ارزیابی اثر افزودن رزین‌اپوکسی جهت تثبیت خاک ماسه‌ای تسلیح شده با الیاف پلی‌اتیلن

علی ایپک‌لو[۱] ، مسعود مکارچیان[۲*]

[۱] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی‌سینا، aliepak73@gmail.com
[۲] دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی‌سینا، makarchian@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸

کلمات کلیدی:
بهسازی خاک ماسه‌ای
تثبیت
مقاومت فشاری محدود نشده
رزین‌اپوکسی
الیاف پلی‌اتیلن

چکیده

خاک محل پروژه‌ها، اغلب فاقد خصوصیات ژئوتکنیکی لازم جهت اجرای پروژه است؛ از این‌رو اهمیت مطالعات مربوط به روش‌های بهسازی خاک آشکار می‌گردد. از جمله روش‌های بهسازی، می‌توان به تثبیت خاک با پلیمرهای مختلف و تسلیح با الیاف اشاره کرد. این پژوهش اثر توأم تثبیت و تسلیح خاک ماسه را با پلیمر رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن بر تراکم استاندارد و مقاومت فشاری محدود نشده بررسی می‌کند. در این‌راستا، رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن با درصدهای مختلف با ماسه مخلوط شده و آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌ها انجام شده است. همچنین، جهت بررسی زمان عمل‌آوری نمونه‌ها در ۴ دوره مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها، بیانگر آن است که افزودن رزین‌اپوکسی به نمونه‌ها تا ۶ درصد باعث افزایش مقاومت، کاهش کرنش نظیر گسیختگی و افزایش سختی نمونه‌ها شده است. همچنین افزودن الیاف پلی‌اتیلن تا درصد بهینه افزودنی به نمونه‌ها، سبب افزایش مقاومت فشاری محدود نشده، افزایش کرنش گسیختگی و کاهش سختی نمونه‌ها شده است.

Evaluation of the Effect of Adding Epoxy Resin for Stabilization of Sandy Soil Reinforced with Polyethylene Fibers

Ali Ipakloo[1], Masoud Makarchian[2*]

[1] M.Sc. Graduated, Geotrechnical Engineering, Civil Engineering Department, Bu-ali-Sina University; aliepak73@gmail.com
[2] Assistant Professor of Civil Engineering Department, Bu-ali Sina University; makarchian@basu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 2 Jan 2023
Accepted: 23 Apr 2024
Available online: 27 Apr 2024

Keywords:
Sandy soil improvement
Stabilization
Unconfined compressive strength
Epoxy resin
Polyethylene fibers

ABSTRACT

The soil of the civil projects often lacks the necessary geotechnical characteristics for the implementation of the project. Therefore, the importance of studies related to soil improvement methods is revealed. Some of the methods are soil stabilization with different polymers and reinforcement with fibers. This research examines the combined effect of stabilization and reinforcement of sandy soil with epoxy resin polymer and polyethylene fibers on standard density and unconfined compressive strength. In this regard, epoxy resin and polyethylene fibers are mixed with sand in different percentages and various tests have been performed on the samples. Also, to check the processing period, the samples were tested 4 times. The results of the tests indicate that adding epoxy resin to the samples up to 6% increased the strength, reduced the failure strain, and increased the stiffness of the specimens. Also, adding polyethylene fibers to the optimum percentage of additives to the specimens has increased the unconfined compressive strength, increased the failure strain, and decreased the stiffness of the specimens.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]

۱ - مقدمه

گسترش روزافزون نیاز جوامع بشری به ساخت و ساز، اهمیت مطالعات مربوط به بهبود کیفیت مهندسی خاک را آشکار می‌سازد. بخش وسیعی از خاک‌های ساحلی از نوع خاک‌های ماسه‌ای بوده و اصلاح خاک‌های ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده ضروری است. یکی از روش‌های متداول اصلاح خاک، تسلیح خاک است. اصلاح یا تثبیت خاک یک اصطلاح کلی برای هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژی[1] یا ترکیبی از آن‌ها است که جهت بهبود خواص خاک به‌کار می‌رود. تثبیت خاک به صورت خاص به فرآیندها و روش‌های مخلوط کردن و آمیختن موادی به خاک به‌منظور افزایش خواص معینی از آن اطلاق می‌گردد [1].

پلیمرها به‌علت برخورداری از وزن مخصوص کم، مقاومت زیاد، دوام زیاد، مقاومت در برابر عوامل شیمیایی و اندرکنش خوب آن‌ها با سایر مصالح می‌توانند کاربردهای زیادی را در پروژه‌های عمرانی به‌خصوص ژئوتکنیکی پیدا کنند. در این راستا مطالعات متعددی جهت بررسی افزودن پلیمر به خاک به‌عمل آمده که به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌گردد.

با مروری بر پژوهش‌های قبلی، این نکته معلوم می‌شود که تعداد پژوهش‌هایی که بر روی تثبیت‌کننده‌های سنتی انجام شده بسیار زیاد است؛ اما در مقایسه، تحقیقات و مدارک بسیار کمی در رابطه با تثبیت‌کننده‌های غیرسنتی وجود دارد. اُلدهام و همکاران بر روی سنتز تثبیت‌کننده‌های شناخته شده مختلف، تحقیقات کاملی انجام دادند (از سال ۱۹۴۶ تا ۱۹۷۷)؛ گزارش آنان نشان داد اسیدها، قیر، سیمان، آهک، رزین‌ها و نمک‌ها از جمله موادی هستند که دارای پتانسیل تثبیت‌کنندگی هستند. نتایج تحقیقات آنان، روش‌های اجرایی را بر حسب نوع خاک نشان می‌دهد. آنان به این نکته اشاره نمودند که مکانیزم عملکرد این تثبیت‌کننده‌ها، به عوامل ویژه‌ای از قبیل نمک‌ها با توجه به تناسب آن‌ها با شرایط آب و هوایی و اقلیمی بستگی داشته و رزین‌های پلیمری، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده خاک ماسه‌ای را بیش از همه افزایش داده است [2]. آجایی و همکاران مجموعه آزمایش‌هایی را برای تعیین اثرات تثبیت‌کننده‌ها بر روی خاک‌های سیلتی- رسی با ترکیب رزین‌اپوکسی و سخت‌کننده پلی‌آمید انجام دادند. ترکیب افزودنی، مخلوطی از رزین‌اپوکسی با سخت‌کننده پلی‌آمید به نسبت ۱ به ۱ بود. آنان به این نتیجه رسیدند که ترکیب بیش از ۴ درصد مواد تثبیت‌کننده در خاک‌های سیلتی-رسی، باعث افزایش ظرفیت باربری مواد در آزمایش *CBR*[2] به صورت غیرا شباع می شود. آنان گزارش کردند افزایش دمای محیط، باعث سرعت گیرش و شکل‌گیری مقاومت می‌شود [3]. استنلی و وات تحقیقی بر روی نتایج استفاده از پلیمرهای مایع به شکل اسپری در مقایسه با پوشش ژئوتکستایل[3] به‌عنوان وسیله‌های موقتی برای کمک به پایداری سطح و همین‌طور رویش دوباره گیاهان در خاک ماسه بادی ساحلی استرالیا انجام دادند. نتایج نشان داد که این تثبیت‌کننده‌ها، تاثیر مثبتی در سطوح مورد نظر داشتند [4]. وایتلی برای تثبیت خاک ماسه‌ای از اسیدهای آلی آبی قلیایی، به‌عنوان جایگزینی برای تثبیت خاک با زغال شکسته و پودر شده استفاده کرد. زمانی که این ماده بر روی خاک ماسه ناپایدار به میزان ۴ در صد ا ضافه شد، تثبیت شدگی دانه‌های خاک م شاهده شد؛ هر چند اضافه کردن همین نسبت از این ماده به ماسه ریخته‌گری، سبب تثبیت آن نشد، چون نیاز به کاربرد مقادیر بیشتری برای تثبیت دانه‌ها بود و در نتیجه مشاهده شد که پلیمر های محلول در آب، موثرتر از ز غال کلوی یدی، تن ها برای تثبیت‌کنندگی خاک ماسه‌ای بود [5]. لیو و همکاران تاثیر سه نوع الیاف مختلف بر روی خاک تثبیت شده با رزین پلی‌اُرتان را بررسی کردند. نتایج آنان نشان دهنده تاثیر الیاف بر روی مقاومت فشاری محدود نشده در هر سه نوع الیاف بود. این افزایش مقاومت فشاری محدود نشده، ممکن است با نحوه قرارگیری الیاف که با جهت اصلی کرنش کششی در زمان آماده‌سازی نمونه موازی است، مرتبط باشد [6]. همچنین آنان در تحقیق دیگری تاثیر الیاف شیشه را بر روی خاک ماسه تثبیت شده با پلی‌اُرتان بررسی کرده‌اند که این تحقیق نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری محدود نشده با افزایش درصد افزودنی پلی‌اُرتان و الیاف شیشه است. همچنین با افزایش تراکم نمونه‌ها مقاومت فشاری محدود نشده نمونه و مدول ارتجاعی آن‌ها افزایش یافته است [7]. در تحقیق دیگری که توسط حسین و علی بر روی چندین خاک اصلاح شده با الیاف پلی‌پروپیلن انجام شده است، مشاهده شد که با افزایش دو درصد الیاف به خاک، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده در حدود دو برابر می شود، همچنین کرنش گسیختگی نیز دو درصد افزایش یافته است [8].

حال با توجه به این که اغلب خاک‌های ساحلی ایران از جنس ماسه بوده و تثبیت این خاک‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد، تثبیت خاک ماسه ساحلی با استفاده از پلیمرها که مقاومت زیادی در مقابل عوامل شیمیایی و آب دارند، می‌تواند باعث افزایش مقاومت و کیفیت تثبیت خاک‌های ساحلی گردد. از ین رو در این تحقیق از پلیمرها به‌عنوان اصلاح‌کننده ماسه استفاده گردیده است.

۲ – مواد و روش‌های مورد استفاده

در این بخش، مواد و روش‌های آزمای شگاهی ا ستفاده شده در این تحقیق شرح داده می‌شود. در ابتدا، مشخصات مواد و مصالح مورد

[1] Biology
[2] California Bearing Ratio
[3] Geotextile

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]

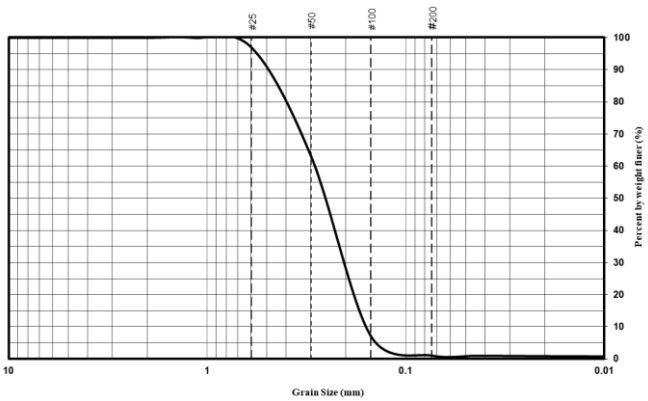
استفاده ارائه شده است. در ادامه، ضمن تشریح رویه آزمایش‌ها و محاسبات مربوط، ترکیب اختلاط نمونه‌های مختلف توضیح داده شده است.

۲-۱- مواد و مصالح

ماسه، رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن مصالح مورد استفاده در این تحقیق هستند که در ادامه این بخش، خصوصیات هرکدام از آن‌ها توضیح داده می‌شود.

۲-۱-۱- ماسه

خاک مورد استفاده در این پژوهش براساس سیستم طبقه‌بندی متحد، ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) است. این ماسه از شرکت تامین ماسه ریخته‌گری فیروزکوه با کد تجاری ۱۶۱ تهیه شده است. در شکل ۱ منحنی دانه‌بندی خاک مورد نظر نشان داده شده است. همچنین جداول ۱ و ۲ نشان دهنده مشخصات مکانیکی و شیمیایی خاک هستند.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه

جدول ۱- مشخصات مکانیکی خاک مورد استفاده

خصوصیت خاک	مقدار
C_C	۰/۹۵
C_U	۱/۸۷
رده خاک در طبقه‌بندی متحد	SP
وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)	۱۶/۲۲
درصد رطوبت بهینه (٪)	۱۵/۷۵
درصد رطوبت طبیعی (٪)	۰
دانسیته نسبی دانه‌ها	۲/۶۹

جدول ۲- مشخصات شیمیایی خاک ماسه مورد استفاده

کانی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O
درصد	۹۸/۱	۱/۱	۰/۳	۰/۲	۰/۱۵	۰/۱

۲-۱-۲- رزین‌اپوکسی

در این پژوهش از رزین‌اپوکسی با نام تجاری KER828، ساخت کشور کره جنوبی به‌عنوان ماده تثبیت‌کننده استفاده شده است. این ماده از خانواده رزین‌های دوجزیی بوده که شامل پایه رزینی و سخت‌کننده است. این دو جزء باید به نسبت مشخص، بنابر فرمولاسیون و کاربرد آن، با یکدیگر مخلوط شوند و سپس مورد استفاده قرار گیرد. رزین‌اپوکسی KER828، رزین‌اپوکسی مایع با گرانروی متوسط است و در آن از هیچ رقیق‌کننده‌ای استفاده نشده است. این ماده پلیمری، پس از سخت شدن، دارای استحکام مکانیکی و شیمیایی زیادی است. مشخصات فیزیکی و ظاهری این رزین‌اپوکسی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و ظاهری رزین اپوکسی

شکل ظاهری	رنگ	گرانروی (Pa.s)	جرم مخصوص (gr/cm^3)	pH
مایع	بی‌رنگ	۱۴-۱۲	۱/۱۶	۷

۲-۱-۳- الیاف پلی‌اتیلن

هر عنصری که دارای مقاومت کششی بوده و بتواند ضمن سازگاری فیزیکی و شیمیایی با محیط خاک موجب افزایش مقاومت کششی و برشی آن گردد، می‌تواند به‌عنوان عنصر تسلیح‌کننده در خاک مورد استفاده قرارگیرد. الیاف به‌کار رفته در این پژوهش، الیاف پلی‌اتیلن است. پلی‌اتیلن یک پلیمر ترموپلاست و از خانواده پلی‌استرها است. پلی‌اتیلن پلیمری با شاخه‌های بلند است. شکل ۲ نشان دهنده الیاف مورد استفاده در پژوهش است.

شکل۲- الیاف مورد استفاده

جدول ۴- مشخصات فیزیکی و ظاهری الیاف پلی‌اتیلن

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]

شکل ظاهری	جرم مولکولی (gr/mol)	نقطه ذوب (°C)	جرم مخصوص (gr/cm^3)
جامد	۱۵۰۰۰-۲۰۰۰۰	۲۵۵	۱/۰۸

۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

آزمایش مقاومت فشـــاری محدود نشـــده، به‌منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه ا ستوانه‌ای خاک بدون هیچ‌گونه تنش جانبی صورت می‌گیرد. این آزمایش رفتار نمونه را در حالت مشـــابه آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده بررسی می‌کند.

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در دو حالت کرنش کنترل شده یا تنش کنترل شده انجام می‌شود. در این تحقیق، از روش کرنش کنترل شده با سرعت بارگذاری یک میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری کرنش نمونه‌ها در این دستگاه از جابجایی‌سنج الکترونیکی (LVDT[4]) با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شده است.

جهت ساخت نمونه‌ها، نیاز به تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر بوده که جهت تعیین آن، آزمایش تراکم استاندارد انجام شد و با توجه به نتایج، مقدار درصد رطوبت هر نمونه مشخص شد. همچنین از لوله UPVC با قطر داخلی ۳۶ میلی‌متر و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر به‌عنوان قالب نمونه‌سازی استفاده شد. قطر نمونه‌های ساخته شده ۳۶ میلی‌متر و ارتفاع آن‌ها ۸۰ میلی‌متر است که نسبت طول به قطر نمونه‌ها در محدوده استاندارد شماره ASTM D 2166M-16 که این مقدار را بین ۲ تا ۲/۵ محدود کرده است بوده، همچنین بزرگ‌ترین اندازه دانه‌ها، ۱/۲ میلی‌متر بوده که از ۰/۱ قطر نمونه کمتر است [9].

در ادامه مراحل ساخت، میزان خاک، رزین‌اپوکسی، الیاف پلی‌اتیلن و آب توزین شد. سپس رزین‌اپوکسی با خاک به‌خوبی مخلوط گردید تا نمونه همگن گردد، در ادامه الیاف پلی‌اتیلن با استفاده از قیچی به طول‌های ۱۰ میلی‌متر کوتاه شده و به‌مرور به خاک اضافه و مخلوط شد، تا به‌خوبی با خاک همگن گردد. پس از اختلاط کامل الیاف و خاک، درصد رطوبت مورد نظر اضافه و همگن شد. جهت خروج راحت‌تر نمونه از داخل قالب، قسمت داخلی قالب به وازلین آغشته شد. سپس جهت ساخت نمونه همگن با تراکم مناسب، مقدار خاک مورد نیاز یک نمونه، به چهار قسمت تقسیم شده و به‌صورت لایه‌لایه درون قالب ریخته شد. پس از آن با استفاده از چکش لاستیکی و میله تفلونی مدرج (شکل ۳) هر لایه به میزان ۲۰ میلی‌متر کوبیده شد. در این مرحله تلاش شد که تا حد امکان تعداد ضربات وارده به لایه‌های پایین‌تر کمتر بوده تا تراکم در همه لایه‌ها یکسان گردد و قبل از کوبیدن هر لایه جدید، با ایجاد خراش در سطح لایه قبلی، درگیری مناسبی بین لایه‌ها ایجاد شود. جهت عمل‌آوری، نمونه‌ها ابتدا با قالب UPVC به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده، سپس با کمک جک موجود (شکل ۳) از داخل قالب خارج شده و پس از پیچیدن سلفون به مدت مشخص درون آون در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

شکل ۳- وسایل لازم جهت ساخت نمونه و نمونه‌های ساخته شده

۱-۲-۲-ترکیب نمونه‌های مورد آزمایش

در این تحقیق، رزین‌اپوکسی با مقادیر مختلف ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد و الیاف پلی‌اتیلن با نسبت وزنی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ درصد به خاک اضافه شد. همچنین، زمان عمل‌آوری نمونه‌ها ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز بوده است. لازم به‌ذکر است که برای هر ترکیب اختلاط، ۳ نمونه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته شده و میانگین نتایج حاصل به‌عنوان جواب نهایی گزارش شده است. چنانچه اختلاف نتایج بیش از ۱۰ درصد بود، نمونه چهارم نیز ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. طرح اختلاط نمونه‌ها و وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- طرح اختلاط نمونه‌ها

نام طرح	درصد الیاف پلی‌اتیلن (٪)	درصد رزین اپوکسی (٪)	درصد رطوبت بهینه (٪)	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)
S	۰	۰	۱۵/۷۵	۱۶/۲۲
S-0.2PE	۰/۲	۰	۱۴/۹۹	۱۵/۸۰
S-0.4PE	۰/۴	۰	۱۶/۳	۱۶/۰۸
S-0.6PE	۰/۶	۰	۱۴/۱۹	۱۵/۸۱

[4] Linear Variable Differential Transformer

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]

S-0.8PE	۰/۸	۰	۱۳/۷	۱۵/۶۰
S-2E	۰	۲	۱۴/۲۵	۱۶/۸۳
S-2E-0.2PE	۰/۲	۲	۱۴/۳۶	۱۶/۵۹
S-2E-0.4PE	۰/۴	۲	۱۵/۵	۱۶/۵۵
S-2E-0.6PE	۰/۶	۲	۱۳/۸	۱۶/۳۶
S-2E-0.8PE	۰/۸	۲	۱۳/۴	۱۶/۱۹
S-4E	۰	۴	۱۳/۹	۱۷/۲۲
S-4E-0.2PE	۰/۲	۴	۱۳/۹	۱۷/۱۳
S-4E-0.4PE	۰/۴	۴	۱۴/۳	۱۶/۷۷
S-4E-0.6PE	۰/۶	۴	۱۳/۹	۱۶/۶۶
S-4E-0.8PE	۰/۸	۴	۱۳/۲	۱۶/۵۲
S-6E	۰	۶	۱۳/۲	۱۷/۴۳
S-6E-0.2PE	۰/۲	۶	۱۳/۰۵	۱۷/۳۵
S-6E-0.4PE	۰/۴	۶	۱۳/۱	۱۷/۰۲
S-6E-0.6PE	۰/۶	۶	۱۲/۶	۱۷/۰۲
S-6E-0.8PE	۰/۸	۶	۱۳/۱	۱۶/۹۰
S-8E	۰	۸	۱۲/۶۴	۱۷/۶۹
S-8E-0.2PE	۰/۲	۸	۱۲/۹	۱۷/۵۸
S-8E-0.4PE	۰/۴	۸	۱۲/۹	۱۷/۲۳
S-8E-0.6PE	۰/۶	۸	۱۲/۶	۱۷/۲۱
S-8E-0.8PE	۰/۸	۸	۱۲/۴	۱۷/۰۹

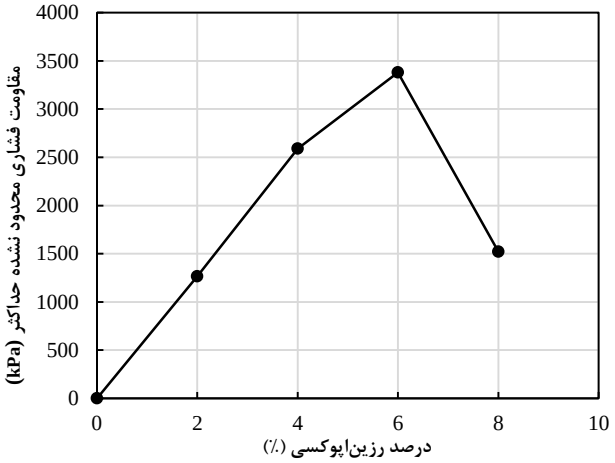
* S: خاک
* PE: الیاف پلی‌اتیلن
* E: رزین‌اپوکسی

۳ – نتایج

در این بخش، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده برای نمونه‌ها ارائه می‌شود. جهت اختصار در نام‌گذاری نمونه‌ها، حروف E و PE به‌ترتیب نشان دهنده درصد رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن است. همچنین، زمان عمل‌آوری برای نمونه‌ها با علامت اختصاری D مشخص شده است.

۳-۱- تاثیر رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن بر حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده خاک ماسه

در این بخش، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه‌های دارای مقادیر مختلف افزودنی ارائه شده است. تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده برای خاک تثبیت شده با رزین‌اپوکسی در مقادیر مختلف (۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد) در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در صورت عدم وجود رزین‌اپوکسی، با توجه به این که ماسه توانایی تحمل هیچ‌گونه مقاومت فشاری محدود نشده‌ای را ندارد، مقدار مقاومت فشاری در این حالت صفر است؛ ولی با افزودن تنها ۲ درصد رزین‌اپوکسی مقاومت خاک به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت تا ۶ درصد رزین‌اپوکسی به‌صورت صعودی بوده و پس از آن با افت شدیدی کاهش می‌یابد. در نمونه‌های دارای ۸ درصد رزین‌اپوکسی به‌نظر می‌رسد که دانه‌های خاک از هم جدا شده و حضور بیش از اندازه رزین‌اپوکسی باعث می‌شود که شکست ایجاد شده در نمونه در این ماده اتفاق بیفتد که این اتفاق سبب کاهش شدید مقاومت می‌شود. در صورت استفاده از ۲ درصد رزین‌اپوکسی، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده ۱۲۶۵ کیلوپاسکال است که این میزان با افزایش رزین‌اپوکسی به ۶ درصد به ۳۳۷۹ کیلوپاسکال رسیده است که نشان دهنده افزایش ۱۶۷ درصدی در مقاومت فشاری محدود نشده است. همچنین در صورت استفاده از ۸ درصد رزین‌اپوکسی، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده به ۱۵۲۰/۰۸ کیلوپاسکال می‌رسد و به نسبت ۶ درصد رزین‌اپوکسی، ۵۵ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۴- تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده حداکثر بر حسب درصد رزین‌اپوکسی

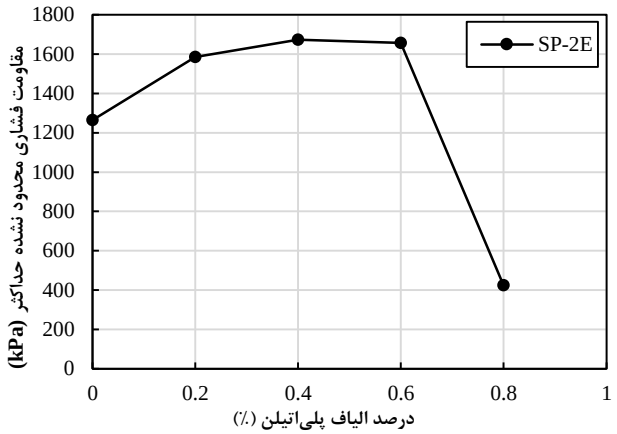
نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه‌های دارای الیاف پلی‌اتیلن در درصدهای ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ درصد در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به عدم مقاومت خاک تثبیت شده با الیاف پلی‌اتیلن، انجام این آزمایش‌ها نیازمند حضور ۲ درصد رزین‌اپوکسی است. همچنین زمان عمل‌آوری در این نمونه‌ها ۱۴ روز است. با توجه به شکل، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده، با افزایش درصد الیاف افزایش می‌یابد که این افزایش محدود است. افزودن الیاف تا ۰/۶ درصد، باعث افزایش مقاومت فشاری محدود نشده گردیده و با افزایش مقدار الیاف، مقاومت فشاری محدود نشده افت می‌کند. به‌نوعی می‌توان به این موضوع اشاره کرد که با اضافه کردن مسلح‌کننده، سطح تماس و درگیری بیشتری بین ذرات رخ می‌دهد که این می‌تواند باعث افزایش و مقاومت کششی خاک گردد. همچنین در صورت استفاده از ۰/۲ درصد الیاف، مقاومت فشاری محدود نشده به نسبت عدم وجود الیاف، ۲۵ درصد افزایش یافته است، حال اگر به‌جای ۰/۲ درصد الیاف، از ۰/۶ درصد استفاده شود، این افزایش به میزان ۳۱ درصد خواهد بود که نشان دهنده تاثیر محدود افزایش الیاف پلی‌اتیلن است. باتوجه به افت ناگهانی مقاومت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]

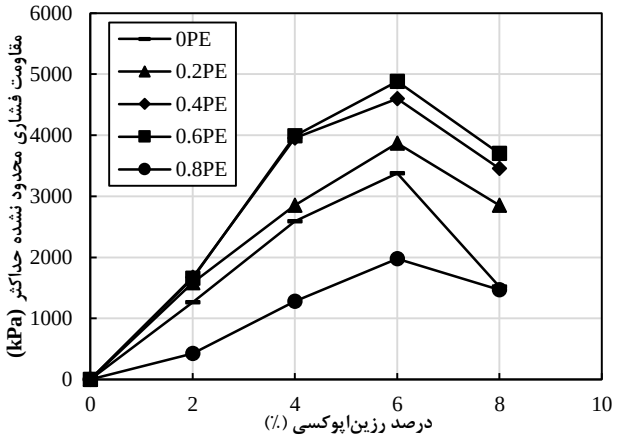
درصورت افزایش درصد الیاف و همچنین مشکلات ناشی از افزایش درصد الیاف در هنگام ساخت نمونه مانند مشکل در اختلاط نمونه، به‌نظر می‌رسد که استفاده از الیاف در درصدهای ۰/۲ و ۰/۴ بهینه باشد.

این نتایج با نتایجی که توسط لیو و همکاران بر روی الیاف مختلف انجام شده است، مطابقت داشته و مشاهده میشود که با افزایش درصد الیاف مختلف مقاومت فشاری محدود نشده و کرنش گسیختگی افزایش یافته است [10].



شکل ۵- تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده حداکثر بر حسب درصد الیاف پلی‌اتیلن در حضور ۲ درصد رزین‌اپوکسی

شکل ۶ نشان دهنده تاثیر اصلاح خاک ماسه با استفاده از دو افزودنی رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن است. پلیمر رزین‌اپوکسی در درصدهای ۲، ۴، ۶ و ۸ و الیاف پلی‌اتیلن در درصدهای ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، و ۰/۸ مورد استفاده قرار گرفته است. زمان عمل‌آوری ۱۴ روز بوده و نمونه‌ها در تراکم استاندارد ۱۰۰ درصد ساخته شده‌اند. با توجه به شکل می‌توان برداشت نمود که در تمامی درصدها با افزایش هر یک از افزودنی‌ها تا محدوده مشخص، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد.



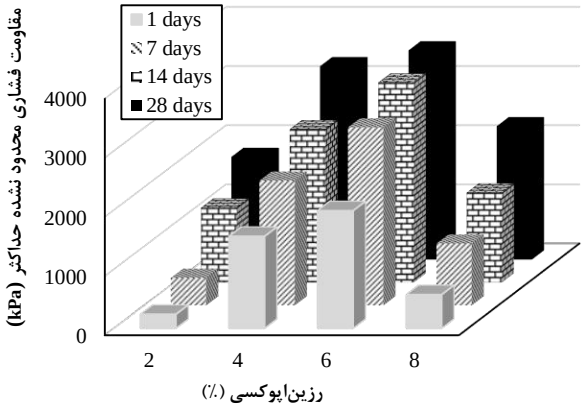
شکل ۶- تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده حداکثر بر حسب درصد رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن

این افزایش مقاومت فشاری محدود نشده تا محدوده مشخصی از افزودنی، با شیب یک‌نواختی بوده و با عبور از مقدار بهینه افزودنی، با شیب بیشتری کاهش می‌یابد.

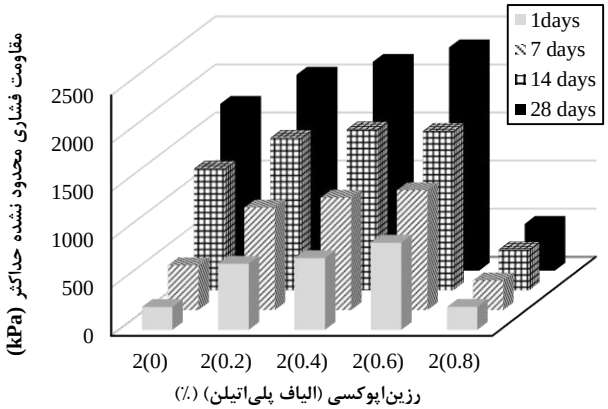
۳-۲- بررسی تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده

در این بخش تاثیر زمان عمل‌آوری نمونه بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک بررسی می‌شود. زمان عمل‌آوری در تمامی حالت‌ها ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز است.

شکل‌های ۷ تا ۹ نشان دهنده تاثیر زمان عمل‌آوری بر خاک تثبیت شده با رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن است.



شکل ۷- تاثیر زمان عمل‌آوری بر روی خاک ماسه تثبیت شده با رزین‌اپوکسی

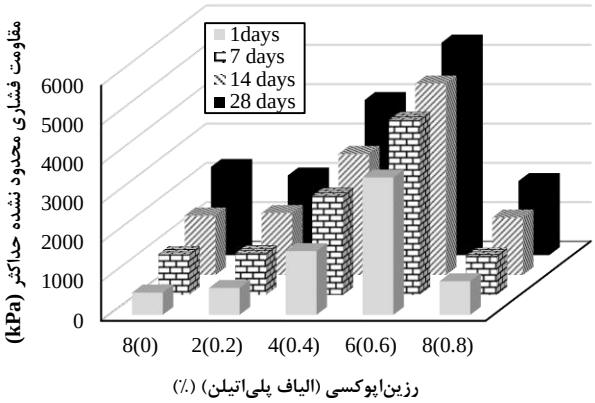


شکل ۸- تاثیر زمان عمل‌آوری بر روی خاک ماسه اصلاح شده با ۲ درصد رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن

با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که در صورت تثبیت خاک با رزین‌اپوکسی در درصدهای مختلف و با افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده نیز با شیب یک‌نواختی افزایش می‌یابد. به‌طوری که با افزایش زمان عمل‌آوری از ۱ روز به ۲۸ روز، مقاومت فشاری محدود نشده خاک با ۶ درصد رزین‌اپوکسی از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]

۱۹۸۸ کیلوپاسکال به ۳۵۳۶ کیلوپاسکال می‌رسد که نشان دهنده افزایش ۷۸ درصدی در مقاومت است.



شکل ۹- تاثیر زمان عمل‌آوری بر روی خاک ماسه تثبیت شده با رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن به‌صورت همزمان

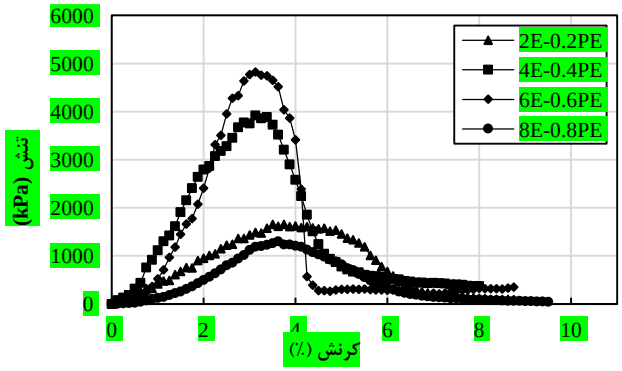
همچنین بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری محدود نشده در روزهای ابتدایی عمل‌آوری است و پس از گذشت ۱۴ روز مقاومت فشاری محدود نشده با شیب کمتری نسبت به ۱۴ روز ابتدایی افزایش می‌یابد؛ به‌طوری که در ۱۴ روز دوم این افزایش مقاومت ۴/۶ درصد است؛ این افزایش مقاومت فشاری محدود نشده در طول زمان، به دلیل انجام فرآیندهای پلیمریزاسیون توسط رزین‌اپوکسی در نمونه است.

همچنین در صورت اصلاح خاک با الیاف پلی‌اتیلن، افزایش مقاومت با افزایش زمان عمل‌آوری به نسبت تثبیت با رزین‌اپوکسی بیشتر بوده (شکل ۸)، به‌طوری که در حضور ۰/۶ درصد الیاف پلی‌اتیلن در زمان عمل‌آوری، ۲۸ روزه مقاومت فشاری محدود نشده ۲۳۲۱ کیلوپاسکال است که نسبت به عمل‌آوری یک روزه ۱۵۶ درصد افزایش مقاومت داشته که این مقاومت از ۱ تا ۲۸ روز با شیب یکنواختی افزایش یافته است.

حال در صورت استفاده از دو اصلاح‌کننده به‌صورت همزمان طبق شکل ۹، در بهترین حالت از نظر افزایش مقاومت (2E-0.2PE) مقاومت فشاری محدود نشده از زمان عمل‌آوری ۱ تا ۲۸ روزه ۱۹۶ درصد افزایش یافته است که این مقدار در بدترین حالت (6E-0.6PE) برابر با ۵۴ درصد است که نشان دهنده تاثیر بیشتر زمان عمل‌آوری بر روی خاک با مقاومت کمتر به نسبت خاک مقاوم‌تر است.

۳-۳- بررسی خصوصیات منحنی تنش-کرنش

با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، تغییرات تنش بر حسب کرنش برای نمونه‌های مختلف در این بخش ارائه شده است. شکل ۱۰ منحنی تنش-کرنش نمونه‌های دارای درصدهای مختلف رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن را در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه نشان می‌دهد. حضور هم‌زمان هر دو افزودنی در نمونه، علاوه بر تاثیر بر روی مقاومت فشاری محدود نشده، باعث کاهش کرنش گسیختگی می‌گردد. به‌طوری که در صورت افزایش افزودنی از حالت 2E-0.2PE به حالت 6E-0.6PE میزان کرنش گسیختگی از ۳/۵۰ درصد به ۳/۱۲ درصد کاهش یافته است. این کاهش کرنش گسیختگی نشان دهنده تاثیر بیشتر رزین‌اپوکسی به نسبت الیاف پلی‌اتیلن است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش درصد افزودنی مقدار مقاومت نهایی نمونه افزایش یافته است که دلیل این افزایش، مقاومت کششی الیاف پلی‌اتیلن است.



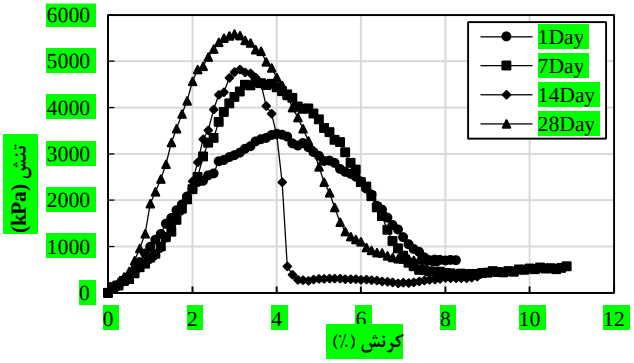
شکل ۱۰- منحنی تنش-کرنش نمونه‌های دارای درصدهای مختلف رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن

با توجه به این که مساحت زیر منحنی تنش-کرنش، معرف طاقت نمونه است، با افزایش درصد افزودنی سطح زیر منحنی نیز افزایش یافته است. به بیان دیگر، نمونه‌ها دارای طاقت بیشتری نسبت به حالت بدون افزودنی بوده و قبل از گسیختگی انرژی بیشتری جذب می‌کنند. در نمونه‌های دارای الیاف پلی‌اتیلن، پس از رسیدن نمونه به مقاومت نهایی، ترک‌هایی رخ می‌دهد. در این مرحله به دلیل پل‌زدن ذرات الیاف پلی‌اتیلن بین نقاط ترک، خاک ساختار کلی خود را حفظ می‌کند. بنابراین، نمونه با سرعت کمتری به گسیختگی نهایی می‌رسد. اصطکاک و چسبندگی بین خاک و ذرات الیاف پلی‌اتیلن از عریض‌تر شدن ترک‌ها جلوگیری کرده و به‌صورت نیروی کششی به الیاف پلی‌اتیلن منتقل و توسط آن‌ها تحمل می‌شود [11]. شکل ۱۱ نشان دهنده تاثیر زمان عمل‌آوری در درصدهای مشخص از افزودنی بر روی منحنی تنش-کرنش است.

مدت زمان عمل‌آوری، تاثیر قابل توجهی بر مقاومت نمونه‌ها داشته است، به‌طوری که بیش از ۵۰ درصد مقاومت نمونه‌ها در ۷ روز اول به‌دست آمده است. در واقع در روز اول عمل‌آوری به‌دلیل وجود رطوبت در نمونه، فرآیند شبکه‌سازی پلیمری در نمونه انجام نشده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]

و با افزایش زمان عمل‌آوری و کاهش رطوبت خاک، این فرآیند اتفاق افتاده و سبب افزایش مقاومت در نمونه می‌شود.



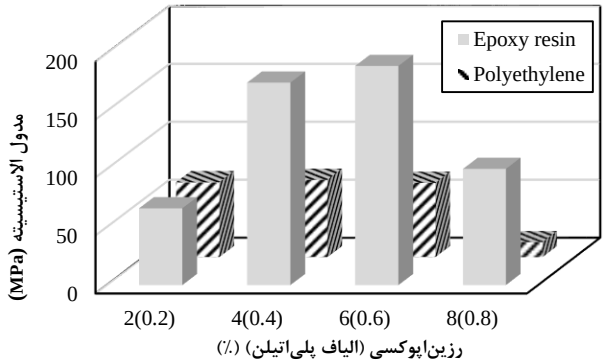
شکل ۱۱- منحنی تنش-کرنش نمونه‌های دارای ۶ درصد رزین‌اپوکسی و ۰/۶ درصد الیاف پلی‌اتیلن در زمان‌های عمل‌آوری مختلف

با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تغییرات مقاومت تا ۱۴ روز اول محسوس بوده و پس از این مدت، روند کسب مقاومت با گذشت زمان کاهش یافته است که نشان دهنده تکمیل فرآیند پلیمریزاسیون است. همچنین در صورت استفاده از افزودنی رزین‌اپوکسی مشاهده می‌شود که علاوه‌بر افزایش تدریجی مقاومت حداکثر نمونه‌ها، کرنش متناظر با نقطه اوج نیز به‌تدریج کاهش یافته است. این امر نشانگر افزایش سختی نمونه‌ها با گذشت زمان عمل‌آوری است. هم‌چنین با افزودن الیاف به نمونه، مقدار کرنش گسیختگی در زمان عمل‌آوری تغییری نمی‌کند که به دلیل حفظ رطوبت در داخل الیاف است که باعث جلوگیری از انجام کامل فرآیند پلیمریزاسیون می‌شود.

در این راستا، پژوهش انجام‌شده توسط محمدی (۱۳۹۷) که بر روی خاک ماسه لای‌دار انجام شده است، نیز نشان دهنده صحت این موضوع است. در این پژوهش مشخص شد که با افزایش درصد رزین‌اپوکسی در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت، سختی خاک افزایش یافته و کرنش متناظر با نقطه اوج نیز به‌تدریج کاهش یافته است [12].

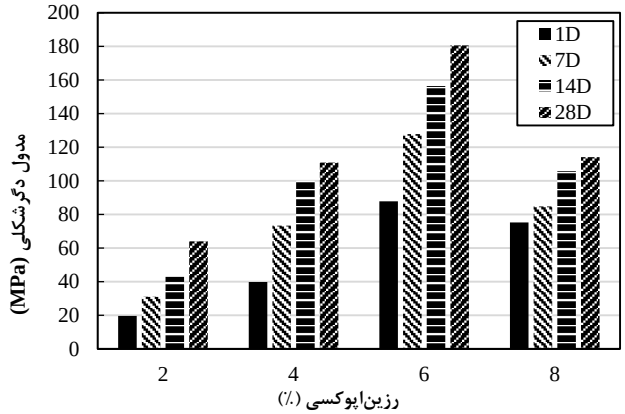
۳-۴- بررسی تاثیر افزودنی بر روی مدول الاستیسیته

سختی یک ماده، بیانگر چگونگی مقاومت آن در برابر تغییر شکل‌های اعمالی است. برای برآورد میزان سختی مواد، از انواع مدول‌های الاستیسیته و برشی استفاده می‌شود. مدول الاستیسیته مصالح بر اساس منحنی تنش-کرنش آن‌ها و با روش‌های مختلف قابل تعیین است [13]. در این پژوهش برای بررسی تغییرات سختی نمونه‌ها از مدول الاستیسیته (E) استفاده شده است. شکل ۱۲ نشان دهنده تاثیر افزایش دو افزودنی بر مدول الاستیسیته است. با افزایش درصد رزین‌اپوکسی، مدول دگرشکلی نیز افزایش یافته است که این به‌معنی افزایش سختی نمونه و ایجاد شکست ناگهانی در نمونه است؛ ولی در صورت افزایش رزین‌اپوکسی از ۶ درصد به ۸ درصد، مدول دگرشکلی کاهش می‌یابد که این کاهش در اثر کاهش چشم‌گیر مقاومت نمونه است. با افزایش درصد الیاف، مدول دگرشکلی با شیب کمی افزایش می‌یابد. این افزایش مدول دگرشکلی که در درصد بهینه الیاف اتفاق می‌افتد، ناشی از افزایش مقاومت حداکثر در نمونه است که ناشی از عملکرد بهتر الیاف در این درصد به نسبت درصدهای دیگر است. در صورت افزودن ۰/۸ درصد الیاف پلی‌اتیلن، مدول دگرشکلی کاهش شدیدی داشته که به سبب افزایش کرنش گسیختگی و کاهش مقاومت حداکثر است.



شکل ۱۲- تاثیر افزایش درصد رزین‌اپوکسی و الیاف پلی‌اتیلن بر مدول الاستیسیته

شکل ۱۳ نشان دهنده تاثیر زمان عمل‌آوری بر روی مدول الاستیسیته است. با توجه به شکل برداشت می‌شود که با افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار مدول الاستیسیته افزایش یافته است که نشان دهنده افزایش سختی نمونه با گذشت زمان است. این اتفاق به‌سبب انجام کامل واکنش‌های پلیمریزاسیون در رزین‌اپوکسی است.



شکل ۱۳- تاثیر زمان عمل‌آوری در درصدهای مختلف رزین‌اپوکسی بر مدول الاستیسیته

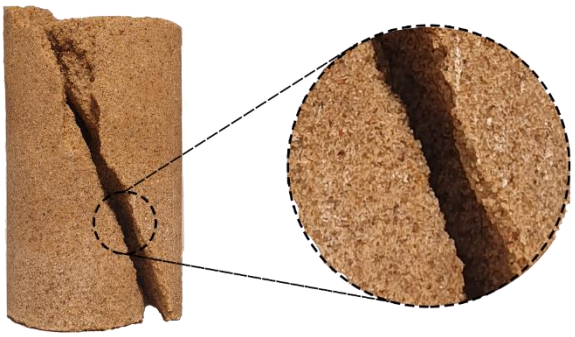
۳-۵- بررسی نحوه شکست نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

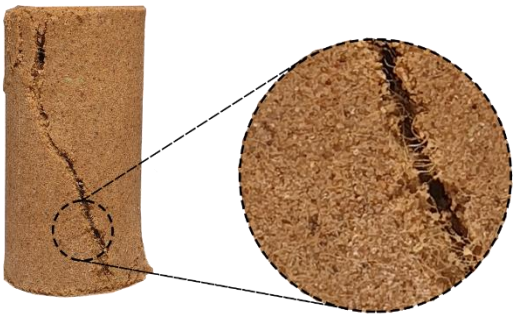
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]

هنگامی که به نمونه نیروی فشاری وارد می‌شود؛ ارتفاع نمونه کاهش و قطر آن افزایش می‌یابد. با افزایش قطر نمونه، اصطکاک بین ذرات خاک و ذرات الیاف پلی‌اتیلن موجود در خاک سبب ایجاد کشش در ذرات پلی‌اتیلن می‌شود. با افزایش تنش به خاک، گسیختگی از نقاط ضعیف‌تر شروع شده و به‌تدریج گسترش می‌یابد. با آغاز ترک‌ها، ذرات الیاف پلی‌اتیلن بین دو قسمت مجاور در ترک، پل زده و مانع از گسترش سریع ترک‌ها و افزایش فاصله آن‌ها می‌گردد. بنابراین، نمونه پس از ترک‌خوردگی می‌تواند بدون از هم‌پاشیدگی، کرنش بیشتری تحمل کرده و مقاومت خود را به‌سرعت از دست ندهد. در نمونه‌های با الیاف تصادفی، به‌دلیل حضور الیاف در کل نمونه، توزیع تنش به‌جای تمرکز در چند سطح گسیختگی معدود، در فضای سه‌بعدی بزرگ‌تری پخش می‌شود. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان دهنده نمونه‌های شکسته شده در درصدهای مختلف الیاف پلی‌اتیلن است. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در صورت عدم وجود الیاف، گسیختگی نمونه آنی بوده و به‌سرعت مقاومت خود را از دست می‌دهد؛ همچنین نحوه شکست نمونه به‌صورت ۴۵ درجه بوده و تعداد ترک‌های به‌وجود آمده در نمونه محدود است.

در صورت افزودن ۰/۴ درصد الیاف، نمونه نرم‌تر شده و الیاف پلی‌اتیلن باعث افزایش کرنش گسیختگی می‌شوند (شکل ۱۵)، ولی هم‌چنان شکست نمونه به‌صورت ۴۵ درجه بوده و ترک‌های بیشتری به نسبت نمونه فاقد الیاف در نمونه حادث می‌شود.



شکل ۱۴- نحوه شکست نمونه تثبیت شده با رزین‌اپوکسی فاقد الیاف پلی‌اتیلن



شکل ۱۵- نحوه شکست نمونه اصلاح شده با رزین‌اپوکسی و ۰/۴ درصد الیاف پلی‌اتیلن

۴ – نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا تاثیر افزودنی‌های پلیمری بر روی وزن مخصوص و رطوبت خاک بررسی شده سپس رفتار مقاومت فشاری محدود نشده خاک ماسه تثبیت شده با رزین‌اپوکسی و تسلیح شده با الیاف پلی‌اتیلن (در دو حالت تثبیت و تسلیح همزمان) مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه اثر افزایش زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک مطالعه شد.

نتایج اندازه‌گیری‌های مقاومت فشاری محدود نشده نشان می‌دهد که افزودن رزین‌اپوکسی به خاک تا مقدار ۶ درصد، سبب افزایش مقاومت خاک شده، این افزایش مقاومت فشاری محدود نشده، در حدود ۲۰۰ درصد بیشتر نسبت به نمونه خاک با دو درصد رزین‌اپوکسی است و افزایش رزین‌اپوکسی به خاک در مقادیر بیشتر از ۶ درصد، باعث کاهش مقاومت خاک می‌شود. افزودن الیاف پلی‌اتیلن به‌تنهایی به خاک ماسه، هیچ تغییری در مقاومت فشاری محدود نشده ایجاد نمی‌کند و لازمه اصلاح خاک ماسه به‌وسیله الیاف پلی‌اتیلن وجود ماده چسباننده مانند رزین‌اپوکسی است. در صورت افزایش زمان عمل‌آوری خاک تثبیت شده با رزین‌اپوکسی، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت در ۱۴ روز ابتدایی در حدود ۲/۳ برابر بوده و پس از آن با شیب کمتری افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش مقاومت، انجام فرآیندهای پلیمریزاسیون در رزین‌اپوکسی بوده و پس از اتمام این فرآیند، مقاومت فشاری محدود نشده به مقدار حداکثر خود می‌رسد همچنین زمان عمل‌آوری، هیچ‌گونه تاثیری بر روی مقاومت فشاری محدود نشده خاک مسلح شده با الیاف پلی‌اتیلن نداشته و افزایش اندک مقاومت فشاری محدود نشده نیز به‌دلیل حضور رزین‌اپوکسی و انجام فرآیند پلیمریزاسیون در خاک است.

بر طبق نتایج، افزودن رزین‌اپوکسی به خاک سبب افزایش سختی و مدول‌ارتجاعی نمونه‌ها و کاهش کرنش گسیختگی و طاقت آن‌ها شده است. نمونه‌های تثبیت شده رفتار تردی داشته و بعد از گسیختگی مقاومت خود را به‌سرعت از دست می‌دهند. از این رو سختی ایجاد شده و کاهش کرنش گسیختگی حادث شده توسط افزودن رزین‌اپوکسی به خاک را می‌توان با استفاده از الیاف پلی‌اتیلن جبران نمود.

۵ - مراجع

1- Tabatabai A M. *Road Pavement*. University Publishing Center of Tehran (In Persian); 2003.

2- Oldham J C, Eaves R C, White Jr D W. Materials evaluated as potential soil stabilizers (No. WES-MP-S-77-15). *Army Engineer Waterways Experiment Station*, Vicksburg MS. 1977

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]

3- Ajayi M A, Grissom W A, Smith L S, Jones E E. Epoxy-resin-based chemical stabilization of a fine poorly graded soil system, *Transportation Research Record*. 1991; 1295, 95-108.
4- Stanley R J, Watt L A. Liquid sprays to assist stabilization and revegetation of coastal sand dunes. *Soil Technology*.1990; 3(1), 9-20.
5- Whiteley G M. Effects of colloidal lignite on the stability of soil aggregates, *Soil Technology*. 1993; 6**(4)**, 21-327.
6- Liu J, Bai Y, Song Z, Kanungo D P, Wang Y, Bu F, Shi X. Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer. *Construction and Building Materials*. 2020; 253, 119164.
7- Liu J, Song Z, Lu Y, Wang Q, Kong F, Bu F, Sun S. Improvement effect of water-based organic polymer on the strength properties of fiber glass reinforced sand. *Polymers*. 2018; 10(8), 836.
8-Hussein S A, Ali H A. Stabilization of expansive soils using polypropylene fiber. *Civil Engineering Journal*. 2019; 5(3), 624-635.
9- ASTM D2166M-16. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *Annual Books of Standard*. ASTM International. 2016.
10- Liu J, Bai Y, Song Z, Kanungo D P, Wang Y, Bu F, Shi X. Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer. *Construction and Building Materials*. 2020; 253, 119164.
11- Tang C, Shi B, Gao W, Chen F, Cai Y. Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*.2007; 25(3), 194-202.
12- Mohammadi M. The effect of liquid polymer on the mechanical behavior of schist soils. *Master of Science Thesis*. Buali Sina University (In Persian); 2018.
13- Davis R O, Selvadurai A P. *Plasticity and Geomechanics*. Cambridge University Press. 2005.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-05-27]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.36]