های بتن ساخته شده و همچنین افزایش کیفیت کلی بتن شد [۲۶].

سیو و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۲۳ به مرور روش‌های مرسوم استفاده مجدد از ماسک‌های یکبار مصرف به عنوان راهنمایی برای بکاربردن منابع ماسک زباله با توجه به مسائل انتشار آلودگی برای طرح‌های آبی پرداختند.

گلی و صادقی [۲۸] در مقاله خودشان با انجام آزمایش‌های مارشال، مدول ارتجاعی، کشش غیرمستقیم و خستگی به بررسی اثرات افزودن الیاف ماسک صورت به آسفالت اشاره داشتند. نتایج آن‌ها حاکی از این بود که افزودن این الیاف ماسک به مخلوط آسفالت، عملکرد آسفالت را بهبود می‌بخشد و الیاف ۱۲ میلی‌متری نتایج بهتری نسبت به الیاف ۸ میلی‌متری به دست می‌آورد.

صمدزاده و همکاران [۲۹] با استفاده از ۳۶ آزمایش برشی چرخه‌ای سه‌محوری زهکشی‌نشده به بررسی افزودن الیاف ماسک به خاک پرداختند. آن‌ها ابراز داشتند که افزودن الیاف ماسک به نمونه‌های ماسه سیلتی منجر به بهبودهای پایدار مانند رفتار اتساع بیشتر و اتلاف فشار آب منفذی اضافی و افزایش مقاومت در برابر

از ۷۰ درصد، خصوصیات مقاومتی خوبی داشته و معضلات روانگرایی و یا انزوال ظرفیت باربری را ندارد [۱۴]. لذا خاک متراکم نیازمند تثبیت و تسلیح نبوده و از اولویت انتخاب برای بررسی خارج گردید. درصدهای سیمان ۲ تا ۸ درصد که بر اساس طبقه‌بندی اسماعیل و همکاران [۳۷]، محدوده بین ماسه‌های سیمانی ضعیف تا متوسط است، مدنظر قرار گرفته و درصدهای الیاف ماسک جراحی ریزشده صفر تا ۰/۷۵ بکار برده شده است. به صورت خلاصه طرح اختلاط مربوط به نمونه‌های تحت آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم انجام شده به صورت جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌های این پژوهش

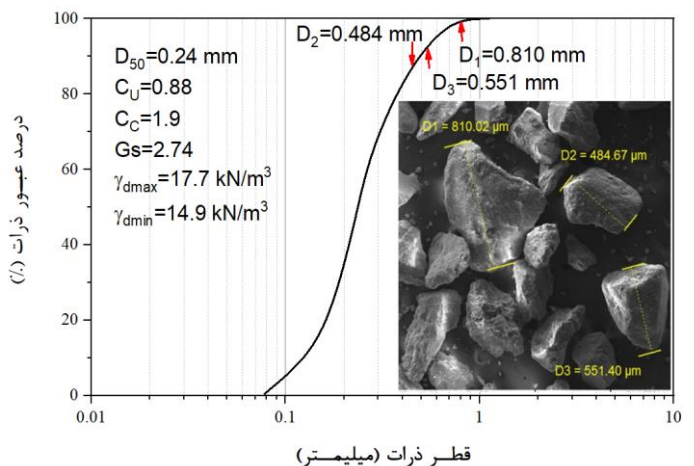
مشخصات	ملاحظات
خاک پایه	ماسه بابلسر
تثبیت کننده	سیمان کارخانه نکا با مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد جایگزین ماسه
تسلیح کننده	الیاف ریزشده ماسک صورت با ابعاد ۲۰ میلی‌متر طول و ۳ میلی‌متر عرض با درصدهای جایگزینی مصالح صفر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵
تراکم نمونه‌ها	معادل با تراکم نسبی (D_r) ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۰ درصد خاک پایه
زمان و شرایط عمل آوری	۷ روزه در دمای حدود ۲۴ درجه و رطوبت بالای ۹۰ درصد
آزمایش مقاومتی	کشش غیر مستقیم دونیم شدن برزیلی

۲-۳ - نمونه‌سازی و انجام آزمایش کشش غیرمستقیم

باتوجه به حداکثر اندازه ذرات موجود در مخلوط اشاره شده در شکل (۱) (ذرات ماسه به ابعاد کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر می‌باشد)، ابعاد نمونه‌سازی ۳۸×۷۶ میلی‌متر (ارتفاع × قطر) برای تهیه نمونه‌های مناسب استفاده شد [۳۸]. بر اساس طرح اختلاط فهرست شده در جدول (۱)، ابتدا باتوجه به $\gamma_{d\ max}$ و G_s ماسه که قبلاً در بخش ۲-۱ ارائه شده است، نسبت پوکی (e) معادل با تراکم نسبی‌های مدنظر به دست آمده و سپس وزن مخصوص خشک مربوط به هر طرح اختلاط ($\gamma_{d\ mix}$) از رابطه (۱) محاسبه شده است.

$$\gamma_{d\ mix} = \frac{G_{save} \gamma_w}{1+e} \quad (1)$$

دلیل استفاده از پارامترهای $\gamma_{d\ max}$ و $\gamma_{d\ min}$ در نتیجه آن تراکم نسبی به جای پارامترهای حاصل از آزمایش تراکم استاندارد



شکل ۱: دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در این پژوهش به همراه عکس ریزساختاری

برای تسلیح ماسه‌های سیمانی از الیاف ماسک‌های صورت جراحی استفاده شده است. وزن مخصوص، مقاومت کششی و ضخامت ماسک‌های صورت به ترتیب مقادیر ۰/۹۱ کیلو نیوتن بر مترمکعب، ۴۰۰ کیلو پاسکال و ۴۳ میکرون در مطالعات صابریان و همکاران [۲۴] گزارش شده و در این پژوهش مدنظر قرار گرفته است. شایان ذکر است که به دلیل در نظر گرفتن خطر ابتلا به بیماری کرونا، از الیاف ماسک‌های نو بهره گرفته شد. ماسک‌ها به قطعاتی به ابعاد ۲۰ میلی‌متر طول و ۳ میلی‌متر عرض بریده و به مخلوط اضافه شده است. دلیل از انتخاب این ابعاد ایجاد مقاومت کششی و فشاری بیشتر ناشی از استفاده از الیاف کوتاه بوده که برای کسب اطلاعات بیشتر توجه خوانندگان به مطالعه مقالات خبریز و همکاران [۳۴]، کنسولی [۳۵] و بن صلاح [۳۶] جلب می‌شود.

۲-۲ - طرح اختلاط

زمان عمل آوری در این مطالعه همانند بسیاری از مقالات تثبیت با سیمان، ۷ روزه انتخاب شده است تا رفتار ماسه سیمانی و اثرات الیاف ماسک در کوتاه‌مدت مورد بررسی قرار گیرد. در این حالت واکنش‌های بلند مدت پوزولانی سیمان و آب مورد نظر نبوده و فقط واکنش‌های هیدراسیونی در زمان ۷ روزه ملاک قرار گرفته است. محدوده بررسی تراکم نسبی (D_r) نمونه‌ها ۳۵ تا ۷۰ درصد تراکم نسبی خاک پایه انتخاب شده است. دلیل انتخاب تراکم نسبی‌های پایین‌تر این است که خاک ماسه‌ای بابلسر در تراکم نسبی‌های بالاتر

در این مطالعه تعداد ۴۸ آزمایش کشش غیرمستقیم دونیم شدن برزیلی بر اساس استاندارد ASTM D ۳۹۶۷ [۴۳] انجام شده است. بدین ترتیب که قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها بعد از ۷ روز زمان عمل‌آوری از پلاستیک زیپی خارج شده و در مدت ۲۴ ساعت در آب به حالت اشباع درآمده اند و سپس خشک شدند تا از امکان وجود پتانسیل ماتریک در حین نمونه‌سازی جلوگیری شود [۴۴]. در نهایت نمونه‌ها به صورت افقی در دستگاه بارگذاری قرارداده (شکل (۲)) و بیشینه مقاومت آن برای دونیم‌شدن بدست آمده و مقاومت کششی آن با توجه به روابط اشاره شده در استاندارد مربوطه محاسبه شده است.



شکل ۲: نحوه قرارگیری نمونه‌ها و انجام آزمایش کشش غیر مستقیم برزیلی

۳- نتایج و بحث

نتایج این تحقیق در سه بخش تاثیر سیمان و الیاف ماسک بر مقاومت کششی، تاثیر تراکم بر مقاومت کششی و روابط تجربی برای پیش‌بینی مقاومت کششی ارائه شده است. در شکل‌های ارائه‌شده در

(وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه) این است که درصد ریزدانه (سیمان) مخلوط‌شده در نمونه‌ها کمتر از ۱۵ درصد بوده که طبق استانداردهای ASTM D ۴۲۵۳ [۳۲] و ASTM D ۴۲۵۴ [۳۳]، روش تراکم نسبی در اولویت قرار می‌گیرد. از سویی دیگر در مطالعات مربوط به ماسه سیمانی و سیمانی الیافی از جمله کنسولی و همکاران [۳۹]، ملاعباسی و همکاران [۴۰] و کنسولی و همکاران [۴۱] از روش تراکم نسبی استفاده شده است.

برای در نظر گرفتن اثر سیمان و الیاف بر وزن مخصوص نمونه‌ها مطابق با مقاله ملاعباسی و همکاران [۴۰]، در رابطه (۱)، G_{save} مقادیر میانگین G_S مخلوط (سیمان، الیاف و ماسه) با توجه به درصد مشارکت مصالح در مخلوط استفاده شده است. با در دست داشتن حجم نمونه و V_{dmix} وزن خشک مصالح به دست می‌آید. مقدار آب موردنیاز برای تهیه نمونه‌ها، مطابق تحقیقات ملاعباسی و همکاران [۴۰]، درصد رطوبت بهینه (درصد رطوبتی که در آن بیشترین مقاومت فشاری محصورنشده به دست می‌آید) معادل ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که در تحقیقاتی مشابه اسفندیاری‌پور و همکاران [۴۲] برای ماسه بابل‌سیر سیمانی و مسلح شده با الیاف پروپیلن، درصد رطوبت بهینه ۱۰ درصد را گزارش کرده و برای نمونه سازی استفاده کردند. در نهایت به صورت خلاصه مراحل ذیل برای ساخت نمونه‌های همگن طی شده است.

- وزن کردن مصالح خشک (ماسه و سیمان) مطابق با طرح اختلاط ارائه‌شده در جدول (۱) و اختلاط مصالح با الیاف ریزشده ماسک و اضافه کردن آب موردنیاز تا حصول نمونه یکنواخت و همگن.
- ساخت نمونه‌ها به روش تراکم مرطوب با تراکم استاتیکی نمونه‌ها در سه لایه با در نظر گرفتن روش تراکم کاهش یافته مطابق با تحقیقات لد [۴۲].
- کنترل ظاهری ساخت نمونه‌ها و توزین مجدد نمونه به جهت اطمینان از تکرارپذیر بودن آزمایش.
- قراردادن نمونه‌ها در پلاستیک زیپی برای حفظ رطوبت نمونه‌ها به مدت ۷ روز برای انجام آزمایش کشش غیرمستقیم دونیم‌شدن برزیلی.

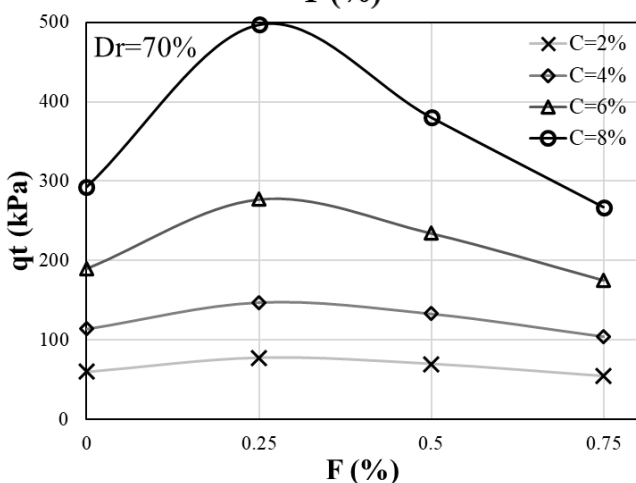
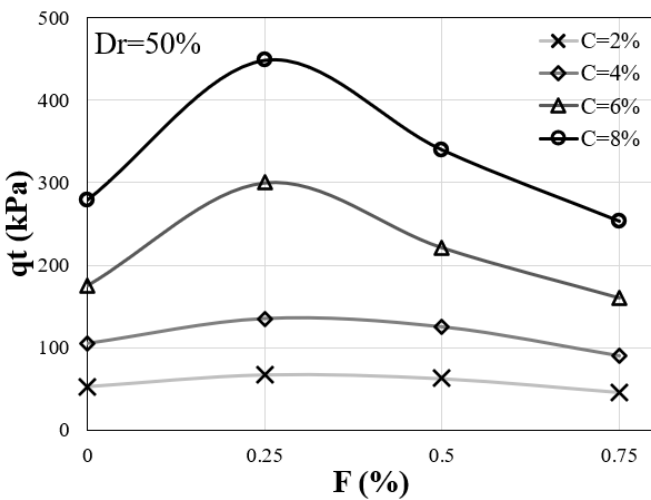
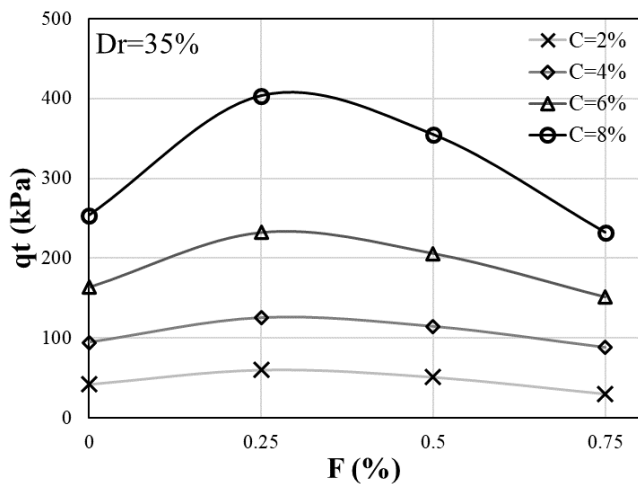
این بخش qt ، C ، F و Dr به ترتیب نماینده مقاومت کششی، درصد سیمان، درصد الیاف و تراکم نسبی هستند.

۳-۱- تاثیر سیمان و درصد الیاف ماسک بر مقاومت کششی

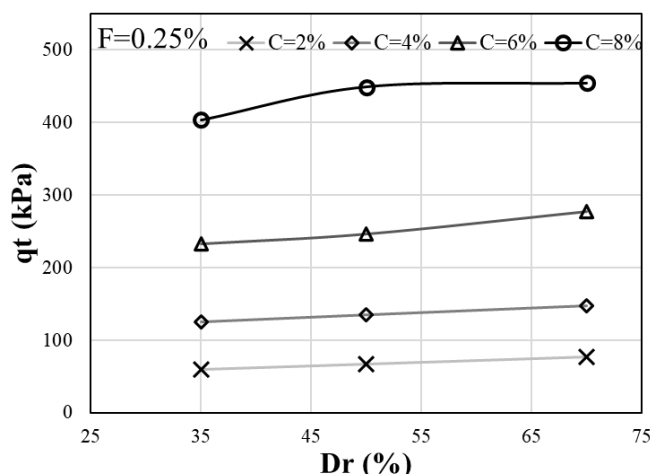
حداکثر استحکام یا همان مقاومت کششی نمونه‌های سیمانی حاوی الیاف ماسک جراحی در طی آزمایش دونیم‌شدن در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که به‌وضوح مشهود است، مقاومت کششی با افزایش درصد سیمان افزایش می‌یابد که می‌توان آن را در میزان تولید پیوندهای بین‌ذرات تشکیل‌شده ردیابی کرد [۴۵]. در نمونه‌های تثبیت‌شده و مسلح با افزایش درصد الیاف ماسک جراحی تا ۰/۲۵، مقاومت کششی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بنابراین ۰/۲۵ درصد الیاف ماسک جراحی درصد بهینه بوده که در آن بهترین کارایی از نظر واکنش‌های هیدراسیونی سیمان، کشش الیاف و اثر پرکنندگی در مخلوط می‌باشد. از سویی دیگر بایستی خاطرنشان کرد که افزایش الیاف بیش از درصد بهینه سبب کاهش مقاومت بیشینه به علت افزایش مقدار الیاف و با توجه به اینکه ابعاد الیاف سطح اتصال بین ذرات ماسه سیمانی کاهش می‌یابد، است. به عبارت دیگر درصد الیاف بیش از ۰/۲۵ درصد امکان تجمع یا افزایش سطح مشترک الیاف به جای برهمکنش مخلوط ماسه، سیمان و الیاف را بیشتر می‌کند لذا سبب لغزش دانه‌های سیمانی روی سطح الیاف به واسطه اصطکاک کمتر شده و مقاومت کمتری را سبب شده است [۴۶]. برای بررسی تأثیر افزودن الیاف ماسک بهینه، نرخ بهبود مقاومت (IR) به صورت رابطه (۲) تعریف شده است.

$$IR = (q_{tCF} - q_{tC}) / q_{tC} \times 100 \quad (2)$$

که در آن q_{tCF} و q_{tC} به ترتیب مقاومت کششی نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان و نمونه‌های سیمانی و حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف هستند.



شکل ۳: مقاومت کششی نمونه‌های سیمانی و سیمانی مسلح‌شده با الیاف ماسک در تراکم نسبی‌های گوناگون

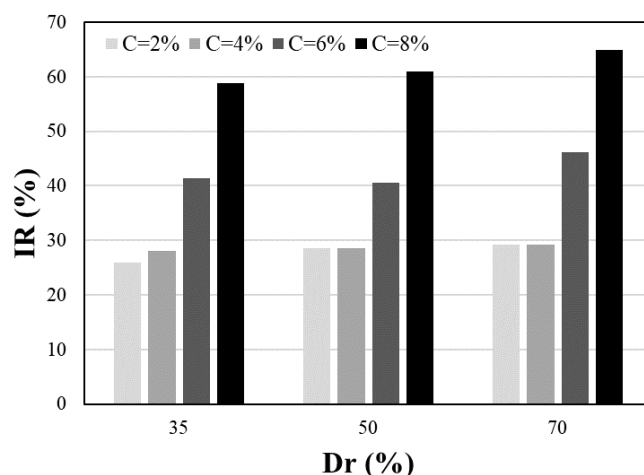


شکل ۵: مقاومت کششی در برابر تراکم نسبی به ازای مقادیر گوناگون درصد سیمان و الیاف ماسک ۰/۲۵ درصد

۳-۳- روابط تجربی برای پیش‌بینی مقاومت کششی

یکی از موضوعات به‌روز و مطرح در بحث‌های بهسازی خاک ارائه روابط تجربی برای پیش‌بینی پارامترهای مقاومتی است تا با استفاده از مقادیر حداقلی پارامترهای مقاومتی به‌توان طرح اختلاط بهینه مربوط به بهسازی خاک را پیشنهاد داد. کنسول و همکارانش از پیشگامان ارائه روابط تجربی و پارامترهای کلیدی در ماسه‌های سیمانی و سیمانی الیافی هستند. ایشان و همکارانش با معرفی پارامتر کلیدی (η/C) (پوکوی و C درصد سیمان) و استفاده از روابط توانی $a: a(\eta/C)^b$ و b اعداد ثابت هستند، توانستند مقاومت نمونه‌های سیمانی را با دقت بسیار خوب تخمین بزنند [۴۷]. کاربرد پارامترهای کلیدی به این نحو است که به عنوان مثال مقدار حداقل مقاومت فشاری محصورنشده ۱۴۵۰ کیلوپاسکال برای مقاومت لایه-های زیر اساس مورد نیاز است که با توجه به فرم توانی پارامترهای کلیدی نسبت (η/C) برابر $(1450/a)^{(1/b)}$ به دست می‌آید. در نتیجه به ازای مقادیر مختلف تراکم یا همان پارامتر پوکوی می‌توان بهینه‌ترین درصد سیمان مورد نیاز را برآورد کرد.

شکل (۴) نرخ بهبود مقاومت برای نمونه‌ها با درصد‌های گوناگون سیمان و تراکم نسبی نشان می‌دهد. همان‌طور که به‌وضوح مشاهده می‌شود، نرخ بهبود مقاومت در تراکم نسبی ۷۰ درصد و درصد‌های سیمان ۸، درصد بالاتری است. دلیل این مطلب را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که درصد سیمان‌های بالاتر و تراکم بیشتر، به ترتیب مقاومت باندهای سیمانی و تماس ذرات بیشتر و در نتیجه اثرات آن بر مقاومت کششی نمونه‌ها را بیشتر می‌کند [۱۳].



شکل ۴: نرخ IR به ازای مقادیر مختلف سیمان و تراکم نسبی

۳-۲- تاثیر تراکم نسبی بر مقاومت کششی

مقاومت کششی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با درصد الیاف در ازای تغییرات تراکم نسبی به صورت نمونه در شکل (۵) ارائه شده است. همان‌طوری که در شکل مشخص است با افزایش درصد سیمان مقاومت کششی به‌واسطه افزایش مقاومت باندهای سیمانی افزایش می‌یابد. از سویی دیگر با افزایش درصد تراکم نسبی مقاومت کششی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد که دلیل آن کاهش تخلخل نمونه‌ها می‌باشد [۱۴].

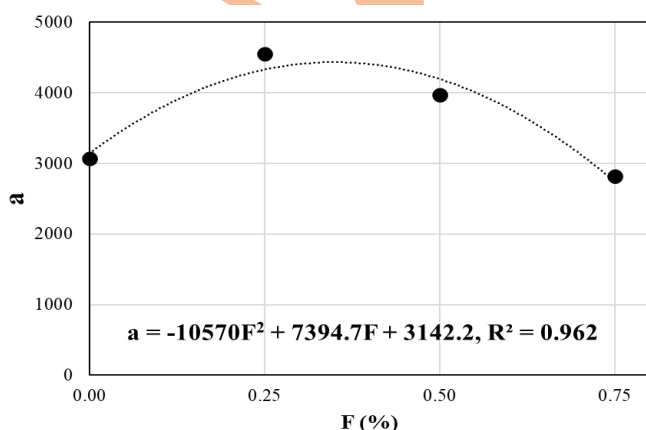
(۳)

$$\eta(\%) = 100$$

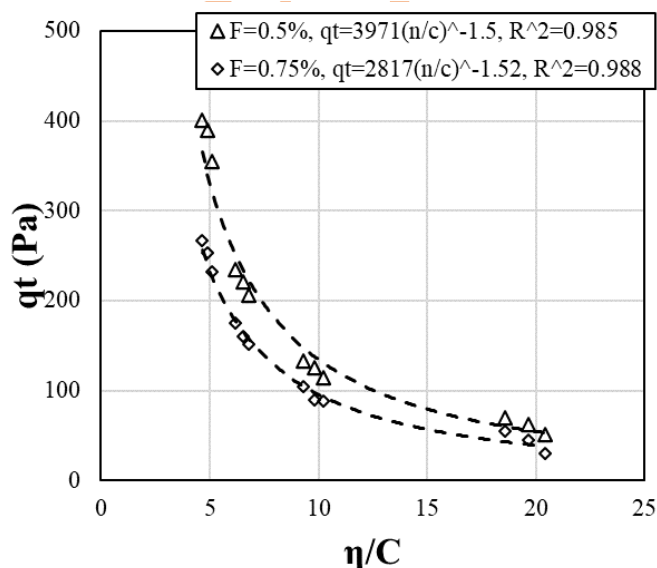
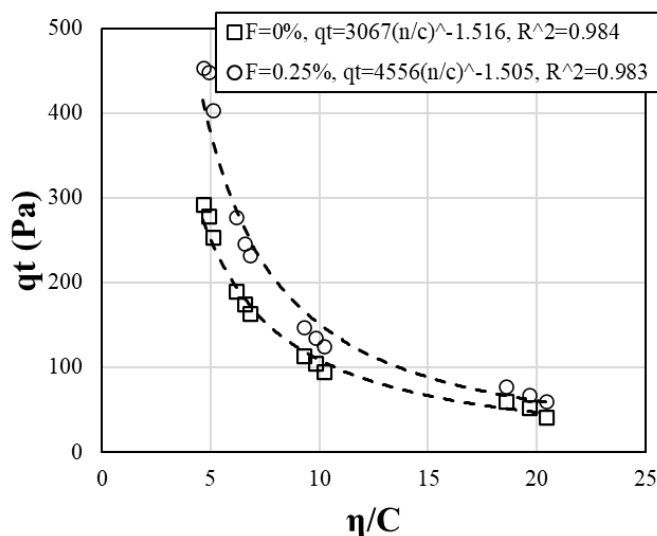
$$\left[\begin{aligned} & \left(\frac{\rho_d V_{spec}}{[\{1 + (C/100)\}][\{1 + (F/100)\}]} \right) \\ & - \frac{100}{V_{spec}} + \left(\frac{\rho_d V_{spec}}{[\{1 + (C/100)\}][\{1 + (F/100)\}]} \right) \left(\frac{C}{100} \right) \\ & + \left(\frac{\rho_d V_{spec}}{[\{1 + (C/100)\}][\{1 + (F/100)\}]} \right) \left(\frac{F}{100} \right) \end{aligned} \right] \left[\begin{aligned} & G_{save} \\ & G_{SC} \\ & G_{SF} \end{aligned} \right]$$

که در آن V_{spec} حجم نمونه و ρ_d وزن مخصوص خشک است. همانطور که در شکل (۶) مشخص است با افزایش η و کاهش C نسبت η/C افزایش یافته که حاکی از کم شدن محصولات تولیدشده سیمانی و تراکم خاک تثبیت شده دارد و در نتیجه از مقاومت کششی کاسته می شود. با بررسی دقیق تر شکل (۶) مشخص است که تغییرات q_t با η/C به صورت توانی (با توان تقریبی $-1/51$) با دقت بسیار خوبی تقریب زده شده است. برای ارائه رابطه جامع تر که به توان درصد الیاف ماسک را نیز در خود داشته باشد ضرایب ثابت های ارائه شده (a) را در ازای مقادیر مختلف درصد ماسک در شکل (۷) رسم شده و رابطه همبستگی به صورت رابطه چند جمله ای به دست آمده است. در نهایت با رگرسیون گیری مجدد، رابطه (۴) به عنوان یک رابطه بسیار مناسب برای پیش بینی مقاومت کششی ارائه شده است.

$$qt = 17,2(\eta/C)^{-1,516}(-665 F^2 + 467 F + 112) \quad (4)$$

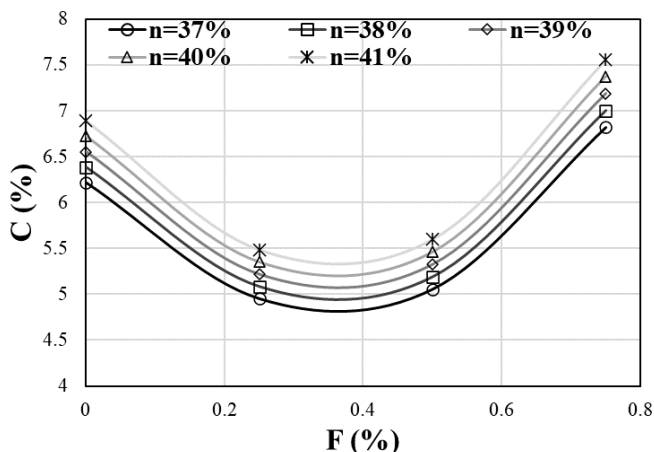


شکل ۷: ضریب ثابت a در برابر درصد الیاف ماسک



شکل ۶: مقاومت کششی در برابر η/C به ازای مقادیر گوناگون الیاف ماسک
شکل (۶) مقادیر مقاومت کششی در برابر η/C به ازای مقادیر مختلف الیاف ماسک ارائه شده است. شایان ذکر است که برای محاسبه پارامتر η نمونه های سیمانی الیافی از رابطه (۳) استفاده شده است.

مقاومت کششی و فشاری محصورنشده ماسه سیمانی پیشنهاد دادند که مقاومت کششی برابر با ۱۴ درصد مقاومت فشاری محصورنشده بوده و مستقل از درصدهای سیمان و تراکم خاک بهسازی شده است. در نتیجه با توجه به مواردی اشاره شد حداقل مقاومت کششی ۲۰۳ کیلوپاسکال مورد ملاک برای کاربرد مصالح به عنوان زیر اساس در نظر قرار گرفته شد.



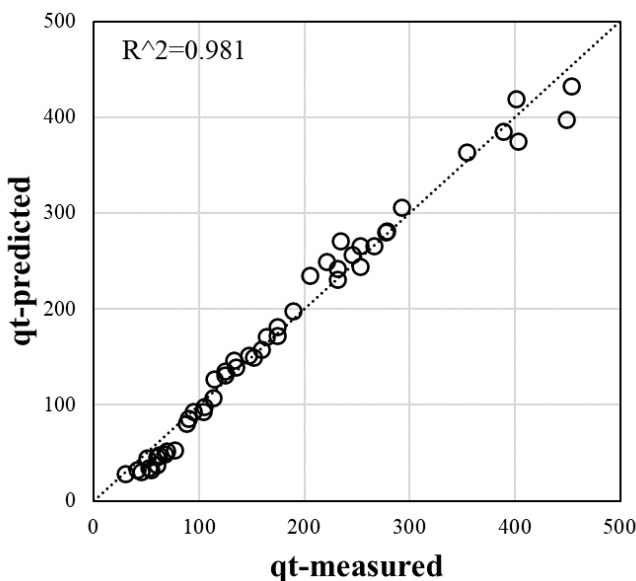
شکل ۹: حداقل درصد سیمان مورد نیاز برای بهسازی لایه زیراساس در شکل (۹) مقادیر حداقل درصد سیمان برای رسیدن به مقاومت مدنظر لایه زیراساس (مقاومت کششی ۲۰۳ کیلوپاسکال) برای استفاده محققین ارائه شده است. همانطوری که در شکل مشخص است درصد الیاف ۳۵ درصد بهینه الیاف ماسک از نقطه نظر مقاومتی و هزینه‌ای می باشد چراکه در این درصد الیاف ماسک کمترین مقدار سیمان در مخلوط مورد نیاز است. به عبارت دیگر برای رسیدن به مقدار مقاومت کششی ۲۰۳ کیلو پاسکال مدنظر برای مصالح زیر اساس می شود درصد الیاف بیشتری از ۲۵ درصد بهینه اشاره شده در ۳-۱ استفاده کرد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، امکان استفاده از الیاف ماسک یک بار مصرف در تسلیح ماسه سیمانی از طریق انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقاومت کشش غیرمستقیم دونیم‌شدن برزیلی با در نظر گرفتن ۷ روز زمان عمل آوری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه گیری بارز مطالعه انجام شده به شرح زیر است:

در شکل (۸) مقادیر پیش‌بینی شده در برابر اندازه‌گیری شده این پژوهش ارائه شده و مشاهده می شود که رابطه (۴) دقت بسیار خوبی برای پیش‌بینی qt با دقت بالای ۹۸ درصد دارد.

با توجه به رابطه (۴) ارائه شده مشخص است که تغییرات الیاف ماسک به صورت مستقل بر روی مقاومت کششی اثر می‌گذارد و به صورت رابطه چندجمله‌ای است. با برابر قرار دادن مقاومت نمونه‌های صرفاً سیمانی و الیاف ماسک در رابطه (۴) می‌توان دریافت که مقاومت نمونه‌های حاوی یک درصد الیاف برابر با مقاومت نمونه‌های سیمانی می‌شود. این بدین معنی که با جایگزین کردن مخلوط خاک و سیمان با وزن یک درصد مصالح الیافی ماسک، مقاومت کششی نمونه‌ها تغییری نمی‌کند. لذا این روش می‌تواند در جامدسازی حجم زیادی از الیاف ماسک آلوده راهگشا باشد. به عبارت دیگر ماسک‌های آلوده در طرح بهسازی خاک ماسه‌ای با سیمان، تثبیت شده و امکان انتشار آلودگی آن‌ها به حداقل می‌رسد. لذا می‌توان گفت که اثرات منفی احتمالی مرتبط به استفاده مجدد الیاف ماسک آلوده کاهش می‌یابد.



شکل ۸: مقادیر پیش‌بینی شده در برابر اندازه‌گیری شده qt یکی دیگر از استفاده‌های رابطه (۴) این است که مقاومت متناظر با حداقل مقاومت فشاری محصورنشده مصالح زیر اساس ۱۴۵۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شود و مقادیر مصالح مربوط به طرح اختلاط بدست آید. ملاعباسی و همکاران [۴۰] با بررسی

- [۳] C. Chu, Y. Deng, A. Zhou, Q. Feng, H. Ye, and F. Zha, "Backfilling performance of mixtures of dredged river sediment and iron tailing slag stabilized by calcium carbide slag in mine goaf," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۱۸۹, pp. ۸۴۹-۸۵۶, ۲۰۱۸.
- [۴] J. L. Pastor, J. M. Ortega, M. Flor, M. P. López, I. Sanchez, and M. A. Climent, "Microstructure and durability of fly ash cement grouts for micropiles," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۱۱۷, pp. ۴۷-۵۷, ۲۰۱۶.
- [۵] A. Farouk and M. M. Shahien, "Ground improvement using soil-cement columns: Experimental investigation," *Alexandria Eng. J.*, vol. ۵۲, no. ۴, pp. ۷۳۳-۷۴۰, ۲۰۱۳.
- [۶] N. C. Consoli, G. V Rotta, and P. D. M. Prietto, "Influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils," *Geotechnique*, vol. ۵۰, no. ۱, pp. ۹۹-۱۰۵, ۲۰۰۰.
- [۷] G. W. Clough, N. Sitar, R. C. Bachus, and N. S. Rad, "Cemented sands under static loading," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. ۱۰۷, no. ASCE ۱۶۳۱۹ Proceeding, ۱۹۸۱.
- [۸] S. Kenai, R. Bahar, and M. Benazzoug, "Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil," *J. Mater. Sci.*, vol. ۴۱, no. ۲۱, pp. ۶۹۵۶-۶۹۶۴, ۲۰۰۶.
- [۹] N. C. Consoli, R. C. Cruz, M. F. Floss, and L. Festugato, "Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. ۱۳۶, no. ۵, pp. ۷۵۹-۷۶۳, ۲۰۰۹.
- [۱۰] R. Cardoso, D. Ribeiro, and R. Néri, "Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures," *Soils Found.*, vol. ۵۷, no. ۴, pp. ۶۵۵-۶۶۸, ۲۰۱۷.
- [۱۱] N. C. Consoli and L. F. Tomasi, "The impact of dry unit weight and cement
- به‌وضوح قابل‌مشاهده است که استفاده از الیاف در تثبیت ماسه‌های سیمانی تاثیرات مثبتی روی مقاومت کششی نمونه‌ها می‌گذارد.
- درصد الیاف ماسک بهینه برای افزایش مقاومت کششی مخلوط ۰/۲۵ درصد است. نسبت افزایش مقاومت کششی با افزایش درصد سیمان و تراکم نسبی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
- پارامتر درصد پوکی به درصد سیمان (η/C) پارامتر مناسبی برای تخمین مقاومت کششی نمونه‌ها هستند. با ادغام پارامتر اشاره شده و مدل چندجمله‌ای درجه دوم رابطه‌ای جامع (رابطه (۴)) برای محاسبه مقاومت کششی ماسه‌های سیمانی مسلح‌شده با الیاف ماسک با دقت بسیار زیاد بدست آمده است.
- در نهایت، می‌توان دریافت که افزودن الیاف ماسک یک‌بارمصرف به ماسه تثبیت‌شده با سیمان اثرات متعدد مثبتی بر رفتار کششی دارد و با توجه به امکان کنترل آلودگی‌های ماسک با توجه به دفن و جامدسازی آن‌ها، شایستگی‌های زیادی در استفاده در سایر روش‌های تثبیت خاک در مهندسی ژئوتکنیک به‌همراه دارد. برای تحقیقات آتی، بررسی اثرات درصد قطعات ماسک بر تغییرات رطوبت لازم برای شروع واکنش‌های پوزولانی و بررسی رفتار بلند مدت نمونه‌های سیمانی الیافی پیشنهاد می‌شود.

منابع

- [۱] M. J. Rattley, B. M. Lehane, N. C. Consoli, and D. J. Richards, "Uplift of shallow foundations with cement-stabilised backfill," *Proc. Ice-gr. Improv.*, vol. ۱۶۱, no. ۲, pp. ۱۰۳-۱۱۰, ۲۰۰۷.
- [۲] A. K. Yadav, K. Gaurav, R. Kishor, and S. K. Suman, "Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. ۱۰, no. ۳, pp. ۲۵۴-۲۶۱, ۲۰۱۷.

- [۲۱] A. Hamidi and M. Hooresfand, "Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand," *Geotext. Geomembranes*, vol. ۳۶, pp. ۱-۹, ۲۰۱۳.
- [۲۲] S. A. Abbasi, A. B. Khalil, and M. Arslan, "Extensive use of face masks during COVID-۱۹ pandemic:(micro-) plastic pollution and potential health concerns in the Arabian Peninsula," *Saudi J. Biol. Sci.*, vol. ۲۷, no. ۱۲, pp. ۳۱۸۱-۳۱۸۶, ۲۰۲۰.
- [۲۳] M. Boroujeni, M. Saberian, and J. Li, "Environmental impacts of COVID-۱۹ on Victoria, Australia, witnessed two waves of Coronavirus," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. ۲۸, no. ۱۱, pp. ۱۴۱۸۲-۱۴۱۹۱, ۲۰۲۱.
- [۲۴] M. Saberian, J. Li, S. Kilmartin-Lynch, and M. Boroujeni, "Repurposing of COVID-۱۹ single-use face masks for pavements base/subbase," *Sci. Total Environ.*, vol. ۷۶۹, p. ۱۴۵۵۲۷, ۲۰۲۱.
- [۲۵] Z. Rehman and U. Khalid, "Reuse of COVID-۱۹ face mask for the amelioration of mechanical properties of fat clay: A novel solution to an emerging waste problem," *Sci. Total Environ.*, vol. ۷۹۴, p. ۱۴۸۷۴۶, ۲۰۲۱.
- [۲۶] S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, R. Roychand, and G. Zhang, "Preliminary evaluation of the feasibility of using polypropylene fibres from COVID-۱۹ single-use face masks to improve the mechanical properties of concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. ۲۹۶, p. ۱۲۶۴۶۰, ۲۰۲۱.
- [۲۷] J. Cui *et al.*, "Disposal and resource utilization of waste masks: a review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, pp. ۱-۲۲, ۲۰۲۳.
- [۲۸] A. Goli and P. Sadeghi, "Evaluation on the use of COVID-۱۹ single-use face masks to improve the properties of hot mix asphalt," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. ۲۴, no. ۵, pp. ۱۳۷۱-۱۳۸۸, ۲۰۲۳.
- [۲۹] A. Samadzadeh, S. Ghadr, H. Bahadori, and G. Kheiri, "Experimental study on the cyclic behavior of silty sands reinforced by content on the durability of sand-cement blends," *Proc. Inst. Civ. Eng. Improv.*, vol. ۱۷۱, no. ۲, pp. ۹۶-۱۰۲, ۲۰۱۷.
- [۱۲] Y. Amini and A. Hamidi, "Triaxial shear behavior of a cement-treated sand-gravel mixture," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. ۶, no. ۵, pp. ۴۵۵-۴۶۵, ۲۰۱۴, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.jrmge.۲۰۱۴.۰۷.۰۰۶.
- [۱۳] H. MolaAbasi, M. Saberian, S. N. Semsani, J. Li, and A. Khajeh, "Triaxial behaviour of zeolite-cemented sand," *Proc. Inst. Civ. Eng. Improv.*, pp. ۱-۱۱, ۲۰۱۸.
- [۱۴] H. MolaAbasi, "Laboratory Investigation on Mechanical Behavior of Babolsar Sand Stabilized with Cement and Zeolite," Babol Noshivani University, ۲۰۱۶.
- [۱۵] K. S. Ng, "Tensile behavior of fiber reinforced cemented soil: A short review," in *AIP Conference Proceedings*, ۲۰۱۸, vol. ۲۰۲۰, no. ۱, p. ۲۰۰۰۱.
- [۱۶] N. C. Consoli, P. D. M. Prietto, and L. A. Ulbrich, "Influence of Fiber and Cement Addition on Behaviour of Sandy Soil," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. ۱۲۴, no. ۱۲۱۱-۱۲۱۴, pp. ۱۹۷-۲۱۰, ۱۹۹۸, doi: ۱۰.۱۰۶۱/(ASCE)۱۰۹۰-۰۲۴۱(۱۹۹۸)۱۲۴.
- [۱۷] C.-S. Tang, D.-Y. Wang, Y.-J. Cui, B. Shi, and J. Li, "Tensile strength of fiber-reinforced soil," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. ۲۸, no. ۷, p. ۴۰۱۶۰۳۱, ۲۰۱۶.
- [۱۸] K. Roshan, A. J. Choobbasti, and S. S. Kutanaei, "Evaluation of the impact of fiber reinforcement on the durability of lignosulfonate stabilized clayey sand under wet-dry condition," *Transp. Geotech.*, p. ۱۰۰۳۵۹, ۲۰۲۰.
- [۱۹] S. S. Kutanaei and A. J. Choobbasti, "Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. ۳۰, no. ۶, pp. ۵۷۹-۵۹۳, ۲۰۱۵, doi: ۱۰.۱۰۸۰/۰۱۶۹۴۲۴۳, ۲۰۱۵, ۱۱۱۰۰۷۳.
- [۲۰] M. Hooresfand and A. Hamidi, "Influence of Fiber Reinforcement on Triaxial," pp. ۱-۷, ۲۰۱۱.

- [٣٨] K. H. Head and R. Epps, *Manual of soil laboratory testing*, vol. ٣. Pentech Press London, ١٩٨٦.
- [٣٩] N. C. Consoli and D. Foppa, "Porosity/cement ratio controlling initial bulk modulus and incremental yield stress of an artificially cemented soil cured under stress," *Géotech Lett*, vol. ٤, pp. ٢٢-٢٦, ٢٠١٤.
- [٤٠] H. MolaAbasi, M. Saberian, and J. Li, "Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite-cemented sand using porosity and composition," *Constr. Build. Mater.*, vol. ٢٠٢, pp. ٧٨٤-٧٩٥, ٢٠١٩.
- [٤١] N. C. Consoli, A. Viana da Fonseca, R. C. Cruz, and K. S. Heineck, "Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. ١٣٥, no. ٩, pp. ١٣٤٧-١٣٥٣, ٢٠٠٩.
- [٤٢] R. S. Ladd, "Specimen preparation and cyclic stability of sands," *J. Geotech. Eng. Div.*, vol. ١٠٣, no. ٦, pp. ٥٣٥-٥٤٧, ١٩٧٧.
- [٤٣] A. Standard, "D٣٩٦٧. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens," *Annu. B. ASTM Stand. Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA*, ١٩٩٥.
- [٤٤] N. C. Consoli, A. V. da Fonseca, R. C. Cruz, and S. R. Silva, "Voids/cement ratio controlling tensile strength of cement-treated soils," *J. Geotech. geoenvironmental Eng.*, vol. ١٣٧, no. ١١, pp. ١١٢٦-١١٣١, ٢٠١١.
- [٤٥] H. MolaAbasi and I. Shooshpasha, "Polynomial Models Controlling Strength of Zeolite-Cement Sand Mixtures," *Sci. Iran.*, vol. ٢٤, no. ٢, p. ٥٢٦, ٢٠١٧.
- [٤٦] K. Q. Tran, T. Satomi, and H. Takahashi, "Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. ١٧٨, pp. ٢٠٤-٢١٠, ٢٠١٨.
- [٤٧] N. C. Consoli, A. Dalla Rosa Johann, E. A. disposal of shredded facemask," *Transp. Geotech.*, vol. ٣٧, p. ١٠٠٨٧١, ٢٠٢٢.
- [٣٠] A. Standard D٢٤٨٧, "D٢٤٨٧ (٢٠١١) Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)," *ASTM Int. West Conshohocken, PA www. ASTM. org*, ٢٠١١.
- [٣١] A. Standard D٨٥٤, "D٨٥٤.(٢٠٠٥). 'Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer', ASTM International, West Conshohocken, PA, ٢٠٠٥, DOI: ١٠.١٥٢٠/D.٨٥٤-٠٥." ٢٠٠٥.
- [٣٢] D. ASTM, "٤٢٥٣," *Stand. test methods maximum index density unit Weight soils using a vibratory table*, ٢٠٠٠.
- [٣٣] A. Standard D٤٢٥٤, "D٤٢٥٤. ٢٠٠٦. Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. ASTM International, West Conshohocken, Pa." ٢٠٠٦.
- [٣٤] W. Khebbizi, N. Della, S. Denine, J. Canou, and J.-C. Dupla, "Undrained behaviour of polypropylene fibre reinforced sandy soil under monotonic loading," *Geomech. Geoenviron.*, vol. ١٤, no. ١, pp. ٣٠-٤٠, ٢٠١٩, doi: ١٠.١٠٨٠/١٧٤٨٦٠٢٥, ٢٠١٨, ١٥٠٨٨٥٥.
- [٣٥] N. C. Consoli, L. Festugato, and K. S. Heineck, "Strain-hardening behaviour of fibre-reinforced sand in view of filament geometry," *Geosynth. Int.*, vol. ١٦, no. ٢, ٢٠٠٩.
- [٣٦] I. Benessalah, M. Sadek, P. Villard, and A. Arab, "Undrained triaxial compression tests on three-dimensional reinforced sand: effect of the geocell height," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, pp. ١-١٢, ٢٠٢٠, doi: ١٠.١٠٨٠/١٩٦٤٨١٨٩, ٢٠٢٠, ١٧٢٨٥٨١.
- [٣٧] N. F. Ismael, "Influence of artificial cementation on the properties of Kuwaiti sands," *Kuwait J. Sci. Eng.*, vol. ٢٧, no. ١, pp. ٥٩-٧٦, ٢٠٠٠.

Gauer, V. R. Dos Santos, R. L. Moretto, and M. B. Corte, "Key parameters for tensile and compressive strength of silt-lime mixtures," *Geotech. Lett.*, vol. ۲, no. ۳, pp. ۸۱-۸۵, ۲۰۱۲, doi: ۱۰.۱۶۸۰/geolett.۱۲,۰۰۰۱۴.

مهندسی ژئوتکنیک