

بررسی اثر الیاف پلی‌استر و پلی‌پروپیلن بر رفتار مقاومتی خاک کائولینیت تثبیت‌شده با سیمان تحت شرایط غوطه‌وری در آب و کلرید سدیم

حسن شرفی^{۱*}، زهرا مرادپور^۱، حمیدرضا اکبری^۲

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، h_sharafi@razi.ac.ir

۲- گروه مهندسی عمران، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

چکیده

کاهش مقاومت خاک‌های رسی تثبیت‌شده در اثر مواجهه با شرایط محیطی، یکی از چالش‌های بهسازی خاک بوده که در این پژوهش، اثر مقدار سیمان و درصد وزنی ترکیب الیاف پلی‌استر-پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری و میزان حفظ آن در خاک کائولینیتی تثبیت‌شده با سیمان پرتلند نوع II بررسی شد. نمونه‌ها با ۰، ۱/۵، ۲/۵ و ۴ درصد سیمان تهیه و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، در سه وضعیت شامل حالت خشک مرجع، غوطه‌وری در آب مقطر و محلول آب‌نمک ۱ درصد مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و شاخص حفظ مقاومت (SRF) تعیین و معنی‌داری اختلاف میان گروه‌ها با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه و آزمون Tukey HSD بررسی شد. در شرایط خشک، افزایش مقدار سیمان از ۱/۵ به ۴ درصد، مقاومت نمونه‌های بدون الیاف را حدود ۱۵۳ درصد افزایش داد. همچنین، افزودن ۱ درصد الیاف PP-PES به نمونه حاوی ۴ درصد سیمان، مقاومت فشاری را در حالت خشک حدود ۱۵ درصد افزایش داد. پس از غوطه‌وری، مقاومت نمونه حاوی ۴ درصد سیمان و ۱ درصد الیاف در آب مقطر و محلول آب‌نمک به ترتیب به ۱/۴۹ و ۱/۳۶ مگاپاسکال رسید. نمونه‌های غوطه‌ور در محلول آب‌نمک نسبت به آب مقطر افت ۱۶ درصدی مقاومت را ایجاد کردند. در مجموع، در محدوده ترکیبات بررسی‌شده، استفاده هم‌زمان از ۴ درصد سیمان و ۱ درصد الیاف PP-PES با بیشترین مقاومت اولیه و بهترین میزان حفظ مقاومت پس از مواجهه با شرایط محیطی همراه بود.

کلمات کلیدی:

کائولینیت، کلرید سدیم، الیاف پلی‌استر، الیاف پلی‌پروپیلن، سیمان پرتلند

خاک‌های رسی به دلیل ریزدانه بودن، حساسیت به تغییرات رطوبتی و تغییرپذیری رفتار مکانیکی در شرایط محیطی مختلف، در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی نیازمند بهسازی هستند. تثبیت شیمیایی با سیمان یکی از روش‌های متداول برای افزایش مقاومت خاک‌های رسی است و می‌تواند از طریق تشکیل محصولات سیمانی حاصل از واکنش‌های هیدراتاسیون، مقاومت فشاری خاک را افزایش دهد [۱، ۲]. مطالعات انجام‌شده بر خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان نیز افزایش مقاومت فشاری را با افزایش مقدار ماده تثبیت‌کننده و شرایط مناسب عمل‌آوری گزارش کرده‌اند [۱]. با این حال، عملکرد خاک‌های تثبیت‌شده تنها به مقاومت اولیه محدود نمی‌شود و قرارگیری در شرایط محیطی نامساعد و تغییرات مکرر رطوبتی می‌تواند موجب کاهش مقاومت و تغییر رفتار مصالح تثبیت‌شده شود. بررسی‌های آزمایشگاهی بر خاک‌های تثبیت‌شده نشان داده‌اند که چرخه‌های تر-خشک می‌توانند بر مقاومت و دوام مصالح اثرگذار باشند [۳، ۴]. این موضوع به‌ویژه در خاک‌های کائولینیتی اهمیت دارد، زیرا رفتار خاک تثبیت‌شده تحت تاثیر هم‌زمان ویژگی‌های خاک، مقدار ماده تثبیت‌کننده و شرایط محیطی قرار می‌گیرد. در کنار تثبیت شیمیایی، استفاده از الیاف پلیمری به‌عنوان یک روش تقویت مکانیکی می‌تواند رفتار خاک تثبیت‌شده را بهبود دهد. الیاف با ایجاد درگیری مکانیکی در ساختار خاک و انتقال بخشی از تنش‌های ایجادشده در ماتریس، می‌توانند مقاومت و شکل‌پذیری مصالح را افزایش دهند [۵]. مطالعات انجام‌شده بر خاک‌های تثبیت‌شده و مسلح شده با الیاف نیز نشان داده‌اند که افزودن الیاف می‌تواند بر مقاومت فشاری و سایر ویژگی‌های مکانیکی خاک اثرگذار باشد [۶]. از سوی دیگر، اثر الیاف تنها به افزایش مقاومت محدود نیست و نحوه توزیع تنش و تعامل الیاف با ماتریس خاک-سیمان نیز در عملکرد مصالح نقش دارد. مطالعات مربوط به خاک‌های سیمانی الیاف‌دار نشان داده‌اند که حضور الیاف می‌تواند موجب بهبود رفتار مکانیکی و افزایش مقاومت مصالح در برابر گسترش آسیب شود [۲، ۷]؛ بنابراین، استفاده از الیاف در کنار تثبیت سیمانی می‌تواند رویکردی مناسب برای بهبود عملکرد خاک‌های رسی تثبیت‌شده باشد. با وجود مطالعات انجام‌شده درباره تثبیت سیمانی و تقویت الیافی، عملکرد خاک‌های تثبیت‌شده به ویژگی‌های خاک، مقدار سیمان، نوع و مقدار الیاف و شرایط محیطی وابسته است. همچنین، مطالعات مربوط به دوام خاک‌های رسی الیاف‌دار نشان داده‌اند که نوع ماده تثبیت‌کننده و نوع الیاف می‌تواند بر میزان حفظ مقاومت در شرایط محیطی مختلف تأثیرگذار باشد [۸، ۹]. از این رو، مقایسه مستقیم رفتار یک سیستم خاک-سیمان-الیاف تحت چند وضعیت محیطی در یک برنامه آزمایشگاهی یکسان می‌تواند اطلاعات کاربردی‌تری درباره عملکرد این مصالح فراهم کند. بررسی رفتار خاک‌های تثبیت‌شده در شرایط تر-خشک نشان داده است که تکرار تغییرات رطوبتی می‌تواند موجب کاهش تدریجی عملکرد مکانیکی و تغییر رفتار مصالح شود [۱۰، ۱۱]. همچنین، نوع محیط مواجهه و ماهیت سیال می‌تواند بر رفتار خاک‌های تثبیت‌شده اثرگذار باشد [۱۲، ۱۳]؛ بنابراین، ارزیابی عملکرد مصالح در محیط‌های آبی متفاوت می‌تواند درک مناسب‌تری از میزان حفظ مقاومت آن‌ها در شرایط محیطی فراهم کند. از این رو، بررسی هم‌زمان اثر مقدار سیمان و یک مقدار ثابت از ترکیب الیاف پلی‌استر-پلی‌پروپیلن بر مقاومت و حفظ مقاومت خاک کائولینیتی، به‌ویژه در مقایسه مستقیم حالت خشک مرجع با آب مقطر و محیط شور، می‌تواند اطلاعات کاربردی‌تری درباره پایداری این مصالح در شرایط محیطی مختلف فراهم کند. بر این اساس، پژوهش حاضر باهدف بررسی اثر مقدار سیمان و حضور ۱ درصد وزنی ترکیب الیاف پلی‌استر-پلی‌پروپیلن (PES-PP) بر مقاومت و حفظ مقاومت خاک کائولینیتی تثبیت‌شده انجام شد. در این مطالعه، درصد سیمان در محدوده ۰، ۱/۵، ۲/۵ و ۴ درصد و مقدار کل الیاف PES-PP برابر ۱ درصد وزنی در نظر گرفته شد. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، در سه وضعیت شامل حالت خشک مرجع، غوطه‌وری در آب مقطر و غوطه‌وری در محلول آب‌نمک ۱ درصد مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و شاخص حفظ مقاومت (SRF) به‌عنوان شاخص‌های اصلی عملکرد مکانیکی و محیطی مورد استفاده قرار گرفتند و معنی‌داری اختلاف میان گروه‌های آزمایشی نیز با تحلیل آماری بررسی شد. نوآوری اصلی این پژوهش در ارزیابی منسجم اثر مقدار سیمان در یک سیستم خاک کائولینیتی دارای مقدار ثابت ۱ درصد ترکیب الیاف PES-PP و مقایسه مستقیم مقاومت و حفظ مقاومت آن در سه وضعیت محیطی شامل خشک، آب مقطر و محلول آب‌نمک ۱ درصد، تحت یک برنامه آزمایشگاهی و شرایط عمل‌آوری یکسان است. این رویکرد امکان مقایسه مستقیم اثر تغییر مقدار سیمان بر مقاومت اولیه و میزان حفظ مقاومت مصالح الیاف‌دار را فراهم می‌کند و می‌تواند در ارزیابی عملکرد محیطی خاک‌های تثبیت‌شده مورد استفاده قرار گیرد.

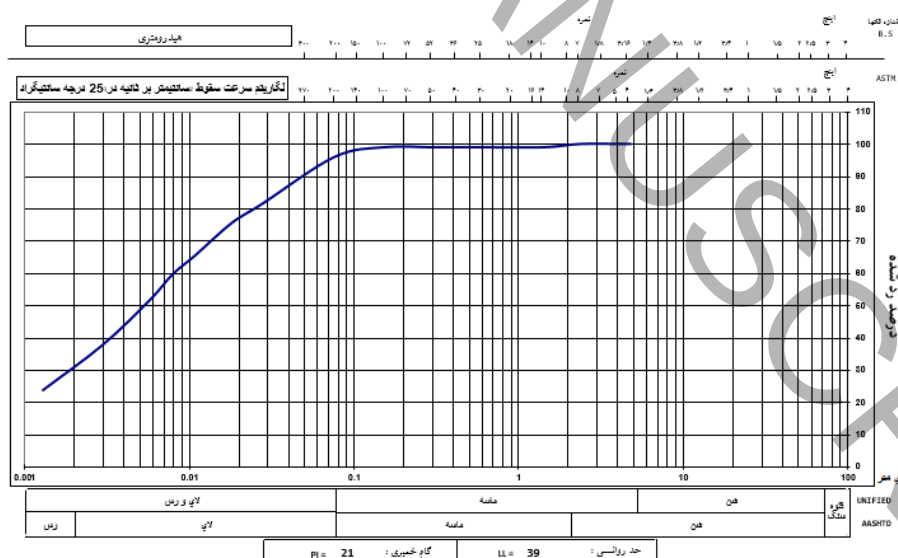
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی مواد مصرفی

برای تحقیق حاضر از یک نمونه خاک کائولینیت زنوز تبریز (شمال غربی ایران) استفاده شد. مشخصات مهندسی آن طبق روش‌های ASTM و پارامترهای زیست‌محیطی تعیین شد. نتایج آزمایش‌های ریزساختاری و شیمیایی نشان می‌دهد که مقدار عمده خاک (حدود ۷۰ درصد) کانی کائولینیت است. مشخصات ژئوتکنیکی خاک نرم مورد استفاده به‌طور خلاصه در جدول ۱ و نمودار دانه‌بندی و مصالح مصرفی به ترتیب در شکل ۱ و ۲ ارائه شده است. بر این اساس نمونه‌ها پیش از انجام آزمایش‌ها از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شدند تا یکنواختی دانه‌بندی تضمین شود. همچنین آزمایش تراکم استاندارد مطابق ASTM D ۶۹۸ انجام و مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) و رطوبت بهینه (OMC) جهت آماده‌سازی نمونه‌ها تعیین گردید.

جدول ۱: مشخصات رفتاری نمونه خاک طبیعی مورد استفاده در پژوهش

خواص خاک	مقدار	واحد	استاندارد
ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)	۱۱/۸	(cmol/kg)	Hendershot and Duquette (۱۹۸۶)
سطح مخصوص ویژه (SSA)	۲۵	(m ² /g)	Eltantawy and Arnold (۱۹۷۳)
درصد رس	۶۸	(%)	ASTM D۴۲۲
حد روانی	۳۹	(%)	ASTM D۴۳۱۸
شاخص خمیری	۲۱	(%)	ASTM ۴۳۱۸
چگالی ویژه	۲/۶۷	G _s	ASTM D۸۵۴
حداکثر چگالی خشک	۱۵۶۱	(kg/m ³)	ASTM D۶۹۸
رطوبت بهینه	۱۹	(%)	ASTM D۶۹۸
طبقه‌بندی خاک	CL	-	ASTM D۲۴۸۷
مقاومت فشاری محصور نشده	۰/۱۹۱	(MPa)	ASTM D۲۱۶۶
pH	۸/۶۱	-	Ouhadi et al. (۲۰۰۶)
رسانایی الکتریکی (EC)	۰/۱۸۹	(μS/cm)	EPA manual (۱۹۸۳)



شکل ۱: نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده در پژوهش

مصالح مصرفی دیگر، سیمان پرتلند نوع II و تهیه شده است. مشخصات فیزیکی سیمان مطابق استاندارد ASTM C150 تعیین شده است. به منظور امکان مقایسه عملکرد فرایندهای فوق، اصلاح خاک با افزودن سیمان به عنوان عامل تثبیت کننده شیمیایی به منظور بهبود مقاومت فشاری و افزایش دوام خاک در مقادیر ۱/۵، ۲/۵ و ۴ درصد وزنی نیز مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش برای مسلح کردن خاک، از پرکاربردترین الیافهای مصنوعی، الیاف پلی استر (PES) و پلی پروپیلن (PP) مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به نمونههای آزمایشگاهی مطالعه حاضر، الیاف برای این نوع از نمونهها به طول الیاف مصرفی به ترتیب برای پلی استر برابر ۱۲ میلی مترو برای پلی پروپیلن برابر ۳ میلی متر انتخاب شد. جدول ۲ مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد.

جدول ۲: مشخصات الیاف مورد استفاده در پژوهش

مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (g/cm^3)	قطر فیلامان (μm)	طول اسمی (mm)	نوع الیاف
~ ۱۰-۵	~ ۹۰۰-۴۰۰	~ ۱/۴۰-۱/۳۰	~ ۵۰-۳۰	۱۲	پلی استر (PES)
~ ۵-۳	~ ۴۵۰-۲۵۰	~ ۰/۹۲-۰/۹۰	~ ۲۵-۱۵	۳	پلی پروپیلن (PP)



شکل ۲: مصالح مورد استفاده در پژوهش

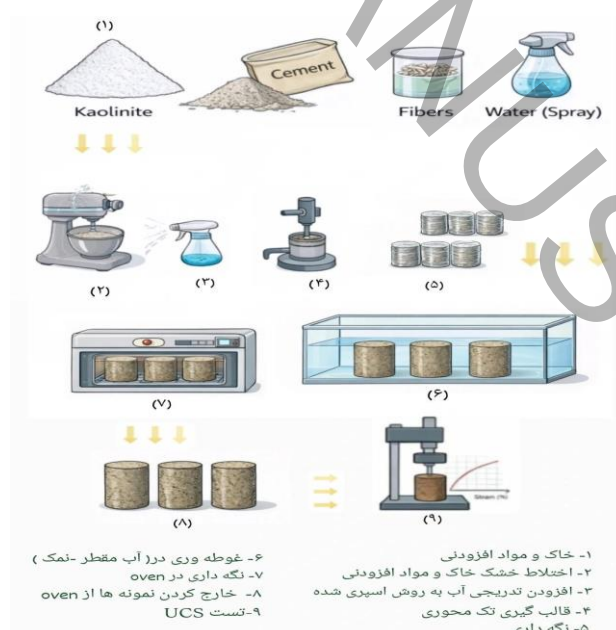
۲-۲- نحوه نمونه سازی و انجام آزمایش ها

برای بررسی اثر ترکیبی سیمان و الیاف پلیمری بر رفتار مقاومتی و حفظ مقاومت خاک کائولینیته تثبیت شده، نمونه ها با استفاده از الیاف پلی استر با طول ۱۲ میلی متر و الیاف پلی پروپیلن با طول ۳ میلی متر و مطابق طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۳ آماده شدند. در مرحله ارزیابی محیطی، مجموع مقدار الیاف در مخلوط های الیافی برابر با ۱ درصد وزنی نسبت به وزن خشک خاک بود که شامل ۰/۵ درصد وزنی الیاف پلی استر و ۰/۵ درصد وزنی الیاف پلی پروپیلن می شد. استفاده از الیاف پلیمری برای بهبود رفتار خاک های تثبیت شده در مطالعات پیشین مورد توجه قرار گرفته است [۱۴]، [۱۵]. در فرآیند آماده سازی، ابتدا خاک کائولینیت عبوری از الک شماره ۲۰۰ با مقدار مشخص سیمان و الیاف مخلوط شد. الیاف به صورت تدریجی به خاک اضافه و با آن مخلوط شدند تا توزیع یکنواخت آنها در مخلوط حاصل شود. سپس آب بر اساس رطوبت بهینه به صورت تدریجی افزوده و اختلاط ادامه یافت تا مخلوط یکنواختی به دست آید. نمونه ها در قالب های استوانه ای با قطر ۳۸ میلی متر و ارتفاع ۷۶ میلی متر قرار گرفته و به روش استاتیکی متراکم شدند. روش های مشابه آماده سازی و بررسی رفتار خاک های سیمانی الیاف دار نیز در مطالعات پیشین گزارش شده است [۲]، [۱۶]. پس از قالب گیری، نمونه ها به مدت ۲۸ روز تحت شرایط کنترل شده عمل آوری شدند. پس از پایان دوره عمل آوری، عملکرد نمونه ها در سه شرایط شامل حالت خشک مرجع، غوطه وری در آب مقطر و غوطه وری در محلول آب نمک ۱ درصد وزنی NaCl ارزیابی شد. نمونه های مربوط به دو شرایط محیطی پس از غوطه وری به مدت ۳۲ ساعت، به مدت ۱ ساعت در آون آزمایشگاهی (Oven) در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند و پس

از بازگشت به دمای محیط، تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری قرار گرفتند. این فرآیند در پژوهش حاضر به‌عنوان یک مرحله مواجهه تر‌خشک در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در این پژوهش تنها یک مرحله مواجهه تر‌خشک بررسی شده است، نتایج به شرایط آزمایش‌شده محدود بوده و به دوام بلندمدت تعمیم داده نمی‌شوند. مطالعات انجام‌شده بر خاک‌های تثبیت‌شده نشان داده‌اند که تعداد و شدت چرخه‌های تر‌خشک می‌تواند بر کاهش عملکرد مکانیکی و میزان دوام مصالح اثرگذار باشد [۳]، [۹]. همچنین، مطالعات مربوط به شرایط محیطی شدید نشان داده‌اند که تغییرات دما و شرایط مواجهه می‌تواند بر عملکرد خاک‌های تثبیت‌شده و الیاف‌دار اثرگذار باشد [۵، ۱۷]. با این حال، این پژوهش تنها یک مرحله مواجهه محیطی را بررسی کرده و نتایج آن به همین شرایط محدود است. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مطابق استاندارد ASTM2166 و با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. برای هر ترکیب آزمایشی، سه نمونه تکراری تهیه و آزمایش شد و نتایج به‌صورت میانگین همراه با شاخص‌های پراکندگی گزارش شدند. نمونه‌های آزمایش‌شده در سه شرایط محیطی، مبنای محاسبه شاخص حفظ مقاومت (SRF) و مقایسه آماری نتایج قرار گرفتند. استفاده از UCS برای ارزیابی عملکرد خاک‌های سیمانی و الیاف‌دار در مطالعات مختلف نیز گزارش شده است [۱]، [۱۴].

جدول ۳: نسبت اختلاط نمونه‌های ساخته‌شده

سن (روز)	سیمان (C/%)	الیاف (PP-PES) (P/%)	خاک (%)	کد نمونه	شماره نمونه
۲۸	۰	۰	۱۰۰	K _{۱۰۰}	۱
۲۸	۰	۱	۹۹	K _{۹۹P۱}	۲
۲۸	۱/۵	۰	۹۸/۵	K _{۹۸/۵C۱/۵}	۳
۲۸	۱/۵	۱	۹۷/۵	K _{۹۷/۵P۱C۱/۵}	۴
۲۸	۲/۵	۰	۹۷/۵	K _{۹۷/۵C۲/۵}	۵
۲۸	۲/۵	۱	۹۶/۵	K _{۹۶/۵P۱C۲/۵}	۶
۲۸	۴	۰	۹۶	K _{۹۶C۴}	۷
۲۸	۴	۱	۹۵	K _{۹۵P۱C۴}	۸



شکل ۳: طرح شماتیک نمونه‌های ساخته‌شده

۲-۳. تحلیل آماری داده‌ها و ارزیابی شاخص حفظ مقاومت (SRF)

به منظور ارزیابی میزان حفظ مقاومت نمونه‌ها پس از مواجهه با شرایط محیطی، شاخص حفظ مقاومت (SRF) به صورت نسبت مقاومت فشاری نمونه پس از مواجهه با محیط مورد بررسی به مقاومت فشاری نمونه مرجع خشک محاسبه شد:

(۱): شاخص حفظ مقاومت

که در آن UCS_e مقاومت فشاری نمونه پس از قرارگیری در محیط مورد بررسی و UCS_d مقاومت فشاری نمونه مرجع خشک است. بنابراین، مقدار SRF نشان‌دهنده درصد مقاومت باقی‌مانده نمونه نسبت به مقاومت مرجع خشک است. استفاده از مقاومت باقی‌مانده به عنوان شاخص ارزیابی عملکرد محیطی خاک‌های تثبیت‌شده نیز در مطالعات دوام مورد توجه قرار گرفته است [۳]، [۱۱]. برای بررسی پراکندگی داده‌های آزمایشگاهی، شاخص‌های آماری شامل میانگین، انحراف معیار (SD)، خطای معیار (SE) و ضریب تغییرات (CV) برای هر ترکیب آزمایشی محاسبه و در جداول نتایج ارائه شد. به منظور بررسی معنی‌داری اختلاف میانگین گروه‌های آزمایشی، تحلیل واریانس یک‌طرفه (one-way ANOVA) در سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد. همچنین، برای مقایسه زوجی میانگین گروه‌ها، آزمون تعقیبی Tukey HSD مورد استفاده قرار گرفت. گروه‌هایی که در آزمون Tukey دارای حروف مشترک هستند، در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی‌داری ندارند. برای ارزیابی میزان اثرگذاری تفاوت بین گروه‌های آزمایشی بر تغییرات مقاومت فشاری، اندازه اثر با استفاده از ضریب اتا اسکوتر (η^2) محاسبه شد:

(۲): اندازه اثر

$SS_{between}$ مجموع مربعات بین گروه‌ها، SS_{total} مجموع کل مربعات می باشد.

۳-۳. ارائه بحث و نتایج

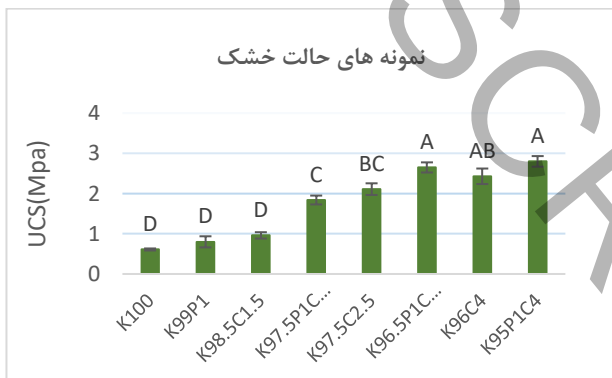
۳-۱- ارزیابی عملکرد نمونه‌ها در حالت خشک (حالت مرجع)

در این بخش، نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) نمونه‌های خاک کائولینیت تثبیت‌شده با مقادیر مختلف سیمان، با و بدون استفاده از ۱ درصد وزنی ترکیب الیاف PP-PES، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شرایط خشک ارائه شده است. هدف این بخش، بررسی اثر تثبیت سیمانی و تقویت الیافی بر مقاومت اولیه خاک و ایجاد یک حالت مرجع برای مقایسه عملکرد نمونه‌ها در شرایط محیطی مختلف است. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها همراه با شاخص‌های آماری در جدول ۴ ارائه شده و میانگین مقاومت و پراکندگی نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: مقاومت فشاری نمونه‌ها در حالت خشک

کد نمونه	UCS(Mean)(Mpa)	SD	SE	CV(%)	گروه‌بندی Tukey
K _{۱۰۰}	۰/۶۱	۰/۰۲۵	۰/۰۱۵	۴/۱۰	D
K _{۹۹P_۱}	۰/۸	۰/۱۳۸	۰/۰۸۰	۱۷/۱۷	D
K _{۹۸/۵C_{۱/۵}}	۰/۹۶	۰/۰۷۹	۰/۰۴۶	۸/۲۷	D
K _{۹۷/۵P_۱C_{۱/۵}}	۱/۸۴	۰/۱۱	۰/۰۶۴	۵/۹۷	C
K _{۹۷/۵C_{۲/۵}}	۲/۱۱	۰/۱۴۵	۰/۰۸۴	۶/۸۶	BC
K _{۹۶/۵P_۱C_{۲/۵}}	۲/۶۵	۰/۱۲۶	۰/۰۷۳	۴/۷۴	A
K _{۹۶C_۴}	۲/۴۳	۰/۱۹۳	۰/۱۱۱	۷/۹۲	AB
K _{۹۵P_۱C_۴}	۲/۸۰	۰/۱۳۲	۰/۰۷۶	۴/۷۳	A

نتایج نشان داد که افزایش مقدار سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری خاک کائولینیت شد. نمونه شاهد K۱۰۰ که فاقد ماده تثبیت‌کننده بود، مقاومت متوسط ۰/۶۱ مگاپاسکال را ثبت کرد، درحالی‌که افزودن ۱/۵ درصد سیمان در نمونه K98.5C1.5 موجب افزایش مقاومت به ۰/۹۶ مگاپاسکال شد. با افزایش مقدار سیمان از ۱/۵ به ۴ درصد، مقاومت نمونه K96C4 به ۲/۴۳ مگاپاسکال رسید. این روند را می‌توان به افزایش پیوندهای ایجادشده در ماتریس خاک-سیمان نسبت داد؛ با این حال، افزایش مقاومت در محدوده موردبررسی کاملاً خطی نبود و نشان داد که میزان افزایش مقاومت با افزایش سیمان در همه سطوح یکسان نیست. افزایش مقاومت خاک‌های تثبیت‌شده با افزایش مقدار ماده تثبیت‌کننده در مطالعات پیشین نیز گزارش شده است [۱] [۲]. مقایسه نمونه‌های دارای سیمان با و بدون ترکیب الیافی PP-PES نشان داد که افزودن ۱ درصد الیاف در ترکیب‌های مورد بررسی با افزایش مقاومت فشاری همراه بود. برای نمونه، مقاومت K97.5P1C1.5 برابر با ۱/۸۵ مگاپاسکال بود، درحالی‌که نمونه مشابه فاقد الیاف، K98.5C1.5، مقاومت ۰/۹۶ مگاپاسکال داشت. این افزایش را می‌توان با نقش مکانیکی الیاف در انتقال و توزیع تنش و افزایش پیوستگی ماتریس خاک-سیمان-الیاف مرتبط دانست [۱۴] [۱۶]. مطالعات مربوط به خاک‌های سیمانی الیاف‌دار نشان داده‌اند که نوع، مقدار و ویژگی‌های الیاف می‌تواند بر مقاومت نهایی و رفتار مکانیکی مصالح اثرگذار باشد [۷] [۱۸]. همچنین، بررسی خاک‌های تثبیت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن نشان داده است که افزودن الیاف می‌تواند مقاومت و ظرفیت جذب انرژی مصالح را تحت تاثیر قرار دهد [۶]. بر اساس مطالعات پیشین، سازوکارهایی مانند انتقال تنش میان ماتریس و الیاف، محدود کردن گسترش آسیب و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل می‌توانند در بهبود رفتار خاک‌های الیاف‌دار نقش داشته باشند [۵]، [۱۹]. با توجه به نبود آزمون‌های مستقیم ریزساختاری و out-Pull در پژوهش حاضر، این سازوکارها صرفاً به‌عنوان تبیین‌های مکانیکی احتمالی در نظر گرفته می‌شوند. بیشترین مقاومت فشاری در میان ترکیب‌های بررسی‌شده مربوط به نمونه K95P1C4، شامل ۴ درصد سیمان و ۱ درصد ترکیب PP-PES، بود که مقاومت متوسط ۲/۸۰ مگاپاسکال را ثبت کرد. این نتیجه نشان می‌دهد که در محدوده ترکیبات آزمایش‌شده، ترکیب سیمان و الیاف با افزایش مقاومت اولیه همراه بوده است. در مقابل، نمونه K99P1 که شامل ۱ درصد ترکیب PP-PES و فاقد سیمان بود، مقاومت پایین‌تری نسبت به نمونه‌های سیمانی نشان داد؛ بنابراین، در شرایط خشک و در محدوده آزمایش‌شده، اثر الیاف در حضور ماتریس سیمانی بیشتر نمایان شد. به‌منظور بررسی معنی‌داری اختلاف مقاومت فشاری بین گروه‌های آزمایشی، تحلیل واریانس یک‌طرفه (one-way ANOVA) انجام شد. نتایج این تحلیل شامل مقدار F، سطح معنی‌داری (p-value) و اندازه اثر بر اساس ضریب اتا اسکور (η^2) در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین، گروه‌بندی حاصل از آزمون تعقیبی Tukey HSD در جدول ۴ ارائه شده است. گروه‌هایی که دارای حروف یکسان هستند، در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ اختلاف آماری معنی‌داری ندارند. در مجموع، نتایج شرایط خشک نشان داد که افزایش سیمان و استفاده از ۱ درصد ترکیب PP-PES در ترکیب‌های موردبررسی با بهبود مقاومت فشاری همراه بود. این شرایط به‌عنوان مبنای مقایسه میزان حفظ مقاومت نمونه‌ها پس از مواجهه با آب مقطر و محلول آب‌نمک ۱ درصد مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۴: میانگین (UCS) نمونه‌ها در شرایط خشک

۳-۲. رفتار مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط اشباع آب مقطر

به منظور ارزیابی اثر شرایط اشباع بر عملکرد مکانیکی خاک کائولینیت تثبیت شده، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها پس از غوطه‌وری در آب مقطر انجام شد. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۵ و شاخص حفظ مقاومت (SRF) در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که غوطه‌وری نمونه‌ها در آب مقطر موجب کاهش مقاومت فشاری نسبت به شرایط خشک شد. این کاهش می‌تواند با تغییر وضعیت رطوبتی و افزایش درجه اشباع نمونه مرتبط باشد؛ زیرا تغییر شرایط آب در ساختار متخلخل خاک تثبیت شده می‌تواند رفتار مکانیکی آن را تحت تاثیر قرار دهد. مطالعات مربوط به چرخه‌های تر-خشک نیز کاهش عملکرد مکانیکی خاک‌های تثبیت شده در اثر مواجهه با تغییرات رطوبتی را گزارش کرده‌اند [۴] [۹]. با این حال، از آنجاکه در پژوهش حاضر تحلیل ریزساختاری انجام نشده است، این تفسیر به عنوان یک سازوکار احتمالی در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۵: مقاومت فشاری نمونه‌ها در حالت آب مقطر

کد نمونه	UCS(Mean)(Mpa)	SD	SE	CV(%)	SRF	گروه‌بندی Tukey
K100	ND*	ND	ND	ND	ND	ND
K99P1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K98.5C1.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K97.5P1C1.5	۰/۶۳	۰/۱۰	۰/۰۶۱	۱۶/۷۴	۳۴/۳	C
K97.5C2.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K96.5P1C2.5	۱/۲۷	۰/۰۵	۰/۰۳۲	۴/۳۱	۴۸/۱	B
K96C4	۰/۳۶	۰/۰۳	۰/۰۱۸	۸/۳۳	۱۵/۱	D
K95P1C4	۱/۴۹	۰/۰۳	۰/۰۱۷	۲/۰۱	۵۳/۲	A
ND*=Not Determined						

شدت کاهش مقاومت در ترکیب‌های مختلف یکسان نبود. نمونه‌های دارای مقادیر بالاتر سیمان و ترکیب الیافی PP-PES توانستند بخش بیشتری از مقاومت اولیه خود را حفظ کنند. برای نمونه، K96.5P1C2.5 پس از غوطه‌وری در آب مقطر مقاومت ۱/۲۸ مگاپاسکال را ثبت کرد، در حالی که نمونه K95P1C4 شامل ۴ درصد سیمان و ۱ درصد ترکیب PP-PES، بیشترین مقاومت باقی مانده را در میان ترکیب‌های مورد بررسی نشان داد و مقاومت ۱/۴۹ مگاپاسکال را حفظ کرد. بررسی شاخص حفظ مقاومت (SRF) نیز نشان داد که نمونه‌های دارای ترکیب الیافی در برخی ترکیب‌ها بخش بیشتری از مقاومت اولیه خود را پس از مواجهه با آب مقطر حفظ کردند. بالاترین مقدار SRF مربوط به نمونه K95P1C4 بود که نشان دهنده عملکرد مناسب این ترکیب در شرایط اشباع مورد بررسی است. با این حال، این نتیجه بیانگر عملکرد بهتر در محدوده شرایط آزمایش شده است و نباید به عنوان دوام بلندمدت یا عملکرد قطعی در سایر شرایط محیطی تفسیر شود [۳] [۸]. برای بررسی معنی‌داری اختلاف بین گروه‌های آزمایشی، تحلیل واریانس یک طرفه انجام شد و نتایج شامل F-value، p و اندازه اثر (η^2) در جدول ۷ ارائه شده است. گروه‌بندی آماری حاصل از آزمون Tukey HSD نیز در جدول ۵ ارائه شده است. در مواردی که مقدار p کمتر از ۰/۰۵ بود، اختلاف میانگین‌ها از نظر آماری معنی‌دار در نظر گرفته شد. به طور کلی، غوطه‌وری در آب مقطر موجب کاهش مقاومت فشاری نسبت به حالت خشک شد، اما در محدوده ترکیبات آزمایش شده، نمونه‌های دارای سیمان و ۱ درصد ترکیب PP-PES توانستند بخش بیشتری از مقاومت اولیه خود را حفظ کنند.

۳-۳. رفتار مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط آب نمک ۱٪

به منظور بررسی اثر هم‌زمان اشباع و حضور یون‌های محلول بر عملکرد مکانیکی خاک کائولینیت تثبیت شده، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها پس از غوطه‌وری در محلول آب نمک با غلظت ۱ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مقاومت فشاری و شاخص

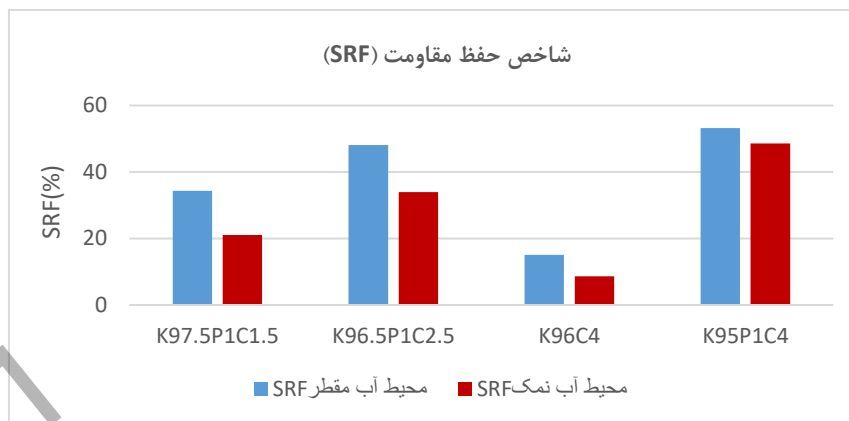
حفظ مقاومت (SRF) نمونه‌ها در جدول ۶ و شکل ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که غوطه‌وری در محلول آب‌نمک ۱ درصد NaCl موجب کاهش مقاومت فشاری نسبت به شرایط خشک و آب مقطر شد.

این کاهش را می‌توان به اثر هم‌زمان اشباع و حضور یون‌های محلول بر شرایط فیزیکی و شیمیایی محیط منافذ نسبت داد. مطالعات مربوط به خاک‌های تثبیت‌شده در شرایط محیطی مختلف نیز نشان داده‌اند که ماهیت محیط مواجهه می‌تواند بر رفتار و عملکرد مصالح اثرگذار باشد [۱۲]، [۱۳]. با این حال، از آنجاکه در پژوهش حاضر تحلیل ریزساختاری و شیمیایی انجام نشده است، این تفسیر به‌عنوان یک سازوکار احتمالی در نظر گرفته می‌شود و به‌عنوان شواهد مستقیم تجربی تلقی نمی‌شود. شدت کاهش مقاومت در ترکیب‌های مختلف یکسان نبود. نمونه K97.5P1C1.5 پس از غوطه‌وری در محلول آب‌نمک مقاومت ۰/۳۹ مگاپاسکال را ثبت کرد، درحالی‌که نمونه K96.5P1C2.5 مقاومت حدود ۰/۹۰ مگاپاسکال را حفظ نمود. این نتایج نشان می‌دهد که در محدوده ترکیبات آزمایش‌شده، افزایش مقدار سیمان همراه با حضور الیاف با حفظ مقاومت بیشتر پس از مواجهه با محیط شور همراه بود. بیشترین مقاومت باقی‌مانده در شرایط آب‌نمک مربوط به نمونه K95P1C4، شامل ۴ درصد سیمان و ۱ درصد ترکیب PP-PES، بود که مقاومت متوسط ۱/۳۶ مگاپاسکال را ثبت کرد.

جدول ۶. مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط آب‌نمک ۱٪

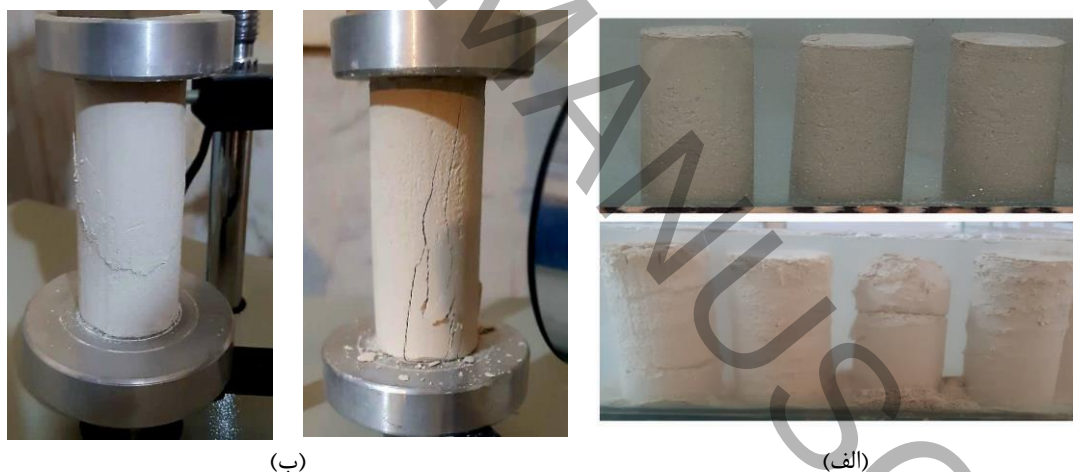
کد نمونه	UCS(Mean)(Mpa)	SD	SE	CV(%)	SRF(%)	گروه‌بندی Tukey
K100	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K99P1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K98.5C1.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K97.5P1C1.5	۰/۳۹	۰/۰۴	۰/۰۲۶	۱۱/۷	۲۱/۱	C
K97.5C2.5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
K96.5P1C2.5	۰/۹۰	۰/۰۹	۰/۰۵۵	۱۰/۵	۳۴/۰	B
K96C4	۰/۲۱	۰/۰۲	۰/۰۱۲	۹/۵	۸/۶	C
K95P1C4	۱/۳۶	۰/۰۹	۰/۰۵۷	۷/۲	۴۸/۶	A
ND*=Not Determined						

در مقابل، نمونه مشابه فاقد الیاف، K96C4، مقاومت حدود ۰/۲۱ مگاپاسکال را نشان داد. این اختلاف نشان می‌دهد که در ترکیب موردبررسی، افزودن ۱ درصد ترکیب PP-PES همراه با ۴ درصد سیمان با حفظ مقاومت بیشتری پس از مواجهه با محلول آب‌نمک همراه بوده است. بررسی شاخص حفظ مقاومت (SRF) نشان داد که مقدار این شاخص در محیط آب‌نمک نسبت به آب مقطر کاهش یافته است. با این حال، ترکیب‌های دارای الیاف، به‌ویژه نمونه K95P1C4، بخش بیشتری از مقاومت اولیه خود را حفظ کردند. این نتیجه نشان‌دهنده عملکرد مناسب این ترکیب در محدوده شرایط محیطی آزمایش‌شده است. به‌منظور بررسی معنی‌داری اختلاف بین گروه‌های آزمایشی، تحلیل واریانس یک‌طرفه انجام شد و نتایج ANOVA شامل F، p-value و اندازه اثر (η^2) در جدول ۷ ارائه شده است. گروه‌بندی حاصل از آزمون Tukey HSD نیز در جدول ۶ ارائه شده است. اختلاف میانگین‌ها در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ ارزیابی شد. در مجموع، محلول آب‌نمک ۱ درصد در شرایط آزمایش‌شده با افت بیشتر مقاومت نسبت به آب مقطر همراه بود. با این حال، در محدوده ترکیبات بررسی‌شده، استفاده هم‌زمان از سیمان و ۱ درصد ترکیب PP-PES، به‌ویژه در نمونه حاوی ۴ درصد سیمان، با حفظ بخش بیشتری از مقاومت اولیه همراه شد.



شکل ۵: مقایسه شاخص حفظ مقاومت (SRF) نمونه‌ها در شرایط آب مقطر و آب نمک ۱٪

نمونه‌هایی از وضعیت ظاهری پس از غوطه‌وری و همچنین الگوی شکست نمونه‌ها پس از آزمون UCS در شکل ۶ ارائه شده است. این تصاویر به‌عنوان شواهد کیفی مکمل نتایج مقاومت فشاری ارائه شده‌اند و تفسیر آن‌ها به مشاهده ظاهری نمونه‌ها محدود شده است. تصاویر شکل ۶ تغییرات ظاهری نمونه‌ها پس از مواجهه با محیط آبی و الگوی شکست آن‌ها پس از آزمایش UCS را نشان می‌دهند. در برخی نمونه‌های قرارگرفته در محیط آبی، کاهش انسجام سطحی و جداسازی موضعی مصالح مشاهده شد که می‌تواند بانفوذ آب و افزایش اشباع و در نتیجه تضعیف پیوندهای موجود در ساختار نمونه مرتبط باشد. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر آزمون‌های ریزساختاری و شیمیایی انجام نشده است، این مشاهدات صرفاً به‌عنوان شواهد کیفی از تغییر وضعیت ظاهری نمونه‌ها گزارش می‌شوند و مشاهده شده را نمی‌توان به‌طور قطعی به انحلال شیمیایی یا تغییرات ریزساختاری مشخص نسبت داد.



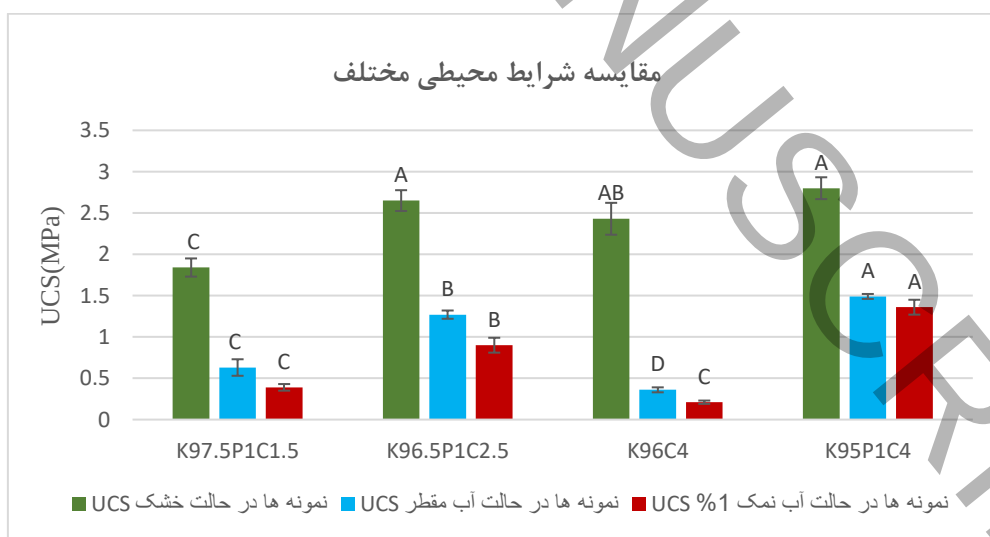
شکل ۶: تصاویر (الف) نمونه‌ها پس از غوطه‌وری، (ب) نمونه‌ها پس از آزمایش UCS

جدول ۷. نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه و اندازه اثر مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط محیطی مختلف

اندازه اثر	η^2	P-value	F-value	خطا df	بین گروه‌ها df	تعداد گروه	شرایط محیطی
بسیار بزرگ	۰/۹۸۴	<۰/۰۰۱	۱۴۱/۲۴	۱۶	۷	۸	خشک
بسیار بزرگ	۰/۹۸۷	<۰/۰۰۱	۲۰۸/۳۵	۸	۳	۴	آب مقطر
بسیار بزرگ	۰/۹۸۳	<۰/۰۰۱	۱۵۲/۹۹	۸	۳	۴	آب نمک (۱٪)

۳-۴- مقایسه جامع شاخص‌های پایداری و دوام نمونه‌ها در محیط‌های مختلف

به منظور ارزیابی تاثیر شرایط محیطی مختلف بر عملکرد مکانیکی خاک کائولینیت تثبیت شده، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در سه شرایط شامل حالت خشک به عنوان شرایط مرجع، غوطه‌وری در آب مقطر و غوطه‌وری در محلول آب نمک ۱ درصد NaCl مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مقایسه نمونه‌ها در شکل ۷ ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان داد که قرارگیری نمونه‌ها در شرایط اشباع موجب کاهش مقاومت فشاری نسبت به حالت خشک شد. این کاهش در محلول آب نمک ۱ درصد NaCl بیشتر از آب مقطر بود که نشان‌دهنده اثر شرایط محیطی بر عملکرد مکانیکی نمونه‌ها در محدوده آزمایش شده است. با این حال، میزان افت مقاومت در ترکیب‌های مختلف یکسان نبود و نمونه‌های دارای سیمان و ۱ درصد ترکیب الیاف PP-PES، به‌ویژه نمونه حاوی ۴ درصد سیمان، توانستند بخش بیشتری از مقاومت اولیه خود را حفظ کنند. این رفتار با نتایج مطالعات انجام شده درباره اثر شرایط محیطی بر خاک‌های سیمانی الیاف‌دار هم‌راستا است [۸]، [۹]. بررسی شاخص حفظ مقاومت (SRF) نیز نشان داد که نمونه K95P1C4 در مقایسه با سایر ترکیب‌های مورد بررسی، عملکرد مناسب‌تری در حفظ مقاومت پس از مواجهه با آب مقطر و محلول آب نمک ۱ درصد داشت. این رفتار نشان می‌دهد که در محدوده ترکیبات آزمایش شده، افزایش مقدار سیمان همراه با حضور ۱ درصد ترکیب الیاف PP-PES با بهبود حفظ مقاومت نمونه در برابر شرایط محیطی مورد بررسی همراه بوده است. با این حال، این نتیجه به محدوده شرایط و ترکیبات آزمایش شده محدود است و نمی‌توان آن را به عنوان دوام بلندمدت یا عملکرد نمونه‌ها در تمامی شرایط محیطی تعمیم داد [۱۱]. نتایج تحلیل آماری و گروه‌بندی حاصل از آزمون تعقیبی Tukey نیز نشان داد که بین برخی گروه‌های آزمایشی اختلاف آماری معنی‌داری وجود دارد ($P > 0.05$). گروه‌بندی Tukey امکان شناسایی گروه‌هایی را فراهم کرد که میانگین مقاومت فشاری آن‌ها از نظر آماری تفاوت معنی‌داری نداشت؛ بنابراین، تفسیر تفاوت میان گروه‌ها در این پژوهش علاوه بر مقایسه میانگین‌ها، بر اساس نتایج تحلیل آماری نیز انجام شده است. لازم به ذکر است که ارزیابی محیطی در این پژوهش بر مقایسه حالت خشک، آب مقطر و محلول آب نمک ۱ درصد و یک مرحله مواجهه محیطی انجام شده است؛ بنابراین، نتایج حاضر بیانگر عملکرد نمونه‌ها در شرایط آزمایش شده است و به‌تنهایی برای ارزیابی دوام بلندمدت تحت چرخه‌های متعدد تر-خشک قابل تعمیم نیست [۴] [۳]. بررسی چرخه‌های متعدد تر-خشک و همچنین شرایط محیطی دیگری مانند ذوب-انجماد می‌تواند در مطالعات دیگر برای ارزیابی جامع‌تر دوام این مصالح مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷] [۵]. در مجموع، مقایسه سه شرایط محیطی نشان داد که آب مقطر و به‌ویژه محلول آب نمک ۱ درصد NaCl موجب کاهش مقاومت نمونه‌ها نسبت به حالت خشک شدند؛ با این حال، استفاده هم‌زمان از سیمان و ۱ درصد ترکیب PP-PES، به‌خصوص در نمونه حاوی ۴ درصد سیمان، با حفظ بخش بیشتری از مقاومت اولیه در شرایط محیطی مورد مطالعه همراه بود.



شکل ۷: پایداری و دوام نمونه‌های منتخب در محیط‌های مختلف

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار مقاومتی و میزان حفظ مقاومت خاک کائولینیتی تثبیت شده با سیمان پرتلند نوع II و I درصد ترکیب الیاف PP-PES تحت سه شرایط محیطی شامل حالت خشک، غوطه‌وری در آب مقطر و غوطه‌وری در محلول آب‌نمک ۱ درصد NaCl مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده و تحلیل‌های آماری، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شرح زیر است:

۱. تغییر شرایط محیطی از حالت خشک به شرایط اشباع موجب کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها شد. در چهار ترکیب دارای نتایج کامل در هر سه شرایط، افت مقاومت در محلول آب‌نمک ۱ درصد NaCl به‌طور میانگین حدود ۱۶ درصد بیشتر از آب مقطر بود؛ بنابراین، نتایج نشان داد که اشباع و حضور املاح می‌توانند بر میزان حفظ مقاومت خاک کائولینیتی تثبیت شده تأثیرگذار باشند.

۲. افزایش مقدار سیمان از ۱/۵ تا ۴ درصد موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط خشک شد. به‌عنوان نمونه، مقاومت نمونه بدون الیاف از ۰/۹۶ مگاپاسکال در ۱/۵ درصد سیمان به ۲/۴۳ مگاپاسکال در ۴ درصد سیمان رسید که بیانگر افزایش حدود ۱۵۳ درصدی مقاومت است. همچنین، در شرایط محیطی مورد بررسی، ترکیب‌های دارای مقدار سیمان بیشتر، در مجموع، میزان بیشتری از مقاومت اولیه خود را حفظ کردند. باین‌حال، افزایش سیمان به‌تنهایی نتوانست از کاهش مقاومت ناشی از اشباع و محیط شور جلوگیری کند.

۳. افزودن ۱ درصد ترکیب الیاف در حضور سیمان موجب بهبود مقاومت فشاری و میزان حفظ مقاومت در ترکیب‌های مورد بررسی شد. برای نمونه، در شرایط خشک، افزودن ۱ درصد الیاف PP-PES به نمونه حاوی ۴ درصد سیمان، مقاومت فشاری را از ۲/۴۳ به ۲/۸۰ مگاپاسکال افزایش داد که معادل حدود ۱۵/۲ درصد افزایش است. همچنین، مقادیر SRF نشان داد که در نمونه حاوی ۴ درصد سیمان، افزودن ۱ درصد الیاف PP-PES، مقدار SRF را در آب مقطر از ۱۵/۱ به ۵۳/۲ درصد افزایش داد که معادل ۲۵۲ درصد افزایش SRF است. در محلول آب‌نمک ۱ درصد نیز مقدار SRF از ۸/۶ به ۴۸/۶ درصد افزایش یافت که معادل ۴۰۰۰ واحد درصد افزایش است. این نتایج نشان می‌دهد که نقش الیاف PP-PES در پژوهش حاضر صرفاً به افزایش مقاومت اولیه محدود نبوده، بلکه در بهبود توانایی حفظ مقاومت پس از مواجهه با شرایط محیطی نیز موثر بوده است. این بهبود را می‌توان با نقش مکانیکی احتمالی الیاف در انتقال و توزیع تنش و محدود کردن توسعه آسیب در ساختار نمونه مرتبط دانست؛ باین‌حال، بررسی مستقیم این سازوکارها نیازمند آزمون‌های ریزساختاری و مکانیکی تکمیلی است.

۴. تحلیل آماری با استفاده از آزمون واریانس یک‌طرفه نشان داد که در گروه‌های مورد بررسی، اختلاف میانگین مقاومت فشاری از نظر آماری معنی‌دار بود ($P < 0.05$). نتایج آزمون تعقیبی Tukey HSD نیز گروه‌های دارای اختلاف معنی‌دار و غیر معنی‌دار را مشخص کرد. همچنین، مقادیر بالای اندازه اثر η^2 نشان داد که بخش عمده تغییرات مشاهده شده در مقاومت فشاری به تفاوت میان گروه‌های آزمایشی مربوط است.

۵. در میان ترکیب‌های مورد بررسی، نمونه K95P1C4 شامل ۴ درصد سیمان و ۱ درصد ترکیب الیاف، بالاترین مقاومت اولیه و همچنین بیشترین مقاومت باقی‌مانده را در شرایط آب مقطر و آب‌نمک نشان داد. مقاومت این نمونه پس از غوطه‌وری در آب مقطر و محلول آب‌نمک به ترتیب ۱/۴۹ و ۱/۳۶ مگاپاسکال بود که نشان‌دهنده حفظ حدود ۵۳ و ۴۹ درصد مقاومت اولیه آن است. این نتیجه نشان می‌دهد که در محدوده ترکیبات آزمایش شده، استفاده هم‌زمان از ۴ درصد سیمان و ۱ درصد الیاف PP-PES عملکرد مناسب‌تری از نظر مقاومت اولیه و میزان حفظ مقاومت در شرایط محیطی مورد مطالعه داشته است.

منابع

- [1] Yan, T., Zhang, X., Cai, S., Zhou, Z., An, R., & Zhang, X. (2024). Mechanical Characteristics and Damage Constitutive Model of Fiber-Reinforced Cement-Stabilized Soft Clay. *Applied Sciences*, 14(4), 1378. DOI: 10.3390/app14041378.
- [2] Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., & Ulbrich, L. A. (1998). Influence of Fiber and Cement Addition on Behavior of Sandy Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(12), 1211–1214. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:12(1211).

- [3] Aryal, S., & Kolay, P. K. (2020). Long-term durability of ordinary Portland cement and polypropylene fibre stabilized kaolin soil using wetting–drying and freezing–thawing test. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6, 8. DOI: 10.1007/s40891-020-0191-9.
- [4] Akbari, H. R., Sharafi, H., & Goodarzi, A. R. (2021). Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 °C. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80, 1841–1855. DOI: 10.1007/s10064-020-02028-x.
- [5] Tiwari, N., Satyam, N., & Singh, K. (2020). Effect of Curing on Micro-Physical Performance of Polypropylene Fiber Reinforced and Silica Fume Stabilized Expansive Soil Under Freezing Thawing Cycles. *Scientific Reports*, 10, 7624. DOI: 10.1038/s41598-020-64658-1.
- [6] Akbari, H. R., Sharafi, H., & Goodarzi, A. R. (2021). Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(6), 1470–1482. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2021.06.001.
- [7] Wei, L., Chai, S. X., Zhang, H. Y., & Shi, Q. (2018). Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. *Construction and Building Materials*, 172, 300–308. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.248.
- [8] Dhakal, S., Kolay, P. K., & Puri, V. (2024). Durability of clayey soil stabilized with calcium sulfoaluminate cement and polypropylene fiber under extreme environment. *Transportation Geotechnics*, 44, 101164. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.101164.
- [9] Wassermann, A., Abdallah, A., & Cuisinier, O. (2022). Impact of wetting and drying cycles on the mechanical behaviour of a cement-treated soil. *Transportation Geotechnics*, 36, 100804. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100804.
- [10] Rao, S. M., Reddy, B. V. V., & Muttharam, M. (2001). The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils. *Engineering Geology*, 60(1–4), 223–233. DOI: 10.1016/S0013-7952(00)00103-4.
- [11] Consoli, N. C., Samaniego, Q. R. A., González, L. E., Bittar, E. J., & Cuisinier, O. (2018). Impact of severe climate conditions on loss of mass, strength, and stiffness of compacted fine-grained soils–Portland cement blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30, 04018174. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002392.
- [12] Eyo, E. U., Ng’Ambi, S., & Abbey, S. J. (2020). Performance of clay stabilized by cementitious materials and inclusion of zeolite/alkaline metals-based additive. *Transportation Geotechnics*, 23, 100330. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100330.
- [13] Ying, Z., Benahmed, N., Cui, Y., & Duc, M. (2022). Wetting-drying cycle effect on the compressibility of lime-treated soil accounting for wetting fluid nature and aggregate size. *Engineering Geology*, 307, 106778. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106778.
- [14] Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 30, 100–116. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045.
- [15] Ayeldeen, M., & Kitazume, M. (2017). Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(6), 592–602. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2017.05.005.
- [16] Huang, K., Ma, Q., & Ma, D. (2020). Effect of Basalt Fiber on Static and Dynamic Mechanical Properties of Metakaolin-Based Cement Clay. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1359163. DOI: 10.1155/2020/1359163.
- [17] Dhar, S., & Hussain, M. (2019). The strength behaviour of lime-stabilised plastic fibre-reinforced clayey soil. *Road Materials and Pavement Design*, 20(8), 1757–1778. DOI: 10.1080/14680629.2018.1468803.
- [18] Consoli, N. C., Moraes, R. R., & Festugato, L. (2013). Variables controlling strength of fibre-reinforced cemented soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, 166(4), 221–232. DOI: 10.1680/grim.12.00004.
- [19] Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. (2019). Tensile behaviors of natural fiber and cement reinforced soil subjected to direct tensile test. *Journal of Building Engineering*, 24, 100748. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100748.

ACCEPTED MANUSCRIPT