مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۴۰۲)
دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۲، صص. ۵۱-۵۷، (پژوهشی)

Original Article

بررسی اثر المان‌های موجود در پوست تخم‌مرغ در تثبیت خاک رس به روش ژئوپلیمر

آتوسا وثیق (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانیال معظمی * (استادیار)
گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران
شهرام پوراکبر (استادیار)
دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، مؤسسه‌ی آموزش عالی بینالود

در مطالعه‌ی حاضر، از ژئوپلیمر با مواد پسماند پوست تخم‌مرغ برای تثبیت خاک رس استفاده شده است. در این راستا، از ترکیب سدیم‌هیدروکسید و چسب سیلیکات به عنوان فعال‌کننده‌ی بازی استفاده شده است. جهت بررسی نمونه‌های خاکی تثبیت شده به روش ژئوپلیمر، از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و آزمایش برش مستقیم استفاده شده است. تحلیل شیمیایی واکنش‌ها از طریق بررسی عکس‌برداری الکترونی (SEM) روی نمونه‌های ژئوپلیمری انجام شده است. براساس نتایج پژوهش حاضر، استفاده از پسماندها با داشتن المان‌های آلومینا (Al_2O_3) و سیلیکا (SiO_2) بالا می‌تواند سبب افزایش در مقاومت خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر شود. استفاده از پودر پوست تخم‌مرغ با درصدهای ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ در دوره‌ی عمل‌آوری ۴۵ روزه به ترتیب باعث مقاومت فشاری تک‌محوری به میزان ۱/۲۴ MPa، ۱/۲۱ MPa، ۱/۱۸ MPa و ۸۴۹ kPa شده است.

واژگان کلیدی: خاک رس، تثبیت خاک، ژئوپلیمر.

ati.vgh@gmail.com
d_moazami@mshdiau.ac.ir
pourakbar@binaloud.ac.ir

۱. مقدمه

از آن‌جا که در بیشتر پروژه‌های عمرانی، خاک جزء جدایی‌ناپذیر است، لذا تأمین مقاومت آن، اهمیت خاصی دارد. از جمله مشکلات موجود در خاک، بحث نشست و تورم است، که وجود آنها با جنس و بافت خاک ارتباط مستقیم دارد. یکی از خاک‌های چالش‌برانگیز در علم ژئوتکنیک، خاک‌های رسی هستند؛ زیرا که این خاک‌ها مقاومت فشاری و ظرفیت باربری کم و یا تورم زیاد دارند. تثبیت خاک، یکی از راه‌های مقابله با مشکلات اخیر است.[۱-۳]

در علم مهندسی ژئوتکنیک، تغییر در خصوصیات خاک، شامل: مقاومت، سختی، تراکم‌پذیری، نفوذپذیری، پتانسیل تورم و همچنین افزایش ظرفیت باربری آن را تثبیت خاک می‌نامند.[۴-۶] تثبیت و یا بهسازی خاک یک اصطلاح کلی است که برای هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و یا ترکیبی از آنها که برای بهبود خواص خاک به کار می‌رود، اطلاق می‌شود.[۷ و ۸]

از جمله مباحث مهم در مکانیک خاک، بحث مقاومت برشی است. پارامترهای مهم و مؤثر در مقاومت برشی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی در خاک هستند. برای جلوگیری از بروز مشکلات مقاومتی در خاک می‌توان از روش اصلاح و تثبیت با مواد افزودنی استفاده کرد. انتخاب مواد افزودنی جهت تثبیت خاک بستگی به نوع و جنس خاک و همچنین هدف از تثبیت خاک دارد.[۹-۱۳]

کمبود منابع طبیعی و افزایش هزینه‌ی زمین منجر به شناسایی روش‌های استفاده‌ی مجدد از زباله‌های صنعتی می‌شود. پروژه‌های اخیر نشان داده‌اند که استفاده‌ی موفقیت‌آمیز از پسماندهای صنعتی در روش ژئوپلیمر برای تثبیت خاک می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌های ساخت و ساز شود. همچنین استفاده از مواد ضایعاتی در مصالح ساخت، ایده‌یی مطلوب بشمار می‌رود. استفاده از مواد ضایعاتی، از طرفی موجب صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی و از طرف دیگر، موجب کاهش هزینه‌های دفع پسماند می‌شود.

بوندار[۱] و همکاران (۲۰۱۳)،[۹] به بررسی شیمیایی و فیزیکی پنج نوع پوزولان طبیعی ایران پرداخته‌اند. با توجه به نتایج و با در نظرگرفتن مقاومت فشاری و حلالیت

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۶/۱۶، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۵، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۹.
DOI:10.24200/J30.2023.59981.3092

استناد به این مقاله:
وثیق، آتوسا، معظمی، دانیال و پوراکبر، شهرام، ۱۴۰۲. بررسی اثر المان‌های موجود در پوست تخم‌مرغ در تثبیت خاک رس به روش ژئوپلیمر. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۲)، صص. ۵۱-۵۷.

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک.

پارامتر	استاندارد	مقدار
نام خاک در سیستم طبقه بندی متحد	ASTM D۲۴۸۷	CL
بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک ($\gamma_{d\ max}$)	ASTM D۶۹۸	۱/۹۵(gr/cm^۳)
چگالی دانه های خشک (Gs)	ASTM D۸۵۴	۲/۶۵
نشانه خمیری (PI)	ASTM D۴۳۱۸-۱۰	۸
حد خمیری (PL)	ASTM D۴۳۱۸-۱۰	۲۱
حد روانی (LL)	TM D AS۴۳۱۸-۱۰	۲۹
درصد رطوبت بهینه (ω_{opt})	ASTM D۶۹۸	۱۲/۵ (٪)
مقاومت فشاری تک محوری (UCS)	ASTM D۲۱۶۶/D۲۱۶۶M	۲۴۷(KPa)
چسبندگی (C)	ASTM D۳۰۸۰	۰/۳۳(kg/cm^۲)
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	ASTM D۳۰۸۰	۱۸°

قلیایی به عنوان میزان فعالیت پوزولانی ماده، از میان پوزولان‌های تفتان، رفسنجان، سیرجان، سهند و شاهین دژ، پوزولان تفتان به علت داشتن LOI (افت حرارتی) کم و مقدار کلسیم قابل حل زیاد، بیشترین واکنش‌پذیری و بهترین رفتار را نشان داده است.

یکی دیگر از پوزولان‌های قابل استفاده در خاک، پوست تخم‌مرغ در ترکیب با آهک را می‌توان برای تثبیت خاک رس استفاده و اثر آن را در ویژگی‌های خاک بررسی کرد و ترکیبی بهینه از پودر پوسته‌ی تخم‌مرغ و آهک را به دست آورد.[۱۰]

دمیرل[۲] (۲۰۱۰)،[۱۱] آثار استفاده از ضایعات گرد و غبار سنگ مرمر را به عنوان ماسه‌ی ریزدانه در خواص مکانیکی بتن مطالعه کرده و دریافته است که افزودن ضایعات گردوغبار سنگ مرمر به عنوان جایگزین مصالح ریزدانه، اثر بسزایی در مقاومت فشاری آنها دارد. گرد و غبار سنگ مرمر از تولید سنگ مرمر حاصل می‌شود و در مقیاس بزرگ، ایجاد آلودگی زیست‌محیطی می‌کند.

ضایعات شیشه به دلیل شباهت ترکیب‌هایش به ماسه، مورد مطالعه‌ی پژوهشگران صنعت ساخت قرار گرفته است. استفاده از ضایعات شیشه در صنایع و مصالح ساخت، علاوه بر این‌که به پایداری محیط‌زیست کمک می‌کند، از هزینه‌های اشغال زمین، حمل و نقل، دفع و نگهداری آنها می‌کاهد. در این راستا، استفاده از ضایعات شیشه به عنوان مصالح دانه‌یی و یا مکمل سیمان در ساخت بتن بررسی شده است، که نتایج مطلوبی داشته است.[۱۲]

ویجایاکومار[۳] و همکاران (۲۰۱۳)، نیز به این نتیجه رسیدند که پودر شیشه می‌تواند به عنوان مواد جایگزین سیمان تا حد اندازه‌ی ذرات کمتر از ۷۵ میکرومتر استفاده شود، تا از واکنش‌های قلیایی ـ سیلیسی جلوگیری کند.[۱۳]

همچنین شخاوات و آگاروال[۴] (۲۰۱۴)،[۱۴] نشان دادند که ضایعات شیشه می‌تواند به طور مؤثر در بتن به عنوان یک پوزولان شیشه‌یی استفاده شود. ضایعات شیشه در قالب پودر ریز، به دلیل محتوای سیلیسی برخی از خواص پوزولانی رادارد. بنابراین پودر شیشه تاحدی می‌تواند جایگزین سیمان شود و باعث بهبود مقاومت و دوام بتن شود.

مرور تاریخچه‌ی مطالعات و پژوهش‌های انجام‌یافته نشان می‌دهد که استفاده از پسماند ژئوپلیمرها به عنوان سیستم‌های جدید و پاک برای تثبیت خاک رس می‌تواند استفاده شود. در این راستا، در پژوهش حاضر، به بررسی نقش المان‌های مختلف موجود در پودر سنگ، پودر شیشه و پودر پوست تخم‌مرغ در تثبیت خاک رس پرداخته شده است.

بدین منظور از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری جهت ارزیابی نمونه‌های تثبیت شده به روش ژئوپلیمر استفاده شده است. علاوه بر آن، آزمایش برش مستقیم برای بررسی چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده استفاده شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های خاک تثبیت شده با سیمان و آهک به عنوان نمونه‌های شاهد جهت مقایسه با نمونه‌های ژئوپلیمری نیز ساخته شده‌اند.

نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با پسماند پودر پوست تخم‌مرغ در درصدهای مختلف ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ (وزن پسماند پودر پوست تخم‌مرغ نسبت به وزن خشک خاک) و دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روزه ساخته شده است. علاوه بر آن، ترکیب چسب سیلیکات و سود سوزآور به عنوان فعال‌کننده‌ی قلیایی در ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری استفاده شده است. جهت بررسی ساختار نمونه‌های ساخته شده به روش ژئوپلیمری، آزمایش شیمیایی میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه‌های تثبیت شده انجام شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مواد

برای انجام پژوهش حاضر از خاک رس، پوست تخم‌مرغ، چسب سیلیکات و سود سوزآور استفاده شده است. آنالیز XRF طیف‌سنجی پرتو ایکس، یکی از روش‌های آنالیز عنصری است که از آن به طور وسیعی در صنعت و مراکز پژوهشی استفاده می‌شود. از روش طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس برای شناسایی عنصرهای شیمیایی نمونه‌های مختلف استفاده می‌شود. پس از انجام آزمایش‌های شناسایی خاک مطابق استاندارد ASTM، مشخصات کامل نمونه‌ی خاک و پوست تخم‌مرغ مورد آنالیز XRF قرار گرفته است. خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، براساس طبقه‌بندی یونیفاید، خاک رس با حالت خمیری پایین (CL) است. حد روانی و حد خمیری نیز با توجه به استاندارد ASTM D۴۳۱۸،[۱۵] تعیین شده است. در جدول ۱، نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک مطالعه شده ارائه شده است.

پوست تخم‌مرغ تهیه شده از کارگاه‌های شیرینی‌پزی، پس از خشک شدن در هوای آزاد توسط آسیاب پودر شده و در آزمایشگاه از الک ۲۰۰ عبورکرده است.

آهک در پژوهش حاضر فقط جهت ساخت نمونه‌ی شاهد استفاده شده و در ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری آهک استفاده نشده است. در جدول ۲، نتایج آنالیز

جدول ۲. نتایج آنالیز XRF برای شناسایی ترکیب‌های مصرفی.

ساختار شیمیایی	پوست تخم‌مرغ (٪)	سیمان II (٪)	آهک (٪)
SiO_2	-	۲۱/۱۱	۲/۲۳
Al_2O_3	-	۴/۴۲	۰/۷۱
Fe_2O_3	-	۳/۹۶	۰/۲۶
CaO	۹۹/۸۳	۶۳/۳۶	۷۹/۸
MgO	-	۱/۵۱	۰/۶۶
Na_2O	-	۰/۳۸	۰/۰۸
K_2O	-	۰/۵۱	۰/۰۸
LOI			
SO_3	-	۲/۶۱	-
$CaCO_3$	۹۷-۹۸	-	-
Ca	۴۰	-	-
P	۰/۱	-	-
F	۰/۴۰	-	-

XRF مواد مصرفی در پژوهش حاضر، شامل پوست تخم‌مرغ، سیمان و آهک ارائه شده است.

سدیم‌هیدروکسید یا سود سوزآور با فرمول شیمیای NaOH، همواره به عنوان یک ماده‌ی پرمصرف در صنایع استفاده شده است. سدیم‌هیدروکسید را می‌توان به صورت پودر یا پولک‌های جامد سفیدرنگ تهیه کرد. شکل پولکی آن کاربرد بسزایی در صنعت دارد و استفاده از آن در تحقیقات مهندسی، از جمله ساخت نمونه‌های ژئوپلیمری، رایج است.

ساخت محلول قلیایی شامل سدیم‌هیدروکسید بدین صورت انجام گرفت که در ابتدا آب و محلول سدیم‌هیدروکسید با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شد. سپس وزن مشخصی از تکه‌های سدیم‌هیدروکسید ۳/۵ مولار به وزن ۷۰ گرم با ۵۰۰ میلی‌لیتر آب داخل یک ظرف شیشه‌یی به آرامی حل شد تا محلول سدیم‌هیدروکسید یکنواختی حاصل شود و برای این‌که محلول مذکور به دمای محیط برسد و یکنواخت‌تر شود، پس از گذشت یک روز برای ساخت نمونه از آن استفاده شده است.

به منظور استفاده از مقدار بهینه‌ی مواد فعال‌ساز قلیایی، نسبت چسب سیلیکات به سود استفاده شده در روش ژئوپلیمر توسط پژوهشگران به عنوان نسبت بهینه‌ی محلول فعال‌ساز قلیایی معرفی شده است.[۲۲و۲۳] لذا در پژوهش حاضر، نیز نسبت ۲ واحد چسب سیلیکات و ۱ واحد سود استفاده شده است.

در جدول ۳، مشخصات دوره‌های عمل‌آوری، درصد رطوبت بهینه (ω_{opt})، چگالی خشک بیشینه ($\gamma_{d\,max}$)، نسبت چسب به سود، درصد چسب و سود، مولاریته‌ی سود در گروه‌های شاهد، که شامل ۵ گروه نمونه‌ی شاهد شامل: خاک طبیعی (S)، خاک تثبیت شده با چسب و سود (SG)، خاک تثبیت شده با سیمان ۶٪(SC_6)، خاک تثبیت شده با سیمان ۱۰٪(SC_{10}) و خاک تثبیت شده با آهک ۱۰٪(SL_{10}) و همچنین یک گروه نمونه‌ی اصلی، شامل خاک تثبیت شده با خاک تثبیت شده با پوست تخم‌مرغ به روش ژئوپلیمر (SGE) هستند، ارائه شده است.

۲.۲. ارائه و تحلیل نتایج

۱.۲.۲. نحوه‌ی انجام مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)

به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده طبق استاندارد D ۲۱۶۶ ASTM با توجه به ابعاد قالب نمونه‌ی تک‌محوری (قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر)، مقدار مشخصی خاک خشک با درصدهای مختلف افزودنی به طور همگن مخلوط شده است. پس از تهیه‌ی مواد اولیه و قبل از شروع به نمونه‌سازی باید ۲۴ ساعت قبل محلول قلیایی سدیم‌هیدروکسید تهیه شود. خاک و پودر پوست تخم‌مرغ (محلول سدیم‌هیدروکسید و چسب سیلیکات با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم) وزن شدند، سپس به صورت خشک با دست مخلوط شدند تا یکنواخت شوند.

جهت تعیین میزان آب برای هر مخلوط، مقدار آب موجود در محلول سدیم‌هیدروکسید تعیین شده است. روش ساخت محلول قلیایی شامل سدیم‌هیدروکسید بدین صورت بوده است که آب و محلول سدیم‌هیدروکسید با ترازویی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شدند، سپس وزن مشخصی از تکه‌های سدیم‌هیدروکسید ۳/۵ مولار به وزن ۷۰ گرم با ۵۰۰ میلی‌لیتر آب داخل یک ظرف شیشه‌یی به آرامی حل شد تا محلول سدیم‌هیدروکسید یکنواختی حاصل شود. همچنین برای این‌که محلول مذکور به دمای محیط برسد و یکنواخت‌تر شود، پس از گذشت یک روز برای ساخت نمونه از آن استفاده شده است.

سپس مقدار آب لازم جهت رسیدن خاک به رطوبت بهینه، به عنوان آب اضافی تعیین و به ترکیب همگن خاک و پسماندهای صنعتی افزوده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل یکسان بودن نرخ جذب آب دانه‌های خاکی و مواد پسماند با خاک، همه‌ی نمونه‌ها با انرژی تراکم یکسان و رطوبت بهینه‌ی به دست آمده از آزمایش تراکم ساخته شدند. در ابتدا، آب اضافی، محلول سدیم‌هیدروکسید و چسب سیلیکات درون لیوان همزن ریخته و مخلوط مذکور به مدت ۲ دقیقه با دور کُند و ۶ دقیقه ترکیب شدند تا محلول همگنی به دست آید.

سپس چسب و سود به مقدار رطوبت بهینه‌ی به دست آمده از آزمایش تراکم به ترکیب اضافه شد و در هنگام اختلاط مصالح دقت شد تا توده‌یی در خاک ایجاد نشود و مخلوط کاملاً همگنی حاصل شود. مخلوط حاصل در قالب استوانه‌یی (قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر) در سه لایه ریخته و هر لایه در زیر جک UCS با فشار ۴۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع متراکم شده و ۳۰ ثانیه صبر کرده و لایه‌ی بعد پس از شیار زدن با تیغ درون قالب ریخته شده است. سپس با استفاده از جک، نمونه‌ها از قالب بیرون آورده شدند و به منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری، ابتدا هر نمونه درون سلفون کاملاً محصور و سپس با فویل آلومینیومی پوشانده شده است.

۲.۲.۲. نتایج آزمایش تک‌محوری

- **تأثیر استفاده از پودر پوست تخم‌مرغ در روش ژئوپلیمر در مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس**

در شکل ۱ (الف الی د)، خاک‌های تثبیت شده در روش ژئوپلیمر با پودر پوست تخم‌مرغ (نمونه‌ی SGE) در درصدهای: ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ و دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روزه مشاهده می‌شوند. علاوه بر آن، در شکل ۲، خاک طبیعی (گروه شاهد S)، خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر بدون افزودنی (گروه شاهد GS) و خاک تثبیت شده با آهک (گروه شاهد SL_{10}) جهت مقایسه با نمونه‌های ژئوپلیمری نشان داده شده‌اند.

استفاده از پودر پوست تخم‌مرغ (نمونه‌ی شاهد SGE) با درصدهای ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ در دوره‌ی عمل‌آوری ۴۵ روزه به ترتیب مقاومت فشاری تک محوری: ۱/۲۴ MPa، ۱/۲۱ MPa، ۱/۱۸ MPa و ۸۴۹ kPa را باعث شده است. دلیل افزایش مقاومت در گروه (SGE) در مقایسه با گروه شاهد (SC) وجود المان‌های موجود در پودر پوست تخم‌مرغ به ویژه کلسیم‌اکساید (Cao)

جدول ۳. مشخصات ترکیب‌های استفاده شده در آزمایش‌ها.

گروه شاهد	نوع مواد افزودنی	نام اختصاری	نسبت چسب به سود	مولاریته‌ی سود (M)	درصد چسب و سود	ω_{opt} (٪)	$\gamma_{d\ max}$ (gr/cm^3)	دوره‌ی عمل‌آوری (روز)
S	خاک طبیعی	S	-	-	-	۱۲/۵	۱/۹۵	۴۵-۲۸-۱۴-۷
SG	خاک + چسب + سود	SG	۱-۲	۵/۳	۱۶	۱۶	۱/۹۷	۴۵-۲۸-۱۴-۷
SGE	خاک + چسب + سود + پوست تخم‌مرغ ۲/۵٪	$SGE_{۲/۵}$	۱-۲	۵/۳	۱۸	۱۸	۱/۹۸	۴۵-۲۸-۱۴-۷
	خاک + چسب + سود + پوست تخم‌مرغ ۵٪	$SGE_{۵}$	۱-۲	۵/۳	۱۸	۱۸	۱/۹۸	۴۵-۲۸-۱۴-۷
	خاک + چسب + سود + پوست تخم‌مرغ ۷/۵٪	$SGE_{۷/۵}$	۱-۲	۵/۳	۱۸	۱۸	۱/۹۸	۴۵-۲۸-۱۴-۷
	خاک + چسب + سود + پوست تخم‌مرغ ۱۰٪	$SGE_{۱۰}$	۱-۲	۵/۳	۱۸	۱۸	۱/۹۸	۴۵-۲۸-۱۴-۷
SC	خاک + سیمان ۶٪	$SC_{۶}$	-	-	-	۱۲/۵	۱/۹۵	۴۵-۲۸-۱۴-۷
	خاک + سیمان ۱۰٪	$SC_{۱۰}$	-	-	-	۱۲/۵	۱/۹۵	۴۵-۲۸-۱۴-۷
SL	خاک + آهک ۱۰٪	$SL_{۱۰}$	-	-	-	۱۵	۱/۹۵	۴۵-۲۸-۱۴-۷

است. نتایج اخیر نشان می‌دهد که استفاده از پودر پوست تخم‌مرغ با میزان Cao بالا در روش ژئوپلیمر می‌تواند کارایی بالا در افزایش مقاومت نمونه‌های خاکی تثبیت شده به روش ژئوپلیمر داشته باشند.

- **بررسی زمان عمل‌آوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده**

در شکل ۲، مقاومت فشاری خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر به وسیله‌ی پودر پوست تخم‌مرغ در دوره‌های عمل‌آوری مختلف مشاهده می‌شود.

به منظور بررسی اثر زمان عمل‌آوری در بیشینه‌ی مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده، نمودارهای بیشینه‌ی مقاومت فشاری تک‌محوری برحسب زمان عمل‌آوری ترسیم شده است. در تمامی نمودارهای اخیر ملاحظه می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با ۱۰٪ آهک ($SL_{۱۰}$) حتی پس از گذشت ۴۵ روز عمل‌آوری، با مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های تثبیت نشده تفاوت چندانی ندارد. همچنین افزودن ۶ و ۱۰ درصد سیمان به خاک طبیعی ($SC_{۱۰}$ و $SC_{۶}$)، موجب مقاومت فشاری بیشینه‌ی تک‌محوری در بین نمونه‌های شاهد شده است.

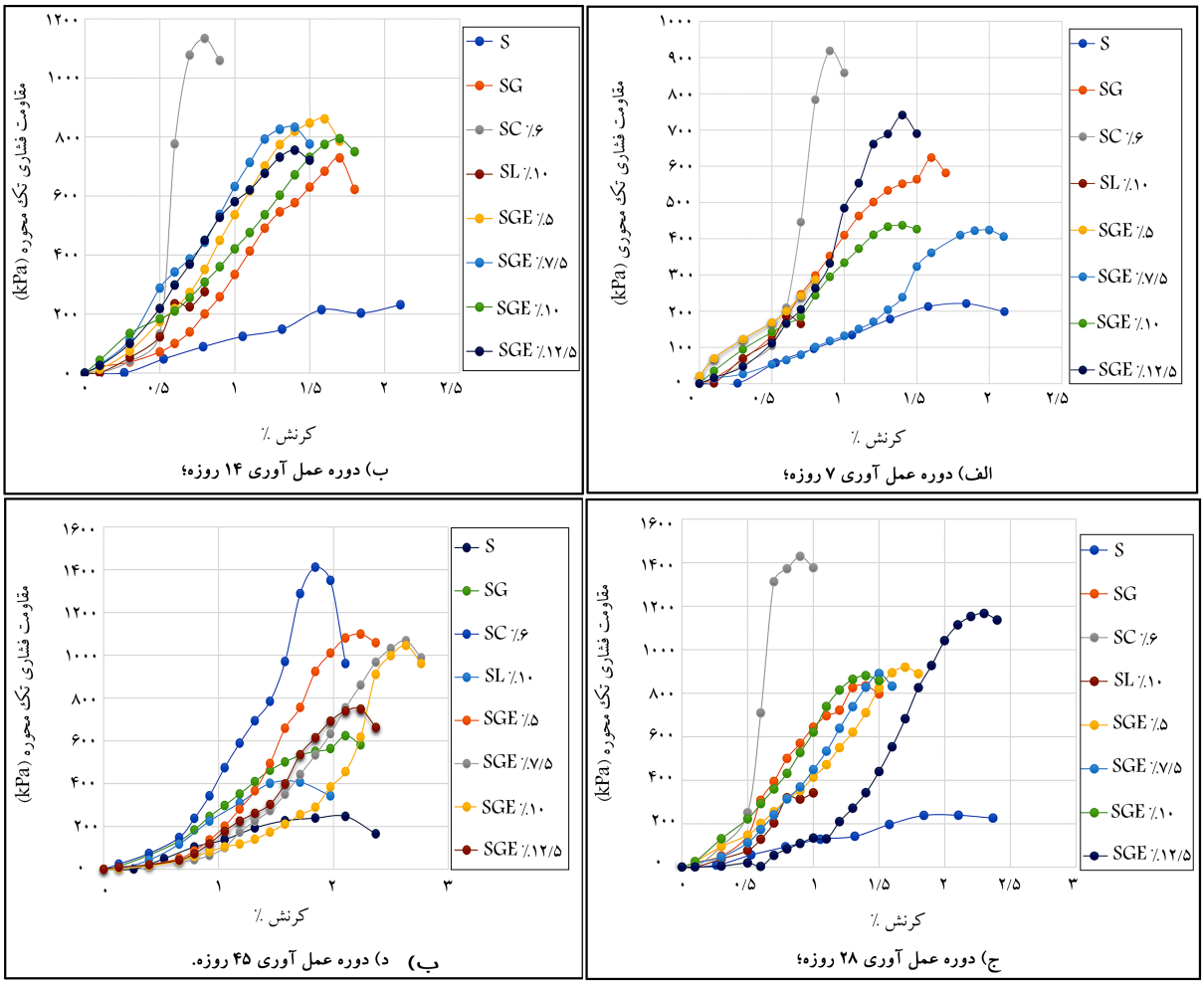
شکل ۲ نشان می‌دهد که مقدار بهینه‌ی ۵٪ پوست تخم‌مرغ ($SGE_{۵}$) نسبت به وزن خشک خاک به میزان مقاومت فشاری ۲/۱۱۶ Mpa در دوره‌ی عمل‌آوری ۴۵ روز است.

۳.۲.۲. نحوه‌ی انجام آزمایش برش مستقیم

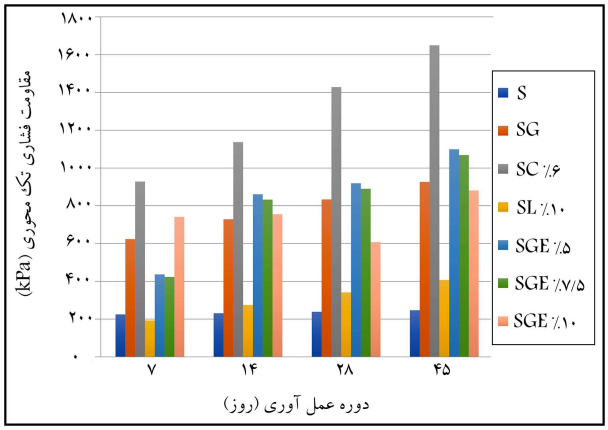
نحوه‌ی ساختن نمونه در آزمایش برش مستقیم، همانند آزمایش تک‌محوری است. نحوه‌ی محاسبه‌ی مقدار خاک و نگهداری نمونه‌ها نیز مشابه بوده است. در آزمایش برش مستقیم، مکعب به طول و عرض و ارتفاع ۶ سانتی‌متر بوده و برای به دست آوردن حجم، ضخامت صفحات متخلخل از ارتفاع کم شده است. برای انجام آزمایش کنونی، ابتدا خاک مورد نظر از الک نمره ۴ عبور داده شد و وزن خشک خاک مورد نیاز براساس حجم جعبه‌ی برش و وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک تعیین شده است.

پس از افزودن محلول قلیایی و چسب سیلیکات، که براساس درصد رطوبت بهینه محاسبه شده است، نمونه در سه لایه با ضخامت یکسان داخل جعبه‌ی برش تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر متراکم و در دستگاه برش گذاشته شده‌اند. برای نمونه‌های عمل‌آوری شده قبل از ساخت نمونه‌ها در قالب سطح داخلی قالب روغن‌کاری شده است. نمونه‌های ساخته شده از درون قالب خارج و درون سلفون و فویل قرار داده شدند تا مدت ۷ روز عمل‌آوری شوند. لازم به ذکر است که عمل‌آوری نمونه‌ها جهت انجام آزمایش برش مستقیم طبق شرایطی که برای نمونه‌های تک‌محوری توضیح داده شده است، عمل‌آوری شده است.

نمونه‌ها پس از عمل‌آوری درون جعبه‌ی برش قرار گرفتند و روی دستگاه برش



شکل ۱. آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده به روش ژئوپلیمر با استفاده از پوست تخم‌مرغ در دوره‌های عمل‌آوری مختلف.



شکل ۲. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ژئوپلیمری ساخته شده با پوست تخم‌مرغ در دوره‌های عمل‌آوری مختلف.

مستقیم گذاشته شدند. قرائت‌ها تا جایی که مقدار بار برشی به بیشینه‌ی مقدار خودش برسد، ادامه یافته است.

پس از ساخت نمونه‌های آزمایش برش مستقیم و سپری شدن مدت زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها درون قالب برش قرارگرفتند و سپس درون دستگاه گذاشته شدند و پس از اعمال سربار، اقدام به اعمال نیرو و قرائت نیروسنج و کرنش‌سنج شده است. مشخصات مصالح استفاده شده جهت ساخت نمونه‌ها برای انجام آزمایش برش مستقیم در جدول ۴ ارائه شده است، که مطابق آن، دوره‌های عمل‌آوری نمونه‌های تثبیت شده با پسماند پوست تخم‌مرغ (SGE) به روش ژئوپلیمر ۱ و ۷ روز بوده است. لازم به ذکر است که تعداد کم قالب‌ها و ترکیب‌های مختلف مصالح مستلزم زمان زیادی برای ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمایش برش مستقیم بوده است. لذا نمونه‌های ساخته شده در دوره‌های عمل‌آوری ذکر شده، آماده شده‌اند.

- **نتایج آزمایش برش مستقیم**

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، چسبندگی (C) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ) خاک طبیعی استفاده شده در پژوهش حاضر به ترتیب kPa ۳۳ و $^{\circ}$۱۸ بوده است. استفاده از چسب و سود به عنوان فعال‌ساز قلیایی در تثبیت خاک (نمونه‌ی شاهد SG)، سبب افزایش C و ϕ خاک به ترتیب به میزان kPa ۳۵ و $^{\circ}$۱۹ شده است.

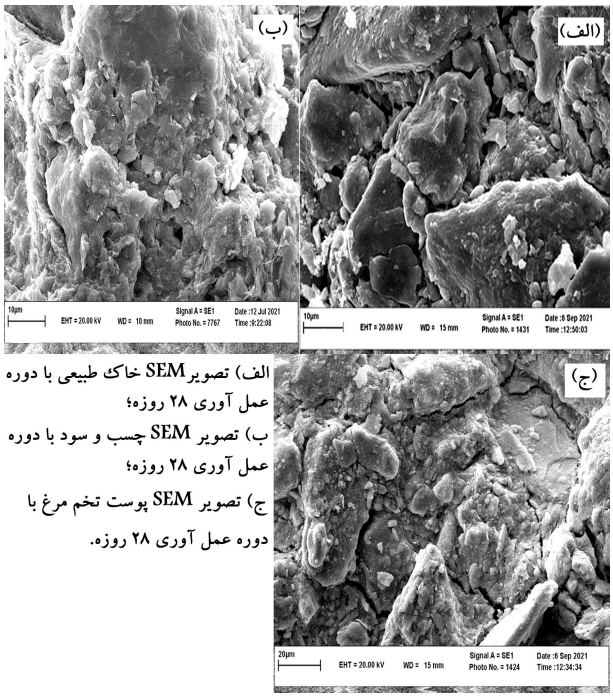
نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که استفاده از پسماند پوست تخم‌مرغ ٪۷/۵ ($SGE_{7/5}$) در روش ژئوپلیمر در خاک تثبیت شده سبب افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی شده است. لازم به ذکر است که از درصدهای بهینه‌ی هر یک

جدول ۴. مشخصات مصالح برای انجام آزمایش برش مستقیم.

نام نمونه	نام اختصار	ω_{opt} (٪)	$\gamma_{d\ max}$ (gr/cm^3)	دوره‌ی عمل‌آوری (روز)
خاک طبیعی	S	۱۶	۱/۹۱	۱-۷
خاک + چسب + سود	SG	۱۶	۱/۹۷	۱-۷
خاک + چسب + سود + پوست تخم‌مرغ ۵٪	SGE_5	۱۸	۱/۹۸	۱-۷

جدول ۵. میزان پارامترهای آزمایش برش مستقیم.

نام نمونه	نام اختصار	دوره‌ی عمل‌آوری (۱ روز)		دوره‌ی عمل‌آوری (۷ روز)	
		(C) (kg/cm^2)	(ϕ) °	(C) (kg/cm^2)	(ϕ) °
خاک طبیعی	S	۰/۳۳	۱۸	۰/۳۳	۱۸
خاک + چسب + سود	SG	۰/۳۵	۱۹	۰/۳۵	۳۰
خاک + چسب + سود + پوست تخم‌مرغ ۵٪	SGE_5	۰/۶	۳۸	۰/۶۳	۳۳



الف) تصویر SEM خاک طبیعی با دوره عمل آوری ۲۸ روزه؛
ب) تصویر SEM چسب و سود با دوره عمل آوری ۲۸ روزه؛
ج) تصویر SEM پوست تخم مرغ با دوره عمل آوری ۲۸ روزه.

شکل ۳. بررسی میکروساختاری آنالیز SEM.

از مواد به دست آمده از آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه‌های ژئوپلیمری جهت ساخت و انجام آزمایش برش مستقیم استفاده شده است.

۴.۲.۲. تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای بررسی‌های میکروساختاری آنالیز SEM نیز انجام شده است. در شکل ۳ (الف الی ج)، نمونه‌های انتخاب شده برای آنالیز نمونه‌های تثبیت شده با پوست تخم‌مرغ SGE_5 با دوره‌ی عمل‌آوری ۲۸ روزه مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آنها، استفاده از مواد پسماند به عنوان ماده‌ی اولیه در روش ژئوپلیمر سبب افزایش یکپارچگی و کاهش حفره‌ها در نمونه‌های تثبیت شده، شده است. همچنین استفاده از ماده‌ی پسماند (پودر پوست تخم‌مرغ) در تثبیت خاک به روش ژئوپلیمر سبب تشکیل باندهای مستحکم در بین ذرات خاک و افزایش مقاومت در توده‌های خاک در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز شده است.

در این راستا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از مواد پسماند با داشتن المان‌های متفاوت در ساختار خود می‌تواند سبب یکپارچگی خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر شوند. لذا طیف وسیعی از این مواد پسماند می‌توانند جهت تثبیت خاک بستر به روش ژئوپلیمر شوند.

۳. نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج به دست آمده به این شرح هستند:

در پژوهش حاضر، تمامی آزمایش‌های صورت گرفته و نتایج بررسی اثر ژئوپلیمر در خاک رس ارائه شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در ۷ حالت مختلف تثبیت ذکر شده و در ۴ دوره‌ی عمل‌آوری: ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روزه با ۳ تکرار در هر حالت، برای افزایش دقت نتایج انجام شده است.

- براساس نتایج به دست آمده، استفاده از ماده‌ی پسماند سبب افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک، شامل زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی در دوره‌های عمل‌آوری مختلف شده است.
- بررسی نتایج شیمیایی نشان می‌دهد که استفاده از پسماند در روش ژئوپلیمر در خاک تثبیت شده سبب افزایش یکپارچگی شده است. براساس نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، استفاده از ماده‌ی پسماند با داشتن المان‌های مختلف در ساختار خود می‌تواند در حجم وسیع به عنوان مواد اولیه در روش ژئوپلیمر به منظور تثبیت خاک بستر استفاده شود.

پانوشت‌ها

1. Bondar
2. Demirel
3. Vijayakumar
4. Shekhawat & Aggarwal

منابع (References)

1. Petry, T.M. and Little, D.N. "Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **14**(6), pp. 447-460 (2002).
2. Ebnjalal, R. and Bajestan, S.B. "Theoretical and practical principles of soil mechanics", *Shahid Chamran University Press, 4th Ed., Ahvaz*, p. 816 (In Persian) (1382/2004).
3. Petry, T.M. and Armstrong, J.C. "Stabilization of expansive clay soils", *Transportation Research Record*, **1219**, pp. 103-111 (1989).
4. Farzaneh O. and Mosaddegh A. "Experimental analysis to evaluate the effectiveness of lime and three new developed materials on subgrade soil stabilization of Kerman-Zangiabad road", *MS thesis*, University of Tehran, **1**(45), pp. 23-33 (In Persian) (1389/2011).
5. Ingles, O.G. and Metcalf, J.B. "Soil stabilization principles and practice", *Butterworth and Company Publishers Limited*, p. 374 (1972).
6. Eades, J.L. and Grim, R.E "Reaction of hydrated lime with pure clay minerals in soil stabilization", *Highway Research Board Bulletin*, **262** (1960).
7. Moon, D.H., Grubb, D.G. and Reilly, T.L. "Stabilization/solidification of selenium-impacted soils using Portland cement and cement kiln dust", *Journal of Hazardous Materials*, **168**(2-3), pp. 944-951 (2009).
8. Edil, T.B., Benson, C.,H. and Senol, A. "Field evaluation of construction alternatives for roadways over soft subgrade", *Transportation Research Record*, **1786**(1), pp. 36-48 (2002).
9. Bondar, D., Lynsdale, C.J. and Milestone, N.B. "Alkali-activated natural pozzolan concrete as new construction material", *ACI Materials Journal*, **110**(3), pp. 331-337 (2013).
10. Amu, O., Fajobi, A. and Oke, B. "Effect of eggshell powder on the stabilizing potential of lime on an expansive clay soil", *Research journal of Agriculture and Biological Sciences*, **1**(1), pp. 80-84 (2005).
11. Demirel, B. " The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete", *International Journal of Physical Sciences*, **5**(9), pp. 1372-1380 (2010).
12. Schmitz, A., Kamiński, J., Scalet, B.M. and et al. "Energy consumption and CO2 emissions of the European glass industry", *Energy Policy*, **39**(1), pp. 142-155 (2011).
13. Vijayakumar, G., Vishaliny, H. and Govindarajulu, D. "Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, **3**(2), pp. 153-157 (2013).
14. Shekhawat, B.S. and Aggarwal, D.V. "Utilisation of waste glass powder in concrete–A literature review", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, **3**(7), pp. 14822-14826 (2014).
15. ASTM, D. "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", D4318-10 (2010).
16. Cristelo, N., Glendinning, S. and Teixeira Pinto, A. "Deep soft soil improvement by alkaline activation", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, **164**(2), pp. 73-82 (2011).
17. Pourakbar, S., Asadi, F. and Huat, B.B. "Soil stabilisation with alkali-activated agro-waste", *Environmental Geotechnics*, **2**(6), pp. 359-370 (2015).