

اثر ریزدانه‌ها بر رفتار مقاومت برشی نهشته‌های بادی به‌منظور کاهش فرسایش پذیری (مطالعه موردی استان گلستان)

حامد رضایی^{۱*}، غلامرضا لشکری پور^۲، محمد غفوری^۲ و ناصر حافظی مقدس^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۱۸)

چکیده

مواد ریزدانه از نوع نهشته‌های لس رس‌دار منطقه گرگان با تلماسه درآزمایشگاه با نسبت‌های مختلف مخلوط‌شده و رفتار برشی آن توسط آزمون برش مستقیم اندازه‌گیری و ارزیابی گردید. نتیجه تحقیق نشان می‌دهد که افزایش ریزدانه‌های رسی در تلماسه‌ها با نیروی چسبندگی نسبت مستقیم و با زاویه اصطکاک داخلی به‌صورت نمایی نسبت عکس دارد. مقدار کاهش یا افزایش در پارامترهای مقاومت برشی تحت تأثیر درصد ریزدانه‌هاست. شرایط خشک و اشباع حاکم برآزمایش در تلماسه اثر کمی بر پارامترهای برشی دارد ولی در نمونه‌های مخلوط در شرایط خشک و اشباع پارامترهای برشی دارای اختلاف قابل ملاحظه‌ای هستند. نتایج این تحقیق می‌تواند در پروژه‌های تثبیت ماسه، جلوگیری از فرسایش، پایداری دامنه‌ها، احداث خاکریز، افزایش قابلیت تراکم و جلوگیری از ایجاد گرد و غبار و آلودگی‌های زیست محیطی و کانال‌های آبرسانی به‌کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: تلماسه، مقاومت برشی، زاویه اصطکاک داخلی، نیروی چسبندگی، لس، استان گلستان

۱. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه گلستان، گرگان

۲. گروه زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h.rezaei@gu.ac.ir

مقدمه

یکی از اولین تحقیقات انجام شده درباره تلماسه‌ها (Sand dune) تحقیقات بگنولد (Bagnold) در سال ۱۹۵۴ می‌باشد (۲۴). تلماسه‌ها ذراتی در اندازه‌های ۰.۰۱۷ تا ۲ میلی‌متر را در بر می‌گیرد و بیش از یک سوم صحراهای دنیا را پوشانده‌اند (۲۳). تلماسه‌ها مناطق گسترده‌ای از شمال ایران به‌خصوص استان گلستان را پوشانده‌اند. در مناطق خشک و بیابانی اصلی‌ترین عامل جابه‌جایی مواد و فرسایش باد است (۴). تشکیل تلماسه به‌میزان ماسه در منشاء، جهت باد، قدرت باد و وضعیت مسیر انتقال بستگی دارد (۱۸). ضخامت تلماسه در بسیاری از نقاط ممکن است محدوده‌ای بین ۰/۳ تا ۰/۶ متر در هر مرحله تشکیل باشد (۱۴) ولی در بعضی از مناطق ضخامت تلماسه در هر مرحله تا ۶ متر هم گزارش شده است (۲۴). در حالت عادی سرعت حرکت ذرات ماسه به‌طور متوسط ۴/۵ m/sec است (۲۱). سرعت برشی آستانه باد برای بلندکردن ذرات تلماسه‌ها ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در ثانیه باید باشد (۱۹). هر چه تلماسه خشک‌تر باشد، حرکت آن آسان‌تر انجام می‌شود. در تلماسه‌های مرطوب به‌علت وجود نیروی چسبندگی سطحی سرعت برشی آستانه آن بیش از تلماسه‌های خشک می‌باشد (۲۴). این نهشته‌ها به‌علت تشکیل در محیط اکسیداسیونی اغلب دارای رنگ قرمز و قهوه‌ای هستند و دارای جورشدگی خوبی می‌باشند (۱۴).

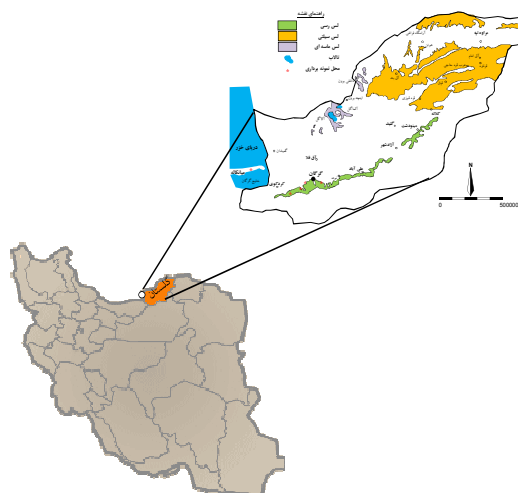
اثر ریزدانه‌ها بر رفتار مقاومت برشی نهشته‌های بادی به منظور کاهش فرسایش پذیری

مقدار ذرات در اندازه رس در تلماسه‌ها اندک است و به‌همین دلیل فاقد چسبندگی بوده و با کمترین نیرو، تنش برشی در آن فعال می‌شود (۱۸). از دیدگاه ژئوتکنیکی این نهشته‌ها موادی در اندازه ماسه بوده که دارای ضریب یکنواختی (Cu- Uniformity coefficient) نزدیک به یک است. نفوذپذیری این مواد نسبتاً بالاست و در حد 10^{-4} m/sec می‌باشد (۱۸). اثر ریزدانه‌ها به‌شدت میزان نفوذپذیری را کنترل می‌کند و ممکن است تا 10^{-8} m/sec نفوذپذیری آن‌را کاهش

دهد (۱۳). مقاومت برشی آن صرفاً تابع زاویه اصطکاک (Friction angle) بین دانه‌هاست. کانی اصلی تشکیل دهنده تلماسه کوارتز است و ترکیب شیمیایی آن عموماً از اکسیدهای سیلیکاته، آلومینیوم و آهن‌دار می‌باشد و در بعضی از مناطق مقدار SiO_2 ممکن است به‌بیش از ۹۵٪ برسد. در بعضی از مناطق میزان کربنات کلسیم (CaCO_3) نیز در تلماسه قابل ملاحظه است (۱۷). با انجام آزمون کلسیمتری در تلماسه‌های شمال استان گلستان، مقدار CaCO_3 برابر ۶/۵ تا ۱۳ درصد اندازه‌گیری شده است.

پارامترهای برشی تلماسه در ارتباط با سرعت آستانه فرسایش بوده و از نتایج آن در پروژه‌های تثبیت ماسه، جلوگیری از فرسایش، پایداری دامنه‌ها، احداث خاکریز، افزایش قابلیت تراکم استفاده می‌شود (۱۷ و ۲۲). در مناطق کویری و خشک برای تثبیت حرکت تلماسه و حفظ محیط زیست از مواد مصنوعی مثل قیر، مالچ، موانع توری استفاده می‌شود (۱۵). یکی دیگر از روش‌های تثبیت تلماسه‌ها اختلاط آن با آهک، سیمان و یا خاک چسبنده است (۱۰). با افزایش مقدار ناچیزی مواد ریزدانه چسبنده علاوه بر افزایش مقاومت برشی می‌توان بستر رشد گیاهان را فراهم نمود و قدرت نگهداری آب در لایه‌های سطحی بالا خواهد رفت. وجود کانی‌های رسی کنترل‌کننده شدت فرسایش در نهشته‌ها بادی است (۸) و با افزایش درصد رس مقدار عامل فرسایش‌پذیری کاهش پیدا می‌کند (۱، ۲، ۱۲) به‌طوری‌که با افزایش مواد ریزدانه‌ای مثل بتونیت ضریب نفوذپذیری آن تا ۱۰۰۰۰ بار کاهش می‌یابد (۱۳).

سطح وسیعی از استان گلستان توسط نهشته‌ها بادرفتی مثل تلماسه، لس و مشتقات آن پوشانده است (۳ و ۶) و بسیاری از پروژه‌های مهندسی مثل کانال‌های انتقال آب و شبکه‌های آبرسانی، راه و راه آهن، ساختمان و سازه‌های آبی بر روی آنها ساخته می‌شوند و مخاطرات آبشویی، پایپینگ (۷) و فرونشست همواره آنها را تهدید می‌کند و قابلیت بالای فرسایش یکی از اصلی‌ترین مخاطرات در لس‌ها است (۱۶). هدف از این مطالعه بررسی تغییرات مقاومت خاک در برابر مواد ریزدانه افزودنی و



شکل ۱. موقعیت محل تحقیق و محل‌های نمونه‌برداری

به‌طور کلی اندازه دانه‌های لس از شمال‌شرق به سمت جنوب‌غرب کاهش می‌یابد (۹).

شبه‌جزیره میانکاله از جمله نواحی مهم زمین‌شناسی خزر بوده که در دوران کواترنری تحولات و فرگشت‌های زمین‌شناختی بر آن با محیط‌های رسوبی دریایی متأثر گردیده‌است (۵). مجموعه‌ای از نهشته‌ها خزری با دانه‌بندی در اندازه سیلت تا ماسه‌ریز یکی از ویژگی‌های لیتولوژیکی و رسوب‌شناختی شبه‌جزیره به‌شمار می‌آید. این نهشته‌ها توسط باد حمل و ته‌نشین‌شده و موسوم به تلماسه می‌باشد.

بسیاری از نمودهای ژئومورفیکی در این شبه‌جزیره به‌شکل همگن مشهود است این بدین معناست که به‌دلیل تأثیر امواج دریا از یک سو و باد از سوی دیگر عوامل فرسایش را در سطح شبه‌جزیره در ماه‌های مختلف سال ایجاد کرده و به روشنی تناوب‌هایی از محیط‌های رسوبی متأثر از فعالیت باد و امواج در محیط وجود دارد. ساختار ژئومورفیکی سواحل شبه‌جزیره میانکاله، پیروی از شرایط هیدرودینامیک امواج خزر را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که در ساحل شمالی، کرانه بسیار آرام و ملایم به‌دلیل عملکرد امواج دریای بزرگ خزر و لیتولوژی بستر شکل گرفته و حتی خطوط جذر و مدی نیز

رسیدن به درصد اختلاط بهینه است. نتایج به‌دست آمده می‌تواند تصمیم‌گیری در انتخاب روش مقابله با فرآیند فرسایش را با اطمینان بیشتری حاصل نماید.

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در استان گلستان مربوط به دو ناحیه شبه جزیره میانکاله و گرگان است (شکل ۱). نمونه مناسب از تلماسه‌های شبه جزیره میانکاله در آزمایشگاه با نسبت‌های مختلف از مواد ریزدانه متعلق به لس‌های منطقه گرگان مخلوط و مورد آزمایشات مختلف قرار گرفته است. در سطح این استان سه نوع لس از نظر دانه‌بندی وجود دارد و شامل لس ماسه‌ای، لس سیلتی و لس رسی است که قریب به ۲۰ درصد مساحت خاک‌های استان را به‌خود اختصاص داده‌است (۱۱). لس‌های ماسه‌ای در شمال‌غرب استان پراکنده‌اند و تا ساحل شرقی دریای خزر ادامه داشته و در شمال آق‌قلا و گمیشان به تلماسه‌ها ختم می‌شود (۳). لس‌های سیلتی در شمال و شرق استان گسترش داشته و لس‌های رسی در حدفاصل بین کوه و دشت و در دامنه‌های شمالی البرز و به‌صورت یک نوار باریک از مینودشت در شرق استان تا جنوب ساری ادامه دارد (شکل ۲).

منطقه میانکاله می‌شوند و چون دریای خزر را طی می‌کند دارای مقادیر زیادی رطوبت می‌باشد. جهت باد غالب دارای زاویه ۲۷۰ درجه (غربی) است. سرعت باد تا ۲۳/۱ متر در ثانیه ثبت شده است و به‌طور میانگین ۳/۱۳ متر در ثانیه است (۲۵).

مواد و روش‌ها

تلماسه مورد مطالعه از نهشته‌های ساحل دریای خزر انتخاب شده است به‌طوری‌که در یک پروفیل به‌طول ۵۰۰ متر در عرض شبه جزیره میانکاله با امتداد ترانسکت شمال به جنوب برداشت گردید. علت انتخاب تلماسه‌ها از محل شبه جزیره میانکاله، سالم‌بودن تلماسه از لحاظ عدم تأثیر فرآیندهای ثانویه مثل هوازدگی، فرسایش و انحلال است. در این پروفیل ده نمونه اخذ شده و با هم مخلوط شدند و یک نمونه میانگین به‌دست آمد. با آنالیز انجام شده در آزمایشگاه ترکیب شیمیایی تلماسه عمدتاً از سه جزء SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 تشکیل شده است (جدول ۱). متوسط چگالی ماسه مورد مطالعه ۲/۷۷ و ضریب یکنواختی آن ۱/۹۶ به‌دست آمد. قطر متوسط ذرات در D_{50} برابر با ۰/۱۷ میلی‌متر است. براساس طبقه‌بندی متحد (Unified Classification System) این خاک از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده (SP- Poorly graded sand) است.

به منظور بررسی اثر ریزدانه رسی بر رفتار برشی تلماسه مورد مطالعه، از خاک لس رس‌دار منطقه گرگان از نوع رس لاغر (CL- Lean clay) استفاده شده است. کانی‌های رسی موجود در لس‌های رسی منطقه گرگان، به‌طور عمده ایلیت و کلریت است (۶). در لس‌های منطقه گرگان کانی‌های گروه اسمکتیت نیز دیده می‌شوند که نتیجه هوازدگی و تجزیه کانی‌های میکاست (۵). حد روانی (Liquid limit - LL) آن ۴۲ و شاخص خمیری (Plasticity index - PI) آن برابر ۲۲ درصد اندازه‌گیری شده و چگالی آن برابر ۲/۶۲ و اندازه متوسط قطر ذرات در D_{50} حدود ۲۰ برابر ریزتر از اندازه تلماسه در این قطر می‌باشد (شکل ۲).

پیشروی آب در خشکی را تأثیر می‌نماید. این درحالی‌است که نواری از زمین ریخت‌های تلماسه‌ای در درازای شبه جزیره و متمایل به سمت ساحل شمالی مشاهده شده که شیب ملایم این تلماسه‌ها در راستای وزش باد از سمت دریا به خشکی و شیب تند تپه‌ها خلاف جهت باد را نشان می‌دهد (۵).

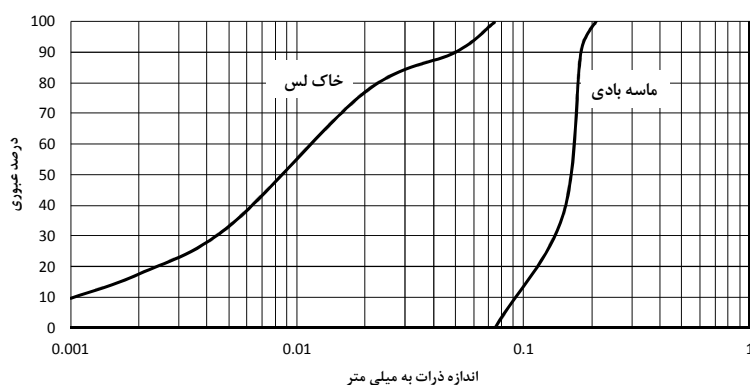
مورفولوژی تلماسه‌ها که به پهنای متوسط ۱ - ۱/۵ کیلومتر از پهنای مورفولوژیکی کل شبه جزیره را پوشانیده در گذشته متحرک و تهدیدکننده بوده، به‌طوری‌که در سال‌های گذشته با درخت‌کاری بر روی این تپه‌ها منجر به تثبیت و ممانعت از جابه‌جایی و تحرک آنان گردیده است (۲۵).

شبه جزیره میانکاله از نظر ویژگی‌های اقلیم عمدتاً تحت تأثیر شرایط جوی حاکم بر دریای خزر است. مقدار بارندگی آن بین ۶۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر در سال است. ماه آبان دارای بیشترین بارندگی و ماه خرداد دارای کمترین بارندگی است. میانگین درجه حرارت سالانه در این منطقه برابر ۱۷/۲ درجه سانتی‌گراد است. حداکثر دمای متوسط ماهانه در تابستان ۲۴ درجه سانتی‌گراد بوده و در ماه‌های سرد سال گاهی دما به زیر صفر می‌رسد. رطوبت هوا زیاد بوده و متوسط سالانه آن حدود ۷۰٪ است (۲۵).

به‌طور کلی در این شبه جزیره سه نوع باد شامل بادهای دریا به خشکی، جریان‌های هوای سرد قطبی و جریان‌های ناشی از سیستم‌های کم‌فشار در طول سال می‌وزد. بادهای دریا به خشکی حاصل اختلاف فشار بین دریای خزر و خشکی ساحلی خلیج گرگان می‌باشد که هنگام روز میزان فشار در سطح دریا بیش از خشکی است و از این رو جریان هوایی به‌سوی خشکی برقرار می‌گردد و دمای هوا را تا حدی کاهش می‌دهد. جریان‌های هوای سرد قطبی از نواحی پرفشار سرد قطبی خصوصاً سیبری به‌سوی دشت، دریا و سواحل جنوبی خلیج گرگان می‌وزند و اغلب با کاهش دما همراه می‌باشد و در فصل زمستان جهت باد از خشکی به‌سوی دریا است. در نهایت جریان‌های ناشی از سیستم‌های کم‌فشار از غرب و شمال‌غربی دریای خزر وارد

جدول ۱. درصد اکسیدهای تلماسه انتخابی (۵)

SiO _۲	Al _۲ O _۳	Fe _۲ O _۳	K _۲ O	MgO	Na _۲ O	سایر
۷۴/۱	۱۱/۵	۵/۲	۱/۹	۱/۵	۱/۶	۴/۲



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی تلماسه و لس مورد استفاده

جدول ۲. خواص ژئوتکنیکی مواد مورد استفاده در تحقیق

مواد	نام خاک	C _u	C _c	D ₅₀	G _s	LL	PI
لس رس‌دار	CL	۱۱	۱/۰۵	۰/۰۰۸۵	۲/۶۲	۴۱/۲	۲۱/۸
تلماسه	SP	۱/۹۶	۱/۰۲	۰/۱۷	۲/۷۷	-	ندارد

تحکیم‌یافته-زهکشی‌شده (CD- Consolidated- drained) بر نمونه اعمال شده‌است. نمونه‌ها در بارهای قائم مختلف از ۰/۳ تا ۲ کیلوگرم آزمایش شدند. ولی اغلب نمونه‌ها تحت بارهای قائم ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع قرار گرفته‌اند؛ به‌طوری‌که برای تعیین پارامترهای برشی خاک حداقل سه نمونه مشابه تهیه و تحت آزمایش قرار گرفتند (جدول ۳).

آزمایشات دانه‌بندی، تعیین حدود آتربرگ (Atterberg limits)، چگالی، تراکم ارتعاشی برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی انجام شده‌است. در تراکم ارتعاشی دانسیته حداقل و حداکثر تلماسه به‌ترتیب ۱/۴۸، ۱/۶۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب به‌دست آمد.

ضریب خمیدگی (C_c-Coefficient of gradation) این دو مواد با هم نزدیک است. درصد عبوری از الک ۲۰۰ تلماسه کمتر از یک درصد و از آن صرف‌نظر شده‌است و درصد ریزتر از ۰.۰۰۲ میلی‌متر برای مواد ریز دانه رسی حدود ۱۸ درصد است (جدول ۲). ریزدانه‌ها با نسبت‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد انتخاب و با تلماسه کاملاً مخلوط‌شده و با دانسیته حداکثر بازسازی‌شده (Remoulded) و سپس تحت آزمون برش مستقیم قرار گرفت. دانسیته حداکثر از طریق آزمون تراکم ارتعاشی در آزمایشگاه طبق استاندارد ASTM D1298 انجام شده‌است. دستگاه آزمون برش مستقیم دارای قالب ۱۰×۱۰×۲ سانتی‌متر بوده و نمونه‌ها در شرایط خشک و اشباع در درون قالب قرارگرفته و آزمایش شدند. روش آزمایش با سرعت کند و مشابه شرایط

جدول ۳. مقادیر حداکثر تنش برشی مخلوط به تفکیک بارهای قائم

درصد ریزدانه مخلوط	بار قائم kg/cm^2		
	۰/۵	۱	۱/۵
۰	۰/۶۹	۱/۳	۱/۸۵
۵	۰/۴۸	۰/۸۸	۱/۲۴
۱۰	۰/۴۹	۰/۸۳	۱/۱۹
۱۵	۰/۴۹	۰/۸۱	۱/۱۵
۲۰	۰/۵۱	۰/۸۴	۱/۱۵
۲۵	۰/۵۳	۰/۸۴	۱/۱۴
۳۰	۰/۵۶	۰/۸۵	۱/۱۴

بحث

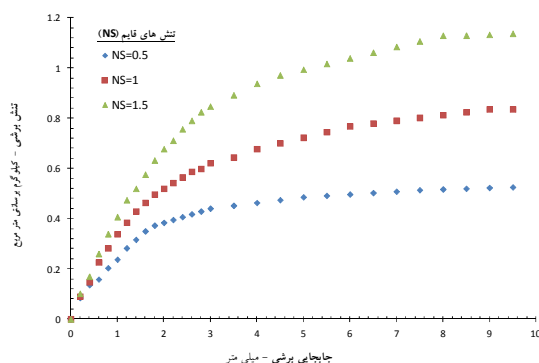
دو پارامتر نیروی چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) رفتار برشی خاک را کنترل می‌کند؛ مقاومت برشی توسط فاکتورهای تشکیل خاک، ترکیب آن و شرایط آب و هوایی تعیین می‌شود (۱۳). در شرایط خشک تلماسه خالص دارای دو مقاومت اوج و ماندگار است (شکل ۲-الف) ولی در حالت‌های اشباع و یا مخلوط با ریزدانه این دو مقاومت قابل تفکیک نیستند (شکل ۲-ب). در شرایط خشک و اشباع مقادیر C و ϕ اندکی با هم متفاوت بود و در شرایط خشک مقادیر ϕ ، C بالاتر به دست آمد.

در نمونه‌های تلماسه خالص (صفر درصد ریزدانه) مقدار ϕ در شرایط اوج و ماندگار بسیار به هم نزدیک بوده و تلماسه پس از رسیدن به مقاومت اوج دچار کاهش مقاومت شده و ساختار متراکم رس به هم می‌ریزد و اندکی کاهش مقاومت نشان می‌دهد اما با افزایش ریزدانه در تلماسه منحنی تنش برشی - جابه‌جایی برشی (Shear Stress - Shear Displacement Curve) دچار تغییر می‌شود، به طوری که این منحنی‌ها دارای نقطه حداکثر نبوده و یا این که نقطه اوج را نمی‌توان تفکیک نمود. رفتار خاک از حالت متراکم به صورت پلاستیک خواهد بود و به حالت خزش (Creep)

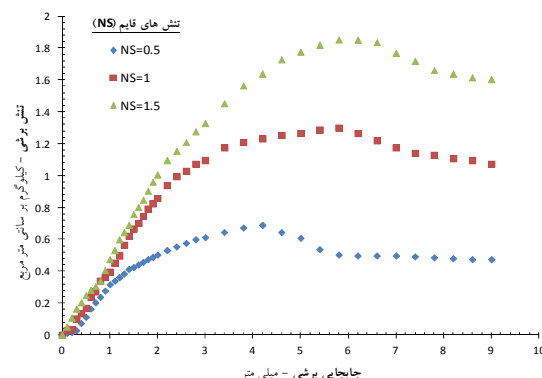
نزدیک می‌شود. برای تعیین پارامترهای برشی خاک مخلوط با توجه به این که نقطه اوج مشخص نبود از مقاومت در ۱۰ درصد تغییر شکل استفاده شده است (شکل ۲-ب).

در شرایط خشک، زاویه اصطکاک داخلی تلماسه خالص (صفر درصد ریزدانه) با دانسیته حداکثر برابر ۴۵/۶ درجه به دست آمد و چسبندگی خاک تقریباً صفر بوده است. نمونه‌های فاقد ریزدانه (فقط تلماسه) در مقاومت اوج (Peak) دارای مقدار ناچیزی چسبندگی بوده ولی در مقاومت ماندگار (Residual) مقدار C آن صفر است (شکل ۳). تلماسه خالص هم چون مواد دانه‌ای دارای یک نقطه مقاومت اوج می‌باشد و پس از آن با اندکی کاهش در مقاومت به حد مقاومت ماندگار می‌رسد.

درجه اشباع شدگی اثر محسوسی بر پارامترهای برشی ندارد، اگرچه این موضوع برای خاک‌های با ریزدانه بالا متفاوت بوده و درجه اشباع شدگی بین ۰/۴ تا ۰/۶ بیشترین مقاومت را برای خاک به وجود می‌آورد (۲۰). لذا در آب و هوای مختلف می‌توان از طرح تثبیت ماسه به این روش استفاده نمود، بدون آنکه مقاومت خاک کم شود. چون که به دلیل نفوذپذیری بالا فرآیند زهکشی با سهولت انجام شده و فشار آب حفره‌ای (Water pore pressure) از بین می‌رود و شرایط خشک و اشباع نمونه تا حد زیادی مشابه است.

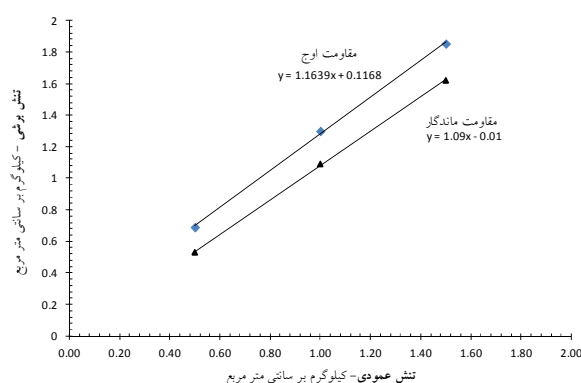


(ب)



(الف)

شکل ۲. منحنی‌های تنش برشی-جابجایی برشی تلماسه خالص (الف) و مخلوط ۲۵ درصد لس با تلماسه (ب) در شرایط خشک



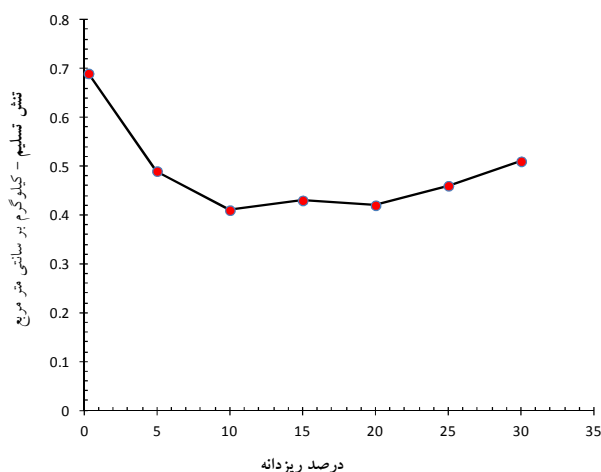
شکل ۳. حد گسیختگی تلماسه خالص در مقاومت اوج و ماندگار در حالت خشک

خواهد گذاشت و با اضافه کردن بیشتر مواد ریزدانه مدول ارتجاعی نیز کاهش می‌یابد (۲۳).

سه عامل اصلی تراکم، تنش مؤثر (Effect stress) و ساختار خاک کنترل‌کننده پارامترهای برشی خاک محسوب می‌شوند. در تلماسه خالص اثر دو پارامتر تراکم و تنش مؤثر (بارقائم) مشخص است و اثر ساختار خاک با افزایش ریزدانه معین می‌گردد.

ترکیب شیمیایی و فیزیکوشیمیایی به‌طور غیرمستقیم بر رفتار برشی خاک مؤثر است (۲۲) و یک پدیده تابع زمان (Time depended phenomenon) است.

با اندازه‌گیری مدول ارتجاعی ($E_{(50)}$ - Elasticity Modulus) نمونه‌های خشک و اشباع و تلماسه خالص و مخلوط در قسمت ۵۰ درصد ناحیه ارتجاعی از منحنی تنش برشی - جابه‌جایی برشی نتیجه می‌شود، با افزایش ریزدانه مدول ارتجاعی کاهش می‌یابد. در شرایط خشک در بار قائم (NS) مختلف اندازه مدول ارتجاعی ثابت است ولی در نمونه‌های اشباع با افزایش بارقائم مقدار مدول ارتجاعی اندکی اضافه می‌شود. در شرایط اشباع مقدار مدول ارتجاعی بیشتر تابع بارقائم است و تابع میزان درصد مواد ریزدانه نیست. در نمونه‌های مخلوط اگر مقدار ریزدانه از ۶۰ درصد وزنی بیشتر شود، بر مقدار مدول ارتجاعی اثر محسوسی



شکل ۴. اثر درصد ریزدانه بر مقدار تنش تسلیم خاک مخلوط

رابطه نمایی منفی بین درصد ریزدانه‌ها و زاویه اصطکاک داخلی به دست می‌آید (جدول ۳ و شکل ۵). یک رابطه لگاریتمی بین درصد ریزدانه‌ها (F) با زاویه اصطکاک داخلی خاک مخلوط به صورت زیر (رابطه ۲) در محدوده مطالعاتی با همبستگی $r^2 = 0.976$ برقرار است.

$$\phi = 42.3 - 21.3 \ln(F) \quad [2]$$

از طرفی با افزایش ریزدانه‌ها نیروی چسبندگی بصورت نمایی افزایش می‌یابد (شکل ۵) و بین آن دو رابطه‌ای نمایی با همبستگی $r^2 = 0.994$ برقرار است (رابطه ۳).

$$C = 9.14 e^{0.247(F)} \quad [3]$$

در این رابطه مقدار نیروی چسبندگی (C) برحسب کیلوپاسکال بدست می‌آید.

اگر چه عواملی چون اثر بارقایی، اشباع شدگی، سرعت بارگذاری، دست‌خوردگی نمونه‌ها بر پارامترهای برشی خاک مؤثر است. لیکن میزان ریزدانه اثر زیادی بر مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و نیروی چسبندگی آن دارد و در هر حال باعث افزایش مقاومت برشی خواهد شد.

همان‌طور که می‌دانیم حداکثر تنش ایجادشده در مرحله ارتجاعی خاک به تنش تسلیم معروف است. اندازه تنش تسلیم بین ۵۰ تا ۶۰ درصد تنش حداکثر می‌باشد و با اضافه شدن تا ۱۰ درصد ریزدانه اندازه تنش تسلیم کاهش می‌یابد ولی بیشتر از ۱۰ درصد مقدار تنش تسلیم نیز بزرگتر می‌گردد (شکل ۴).

زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) به وسیله دو عامل اصلی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. انرژی وارد بر خاک توسط بارخارجی با غلبه بر مقاومت اصطکاکی ما بین ذرات خاک، برای منبسط کردن خاک در مقابله با فشار محدودکننده نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دانه‌های خاک از نظر شکل خیلی بی‌نظم و بی‌قاعده‌اند و برای این‌که لغزش رخ دهد دانه‌ها باید روی هم بلند شوند. بنابراین مقدار عددی زاویه اصطکاک داخلی خاک به صورت زیر (رابطه ۱) تعیین می‌شود (۱۵).

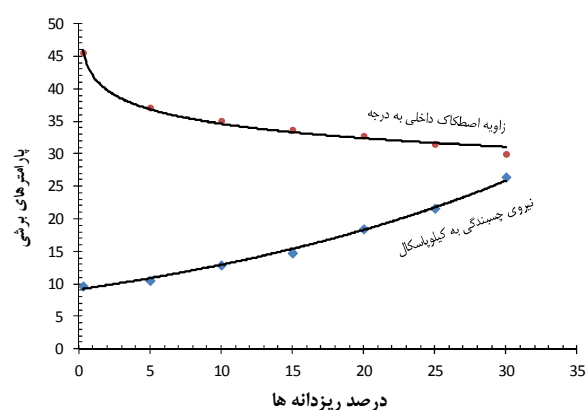
$$\mu = \mu + \beta \quad [1]$$

که در آن μ زاویه اصطکاک لغزشی مابین سطوح دانه‌ها و β اثر قفل و بست بین آنهاست.

با افزایش ریزدانه فاصله بین ذرات درشت بیشتر شده و اثر قفل و بست بین دانه‌ها (β) کاهش می‌یابد. به همین دلیل که یک

جدول ۳. نتایج پارامترهای برشی نمونه مخلوط در نسبت‌های اختلاط مختلف

درصد ریزدانه	زاویه اصطکاک داخلی	نیروی چسبندگی
مخلوط	درجه	کیلوپاسکال
۰	۴۵/۶	۹/۷
۵	۳۷/۱	۱۰/۵
۱۰	۳۵/۱	۱۲/۹
۱۵	۳۳/۷	۱۴/۸
۲۰	۳۲/۸	۱۸/۵
۲۵	۳۱/۵	۲۱/۶
۳۰	۳۰	۲۶/۴



شکل ۵. اثر ریزدانه بر پارامترهای برشی

نتیجه‌گیری

سرعت‌های معمولی باد این نسبت اختلاط منجر به کاهش فرسایش پذیری خاک در حد زیاد می‌شود.

با افزایش درصد ریزدانه‌ها به تلماسه‌ها، مقاومت برشی زیاد می‌شود؛ اگرچه زاویه اصطکاک داخلی به‌صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد ولی مقدار نیروی چسبندگی به‌صورت نمایی افزایش نشان می‌دهد. نیروی چسبندگی بیش از زاویه اصطکاک داخلی بر مقاومت برشی تلماسه‌ها اثر دارد.

منحنی تنش برشی و جابه‌جایی برشی تلماسه خالص، دارای دو نقطه اوج و مقاومت ماندگار مشخص است؛ ولی با افزایش مواد

روش‌های مختلفی برای بهبود پارامترهای برشی تلماسه و مقاومت آن در برابر عوامل دینامیکی مثل باد و جریان آب توسط محققین پیشنهاد شده‌است؛ از جمله آن اختلاط با آهک، سیمان، مواد پلیمری و خاک چسبنده می‌باشد. از این میان به‌استفاده از خاک چسبنده به‌دلیل وفور در محیط کار، سهولت اجرا و ملاحظات اقتصادی توجه بیشتری می‌شود؛ علاوه‌برآن نتایج تحقیق نشان می‌دهد که افزودن حداقل ۱۰٪ مواد ریزدانه، باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای از پارامترهای برشی خاک می‌شود. به‌طوری‌که در

ریزدانه نقطه مقاومت اوج نامشخص می‌شود و با افزایش جابه‌جایی برشی مقدار تنش برشی دارای روند ثابت صعودی بوده و رفتار خاک حالت خزش دارد. درصد پائین ریزدانه اثر محسوسی روی مدول ارتجاعی ندارد؛ ولی در درصد اختلاط بالاتر مدول ارتجاعی کم می‌شود. درجه اشباع شدگی در تلماسه خالص اثر محسوسی بر پارامترهای برشی ندارد. به‌طور کلی مطالعه محققین نشان می‌دهد با افزودن ۱۰ تا ۱۵ درصد مواد ریزدانه چسبنده به تلماسه‌ها، مقاومت برشی آن بهبود یافته و نیروی چسبندگی به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد و مقدار نفوذپذیری از 10^{-4} تا 10^{-8} سانتی‌متر بر ثانیه کاهش یافته و قابلیت تراکم پذیری نمونه مخلوط آن بالا می‌رود. از کاربردهای عملی این تحقیق می‌توان به طرح اختلاط منابع قرضه پروژه‌های عمرانی، اصلاح خاک نرم و کم مقاومت در برابر فرسایش، افزایش دوام خاک و مقاومت باربری، کاهش نفوذپذیری و جلوگیری از پدیده پایپینگ، کاهش تولید گرد و غبار و توسعه پوشش گیاهی و اجرای عملیات بیابان زدایی اشاره نمود.

منابع مورد استفاده

۱. آرمین، م.، ع. نجفی نژاد و و. قربان نیا. ۱۳۸۶. رابطه بین عامل فرسایش‌پذیری و برخی عوامل فیزیکی خاک در خاک‌های لسی استان گلستان. چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دانشگاه کرج. ۲۱ تا ۲۲ اسفند ۱۳۸۶.
۲. احمدی، ح. ۱۳۷۸. ژئومورفولوژی کاربردی. جلد ۱. فرسایش آبی. چاپ سوم. انتشارات دانشگاه تهران.
۳. احمدی بیرگانی، ح.، م. ر. جوادی و و. حبیبی اربطانی. ۱۳۸۵. منشاء یابی نهشته‌ها ماسه‌ای و لسی مناطق بیابانی استان گلستان (مطالعه مورد دشت آق‌قلا و گمیشان). همایش منابع طبیعی و توسعه پایدار در عرصه‌های جنوبی دریای خزر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور.
۴. اختصاصی، م. و ح. احمدی. ۱۳۷۶. بررسی کیفی و کمی فرسایش بادی و برآورد میزان رسوب در دشت یزد - اردکان. مجله منابع طبیعی ایران، ۵۰ (۲): ۱۳-۵.
۵. امینی. ا. ۱۳۹۱. رسوب شناسی و ژئوشیمی نهشته‌ها هولوسن خلیج گرگان در جنوب شرق خزر. رساله دکتری رسوب‌شناسی و سنگ‌رسوب، دانشگاه فردوسی مشهد.
۶. امینی جهرمی، ح.، م. ی. ناصری، ف. خرمالی و ع. موحدی نائینی. ۱۳۸۷. کانی شناسی خاک‌های با مواد مادری لس در دو منطقه از استان گلستان (هوتن، گرگان). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵ (۵): ۲۶-۱۸.
۷. پاشایی، ع. ۱۳۷۶. بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و چگونگی خاستگاه رسوب‌های لسی در منطقه گرگان و رشت. مجله علوم زمین ۶ (۲۴-۳۳): ۷۸-۶۷.
۸. ثروتی، م.، ج. قدوسی و ز. تیموری یانسری. ۱۳۸۸. ژئومورفولوژی لس‌های منطقه یلی بدراق شمال شرق استان گلستان (شهرستان کاله). فصل‌نامه جغرافیایی طبیعی ۱ (۳): ۹۷-۱۱۴.
۹. خواجه، م. ۱۳۸۱. بررسی رسوب‌شناسی، محیط رسوبی و رسوب‌زایی نهشته‌های کواترنر حوزه گرگانرود (یل چشمه و قورچای). رساله دکتری زمین‌شناسی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
۱۰. خیاط، ن.، ف. کادمی و ب. حلبی ساز، ۱۳۸۹. روش‌های مختلف اجرا و ساخت کانال‌های آبیاری در ماسه بادی، دومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی.

۱۱. فیض‌نیا، س.، ج. غیومیان و م. خواجه، ۱۳۸۴. بررسی عوامل فیزیکی، شیمیایی و آب و هوایی در تولید رسوب ناشی از فرسایش خاک‌های لسی (مطالعه موردی استان گلستان)، مجله پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، ۲۳: ۶۶-۱۴.
۱۲. عیسایی، ح.، ج. چرخابی و ح. اعتراف. ۱۳۸۶. بررسی ارتباط خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های لسی با اشکال فرسایشی در حوزه آبخیز اترک و گرگانرود در استان گلستان. مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج. ۴ تا ۶ شهریور.
13. Ameta N. K. and A.S. Wayal. 2008. Effect of Bentonite on permeability of dune sand. *Electronic J. of Geotechnical Eng.* 13(A).23-29.
14. Ci L. and X. Yang. 2010. *Desertification and Its Control in China*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 507 p.
15. Das, B. M. 2008. *Advanced Soil Mechanics*. Taylor & Francis (3^{ed}).
16. Dodonov A. E. and L. Zhou. 2008. Loess deposition in Asia: its initiation and development before and during the Quaternary. *Episodes* 31(2): 222-225.
17. Gueddouda, M. K., M.D. Lamara, N. Aboubaker and S.Taibi. 2008. Hydraulic conductivity and shear strength of dune sand-bentonite mixtures. *Electronic J. of Geotechnical Eng.*, 13(H).1-15.
18. Kroy, K., G. Sauermann and H.J. Herrmann. 2002. Minimal model for sand dunes, *Physical Review Letters*, 88(5):054301-054305.
19. Iriondo M.H. and D.M. Krohling. 2007. Non-classical types of loess. *Sedimentary Geology* 202: 352-368.
20. Maaitah, O.N. and S.A. Allah-Mahadin. 2004. Variation on shear strength of unsaturated subgrade causes road cracks. *J. Applied Sci.*, 4: 335-339.
21. Mitsova, H., M. Overton and R.S. Harmon. 2005. Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina. *Geomorphology* 72: 204- 221.
22. Pakbaz, M.S., S.A. Tabatabaei and, B. Boroumandzadeh. 2008. Evaluation of factors affecting parameter m in drained shear strength of over consolidated soils. *Int. J. Soil Sci.* 3: 127-137.
23. Shafiee, A., H.R. Tavakoli and M.K. Jafari. 2008. Undrained behavior of compacted sand-clay mixtures under monotonic loading paths. *J. Applied Sci.* 8: 3108-3118.
24. United Nations Environment Program (UNEP).1998. Manual for sand dune management. In the wider Caribbean.
25. <http://sayarehsabz.blogfa.com/post-4.aspx.7/5/1391>