

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

حامد رضایی<sup>۱\*</sup>، غلامرضا لشکری پور<sup>۲</sup>، محمد غفوری<sup>۳</sup> و ناصر حافظی مقدس<sup>۴</sup>

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

### چکیده

مواد ریزدانه از نوع نهشته‌های لس رس دار منطقه گرگان با تلماسه در آزمایشگاه با نسبت‌های مختلف مخلوط شده 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 به صورت 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 پژوهش‌های ثبت ماسه، جلوگیری از فرسایش، پایداری دامنه‌ها، احداث خاکریز، افزایش قابلیت تراکم و جلوگیری از ایجاد گرد و غبار و آسودگی‌های زیست محیطی و کانال‌های آبرسانی به کار 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

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 آهن دار می‌باشد و در بعضی از مناطق مقدار  $\text{SiO}_2$  ممکن است بهیش از ۹۵٪ بررسد. در بعضی از مناطق میزان کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) نیز در تلماسه قابل ملاحظه است (۱۷). با انجام آزمون کلسیمتری در تلماسه‌های شمال استان گلستان، مقدار  $\text{CaCO}_3$  برابر  $6/5$  تا  $۱۳$  درصد اندازه‌گیری شده‌است.

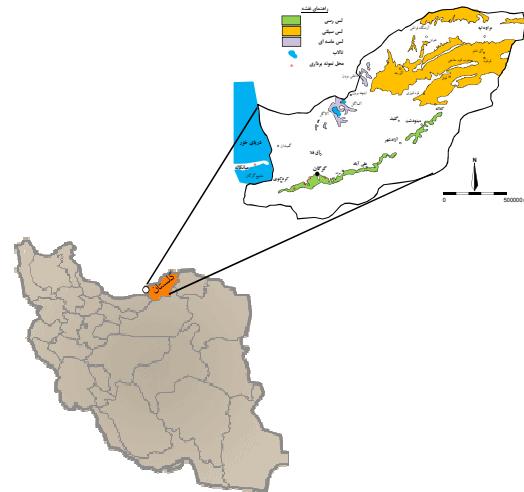
پارامترهای برشی تلماسه در ارتباط با سرعت آستانه فرسایش بوده و از نتایج آن در پروژه‌های ثبت ماسه، جلوگیری از فرسایش، پایداری دامنه‌ها، احداث خاکریز، افزایش قابلیت تراکم استفاده می‌شود (۱۷ و ۲۲). در مناطق کویری و خشک برای ثبت حرکت تلماسه و حفظ محیط زیست از مواد مصنوعی مثل قیر، مالچ، موائع توری استفاده می‌شود (۵). یکی دیگر از روش‌های ثبت 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 کنترل کننده شدت فرسایش در نهشته‌ها بادی است (۸) و با افزایش درصد رس مقدار عامل فرسایش پذیری کاهش پیدا می‌کند (۱۱، ۱۲، ۱۳) به طوری که 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 (۶ و ۳) 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 برایر مواد ریزدانه افزودنی و

یکی از اولین تحقیقات انجام‌شده درباره تلماسه‌ها (Sand dune) تحقیقات بگنولد (Bagnold) در سال ۱۹۵۴ می‌باشد (۲۴). تلماسه‌ها ذراتی در اندازه‌های  $۰.۰۱۷$  تا  $۰.۲$  میلی‌متر را در بر می‌گیرد و بیش از یک سوم صحراهای دنیا را پوشانده‌اند (۲۳). تلماسه‌ها مناطق گستردگی از شمال ایران به خصوص استان گلستان را پوشانده‌اند. در مناطق خشک و بیابانی اصلی ترین عامل جابه‌جایی مواد و فرسایش باد است (۴). تشکیل تلماسه به میزان ماسه در منشاء، جهت باد، قدرت باد و وضعیت مسیر انتقال بستگی دارد (۱۸). ضخامت تلماسه در بسیاری از نقاط ممکن است محدوده‌ای بین  $۰/۶$  تا  $۰/۳$  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 به طور متوسط  $۴/۵ \text{ m/sec}$  است (۲۱). سرعت برشی آستانه باد برای بلندکردن ذرات تلماسه‌ها  $۰/۲۰$  تا  $۰/۴۰$  متر در ثانیه باید باشد (۱۹). هر چه تلماسه خشک‌تر باشد، حرکت آن آسان‌تر انجام می‌شود. در تلماسه‌های مرتبط به علت وجود نیروی چسبنده‌گی سطحی سرعت برشی آستانه آن بیش از تلماسه‌های خشک می‌باشد (۲۴). این نهشته‌ها به علت تشکیل در محیط اکسیداسیونی اغلب دارای رنگ قرمز و قهوه‌ای هستند و دارای جورشیدگی 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 به همین دلیل فاقد چسبنده‌گی 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  $۱۰^{-۴} \text{ m/sec}$  می‌باشد (۱۸). اثر ریزدانه‌ها به شدت میزان نفوذپذیری را کنترل می‌کند و ممکن است تا  $۱۰^{-۸} \text{ m/sec}$  نفوذپذیری آن را کاهش



شکل ۱. موقعیت محل تحقیق و محل‌های نمونه‌برداری

به طورکلی اندازه دانه‌های لس از شمال شرق به سمت جنوب غرب کاهش می‌باید (۹).

شبه‌جزیره میانکاله از جمله نواحی مهم زمین‌شناسی خزر بوده که در دوران کواترنری تحولات و فرگشت‌های زمین‌شناختی بر آن با محیط‌های رسوی دریایی متأثر گردیده است (۵). مجموعه‌ای از نهشته‌ها خزری با دانه‌بندی در اندازه سیلت تا ماسه‌ریز یکی از ویژگی‌های لیتو‌لوژیکی و رسوب شناختی شبه‌جزیره به‌شمار می‌آید. این نهشته‌ها توسط باد حمل و تنه‌نشین شده 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 رسوی 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 دریایی بزرگ خزر و لیتو‌لوژی بستر شکل گرفته و حتی خطوط جذر و مدبی 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 شبه‌جزیره میانکاله و گرگان است (شکل ۱). نمونه مناسب از تلماسه‌های شبه‌جزیره 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 داده است (۱۱). لس‌های ماسه‌ای در شمال غرب استان پراکنده‌اند و تا ساحل شرقی دریای خزر ادامه داشته و در شمال آق‌قلاء و گمیشان به تlmاسه‌ها 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 به صورت 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 به طور میانگین ۳/۱۳ متر در ثانیه است (۲۵).

## مواد و روش‌ها

تماسه مورد مطالعه از نهشته‌های ساحل دریای خزر انتخاب شده است به طوری که در یک پروفیل به طول ۵۰۰ متر در عرض شبه جزیره میانکاله با امتداد ترانسکت شمال به جنوب برداشت شدید. علت انتخاب تماسه‌ها از محل شبه جزیره میانکاله، سالم‌بودن تماسه 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 به دست آمد. با آنالیز انجام شده در آزمایشگاه ترکیب شیمیایی تماسه عمدتاً از سه جزء  $\text{SiO}_4$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  تشکیل شده است (جدول ۱). متوسط چگالی ماسه مورد مطالعه ۲/۷۷ و ضریب یکنواختی آن ۰/۱۷ به دست آمد. قطر متوسط ذرات در  $D_50$  برابر با ۰/۹۶ میلی‌متر است. براساس طبقه‌بندی متحده Unified Classification SP-Poorly (System) این خاک از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده (System graded sand) است.

به منظور بررسی اثر ریزدانه رسی بر رفتار بررشی تماسه مورد مطالعه، از خاک لس رس دار منطقه گرگان از نوع رس لاغر (CL- Plasticity) استفاده شده است. کانی‌های رسی موجود در لس‌های رسی منطقه گرگان، به طور عمده ایلیت و کلریت است (۶). در لس‌های منطقه گرگان کانی‌های گروه اسمکتیت نیز دیده می‌شوند که نتیجه هوادیدگی و تجزیه کانی‌های میکا است (۵). حد روانی (Plastic limit - LL) آن ۴۲ و شاخص خمیری (Liquid index - PI) آن برابر ۲۲ درصد اندازه‌گیری شده و چگالی آن برابر ۰/۶۲ و اندازه متوسط قطر ذرات در  $D_50$  حدود ۰/۵ برابر ریزتر از اندازه تماسه در این قطر می‌باشد (شکل ۲).

پیش روی آب در خشکی را تأثیر می‌نماید. این درحالی است 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).

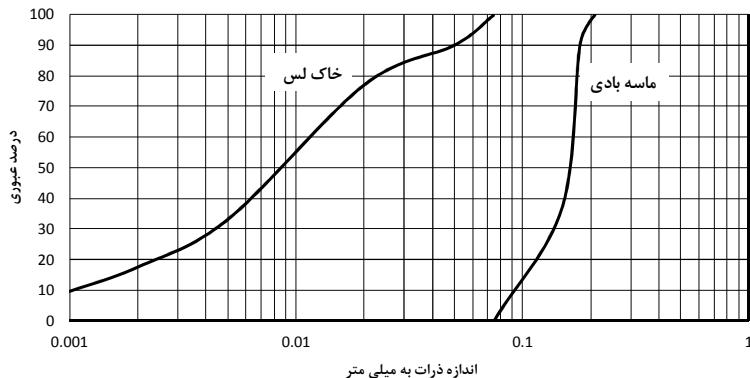
مورفولوژی تلماسه‌ها که به پهنهای متوسط ۱/۵ کیلومتر از پهنهای مورفولوژیکی کل شبه جزیره را پوشانیده در گذشته متحرک و تهدیدکننده بوده، به طوری که در سال‌های گذشته با درخت‌کاری بر روی این تپه‌ها منجر به تثبیت و ممانعت از جابه‌جایی و تحرک آنان گردیده است (۲۵).

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. حداقل 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 ۷/۷۰٪ است (۲۵).

به طورکلی 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 به سوی خشکی برقرار می‌گردد و دمای هوا را تا حدی کاهش می‌دهد. جریان‌های هوای سرد قطبی از نواحی پرفشار سرد قطبی خصوصاً سیبری به سوی دشت، دریا و سواحل جنوبی خلیج گرگان می‌وزند و اغلب با کاهش دما همراه می‌باشد و در فصل زمستان جهت باد از خشکی به سوی دریا است. در نهایت جریان‌های ناشی از سیستم‌های کم فشار از غرب و شمال‌غربی دریای خزر وارد

جدول ۱. درصد اکسیدهای تلماسه انتخابی (۵)

سایر	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
۴/۲	۱/۶	۱/۵	۱/۹	۵/۲	۱۱/۵	۷۴/۱



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی تلماسه و لس مورد استفاده

جدول ۲. خواص ژئوتکنیکی مواد مورد استفاده در تحقیق

مواد	نام خاک	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	D <sub>50</sub>	G <sub>s</sub>	LL	PI
لسرس دار	CL	۱۱	۱/۰۵	۰/۰۰۸۵	۲/۶۲	۴۱/۲	۲۱/۸
تلمسه	SP	۱/۹۶	۱/۰۲	۰/۱۷	۲/۷۷.	-	ندارد

تحکیم یافته- زهکشی شده (CD- Consolidated- drained) بر نمونه اعمال شده است. نمونه‌ها در بارهای قایم مختلف از ۰/۳ تا ۲ کیلوگرم آزمایش شدند. ولی اغلب نمونه‌ها تحت بارهای قایم ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع قرار گرفته‌اند؛ به طوری که 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 شده است. در تراکم ارتعاشی دانسیته حداقل و حداکثر تلماسه به ترتیب ۱/۴۸، ۱/۶۵، ۱/۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمد.

ضریب خمیدگی (C<sub>u</sub>-Coefficient of gradation) این دو مواد با هم نزدیک است. درصد عبوری از الک ۲۰۰ تلماسه کمتر از یک درصد و از آن صرف نظر شده است و درصد ریزتر از ۰.۰۰۲ میلی متر برای مواد ریز دانه رسی حدود ۱۸ درصد است (جدول ۲). ریزدانه‌ها با نسبت‌های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد انتخاب و با تلماسه کاملاً مخلوط شده و با دانسیته حداکثر بازسازی شده (Remoulded) و سپس تحت آزمون برش مستقیم قرار گرفت. دانسیته حداکثر از طریق آزمون تراکم ارتعاشی در آزمایشگاه طبق استاندارد ASTM D1298 انجام شده است. دستگاه آزمون برش مستقیم دارای قالب  $10 \times 10 \times 2 \times 2$  سانتی متر بوده و نمونه‌ها در شرایط خشک و اشباع در درون قالب قرار گرفته و آزمایش شدند. روش آزمایش با سرعت کند و مشابه شرایط

جدول ۲. مقادیر حداکثر تنش برشی مخلوط به تفکیک بارهای قائم

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

نژدیک می شود. 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) یا دانسیته حداکثر برابر ۴۵/۶ درجه به دست آمد و چسبندگی خاک تقریباً صفر بوده است. نمونه های فاقد ریز دانه ( فقط تلماسه) در مقاومت اوج (Peak) دارای مقدار ناچیزی چسبندگی بوده ولی در مقاومت ماندگار (Residual) مقدار C آن چسبندگی بوده ولی در مقاومت ماندگار است (شکل ۳). تلماسه خالص همچون مواد دانه ای دارای صفر است (شکل ۳). تلماسه خالص همچون مواد دانه ای دارای یک نقطه مقاومت اوج می باشد و پس از آن با اندکی کاهش در مقاومت به حد مقاومت ماندگار می رسد.

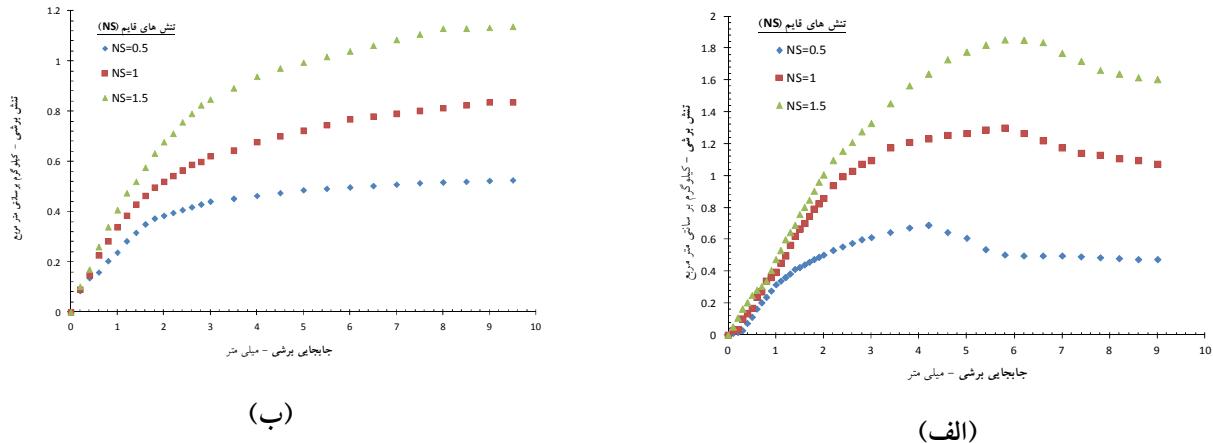
درجه اشباع شدگی اثر محسوسی بر پارامترهای برشی ندارد، اگرچه این موضوع برای خاک های با ریزدانه بالا متفاوت بوده و درجه اشباع شدگی بین ۰/۶ تا ۰/۴ بیشترین مقاومت را برای خاک به وجود می آورد (۲۰). لذا در آب و هوای مختلف می توان از طرح تثبیت ماسه به این روش استفاده نمود، بدون آنکه مقاومت خاک کم شود. چون که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

## بحث

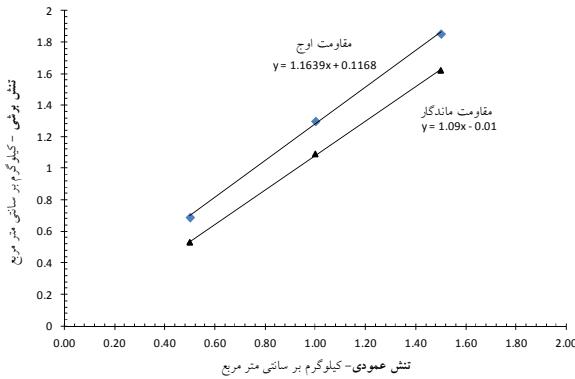
دو پارامتر نیروی چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) رفتار برشی خاک را کنترل می کند؛ مقاومت برشی توسط فاکتورهای تشکیل خاک، ترکیب آن و شرایط آب و هوایی تعیین می شود (۱۳). در شرایط خشک تلماسه خالص دارای دو مقاومت اوج و ماندگار است (شکل ۲-الف) ولی در حالت های اشباع و یا مخلوط با ریزدانه این دو مقاومت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

در نمونه های تلماسه خالص (صفر درصد ریزدانه) مقدار  $\phi$  در شرایط اوج و ماندگار بسیار بهم نژدیک بوده و تلماسه پس از رسیدن به مقاومت اوج دچار کاهش مقاومت شده و ساختار متراکم افزایش ریزدانه در تلماسه منحنی تنش برشی - جابه جایی برشی (Shear Stress - Shear Displacement Curve) دچار تغییر می شود، به طوری که این منحنی ها دارای نقطه حداکثر نبوده و یا این که نقطه اوج را نمی توان تفکیک نمود. رفتار خاک از حالت متراکم به صورت پلاستیک خواهد بود و به حالت خرزش (Creep)

## اثر ریزدانه‌ها بر رفتار مقاومت برشی نهشته‌های بادی بهمنظر...



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

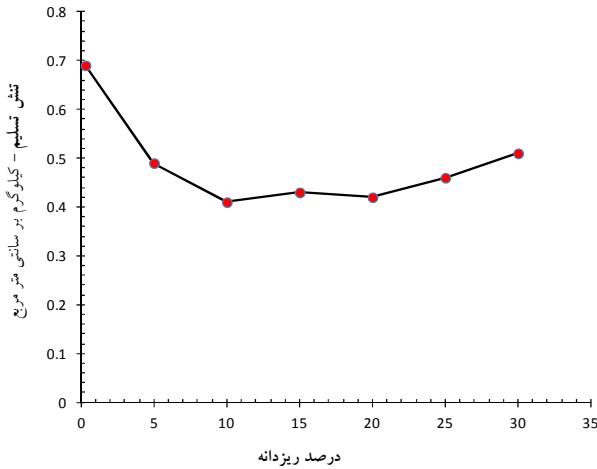


شکل ۳ . حد گسیختگی تلماسه خالص در مقاومت اوج و ماندگار در حالت خشک

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 (بارقایم) مشخص است و اثر ساختار خاک با افزایش ریزدانه معین می‌گردد. ترکیب شیمیایی و فیزیکوشیمیایی به طور غیرمستقیم بر رفتار برشی خاک مؤثر است(۲۲) و یک پدیده تابع زمان (Time depended phenomenon) است.

با اندازه‌گیری مدول ارتجاعی(Elasticity Modulus)  $E_{(50)}$  نمونه‌های خشک و اشباع و تلماسه خالص و مخلوط در قسمت ۵۰ درصد ناحیه ارتجاعی از منحنی تنش‌برشی - 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 بارقایم مقدار مدول ارتجاعی اندکی اضافه می‌شود. در شرایط اشباع مقدار مدول ارتجاعی بیشتر تابع بارقایم 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 تنفس 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  $r = 0.976$  برقرار است.

$$\phi = 42 - \frac{3}{212} \ln(F) \quad [2]$$

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

$$C = 9/14 e^{-0.347(F)} \quad [3]$$

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

اگر چه عواملی چون اثر بارقایم، 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 تنفس ایجاد شده در مرحله ارجاعی خاک به تنفس تسلیم معروف است. اندازه تنفس تسلیم بین ۵۰ تا ۶۰ درصد تنفس حداکثر می‌باشد و با اضافه شدن تا ۱۰ درصد ریزدانه اندازه تنفس تسلیم کاهش می‌یابد ولی بیشتر از ۱۰ درصد مقدار تنفس تسلیم نیز بزرگ‌تر می‌گردد (شکل ۴).

زاویه اصطکاک داخلی خاک( $\phi$ ) به‌وسیله دو عامل اصلی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. انرژی وارد بر خاک توسط بارخارجی با غلبه بر مقاومت اصطکاکی ما بین ذرات خاک، برای منسوب‌کردن 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).

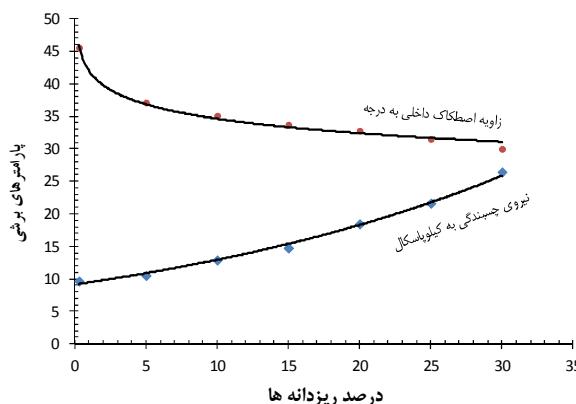
$$\mu + \beta = \frac{1}{\phi} \quad [1]$$

که در آن  $\mu$  زاویه اصطکاک لغزشی مابین سطوح دانه‌ها و  $\beta$  اثر قفل و بست بین آنهاست.

با افزایش ریزدانه فاصله بین ذرات درشت بیشتر شده و اثر قفل و بست بین دانه‌ها ( $\beta$ ) کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل که یک

جدول ۲. نتایج پارامترهای برشی نمونه مخلوط در نسبتهاي اختلاط مختلف

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



شکل ۵. اثر ریزدانه بر پارامترهای برشی

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 به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد ولی مقدار نیروی چسبندگی به صورت نمایی افزایش نشان می‌دهد. نیروی چسبندگی بیش از زاویه اصطکاک داخلی بر مقاومت برشی تلماسه‌ها اثر دارد.

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

## نتیجه‌گیری

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

یافته و نیروی چسبندگی به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد و مقدار نفوذپذیری از  ${}^4\text{--}{}^{10}$  تا  ${}^{10}\text{--}{}^8$  سانتی‌متر برثانیه کاهش یافته و قابلیت تراکم پذیری نمونه مخلوط آن بالا می‌رود. از کاربردهای عملی این تحقیق می‌توان به طرح اختلاط منابع قرضه پروره‌های عمرانی، اصلاح خاک نرم و کم مقاومت در برابر فرسایش، افزایش دوام خاک و مقاومت باربری، کاهش نفوذپذیری و جلوگیری از پدیده پایینگ، کاهش تولید گرد و غبار و توسعه پوشش گیاهی و اجرای عملیات بیابان زدایی اشاره نمود.

ریزدانه نقطه مقاومت اوج نامشخص می‌شود و با افزایش جابه‌جایی برشی مقدار تنفس برشی دارای روند ثابت صعودی بوده و رفتار خاک حالت خرزش 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.

به طور کلی مطالعه محققین نشان می‌دهد با افزودن  ${}^{10}\text{--}{}^{15}$  درصد مواد ریزدانه چسبنده به تلماسه‌ها، مقاومت برشی آن بهبود

### منابع مورد استفاده

- آرمن، م.، ع. نجفی نژاد 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، ۱۲ اسفند ۱۳۸۶.
- احمدی، ح. ۱۳۷۸. ژئومورفولوژی کاربردی. جلد ۱. فرسایش آبی. چاپ سوم. انتشارات دانشگاه تهران.
- احمدی بیرگانی، ح.، م.ر. جوادی و. و. حبیبی اریطنی. ۱۳۸۵. منشاء یابی نهشته‌ها ماسه‌ای و لسی مناطق بیابانی استان گلستان (مطالعه مورد داشت آق‌قلاده و گمیشان). همایش منابع طبیعی و توسعه پایدار در عرصه‌های جنوبی دریای خزر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور.
- اختصاصی، م. و ح. احمدی. ۱۳۷۶. بررسی کیفی و کمی فرسایش بادی و برآورد میزان رسوب در دشت بیزد – اردکان. مجله منابع طبیعی ایران، ۵۰(۲): ۵-۱۳.
- امینی، ا. ۱۳۹۱. رسوب شناسی و ژئوشیمی نهشته‌ها هولوسن خلیج گرگان در جنوب شرق خزر. رساله دکتری رسوب‌شناسی و سنگرسوب، دانشگاه فردوسی مشهد.
- امینی جهرمی، ح.، م.ی. ناصری، ف. خرمائی 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.
- 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.
- ثروتی، م.، ج. قدوسی و ز. تیموری یانسری. ۱۳۸۸. ژئومورفولوژی لس‌های منطقه یلی بدرآق شمال شرق استان گلستان (شهرستان کلاله). فصلنامه جغرافیایی طبیعی، ۱(۳): ۱۱۴-۹۷.
- خواجه، م. ۱۳۸۱. بررسی رسوب‌شناسی، محیط رسوبی و رسوب‌زایی نهشته‌های کواترنر حوزه گرگان‌رود (بل چشمه و قورچای). رساله دکتری زمین‌شناسی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- خیاط، ن.، ف. کادمی و ب. حلیبی 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 موردي استان گلستان)، مجله پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، ۱۴-۶۶:۲۳
۱۲. عیسایی، ح.، ج. چرخایی و ح. اعتراف. ۱۳۸۶. بررسی ارتباط خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های لسی با اشکال فرسایشی در حوزه آبخیز اترک و گرگانزود 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<sup>ed</sup>).
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. Mitasova, H., M. Overtonand 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>