تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۱۶
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۳۰

اثرات آب میان‌دانه‌ای بر رفتار برشی ماسه مرطوب: بررسی با آزمایش‌های برش‌مستقیم و مدل‌سازی فیزیکی گسلش

محمد احمدی (نویسنده مسئول)
دانشجوی دکتری مهندسی عمران-زلزله (گرایش ژئوتکنیک)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران
mo.ahmadi@iiees.ac.ir

سید مجتبی موسوی
استادیار مهندسی عمران، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

محمدکاظم جعفری
استاد مهندسی عمران، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

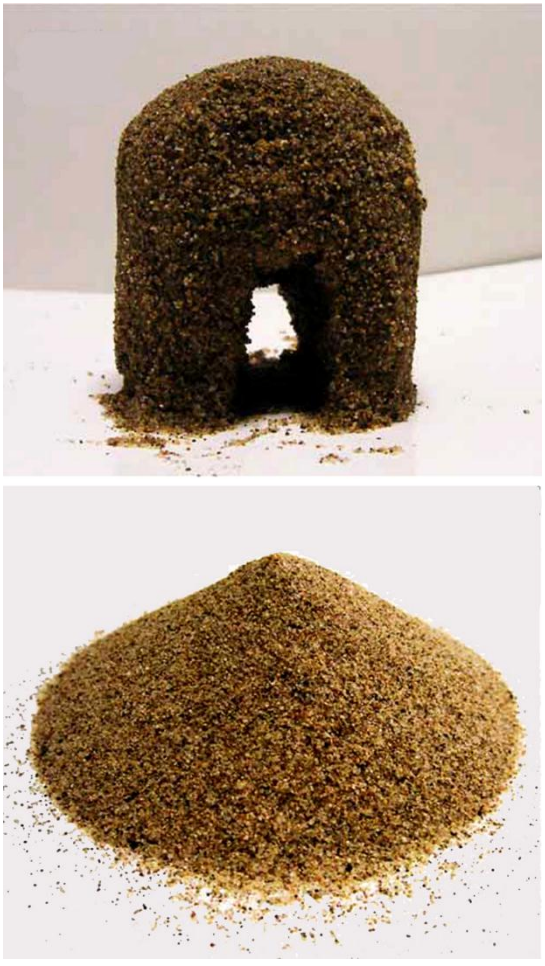
چکیده
وجود آب میان‌دانه‌ای باعث ایجاد چسبندگی ظاهری در خاک‌های دانه‌ای و تغییر رفتار برشی آنها می‌شود. همین چسبندگی ظاهری اندک، اثرات بزرگی بر پدیده‌های ژئوتکنیکی همچون گسلش سطحی دارد. در این تحقیق، اثر آب میان‌دانه‌ای بر تغییر رفتار برشی خاک‌های دانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. از آزمایش‌های برش مستقیم و مدل‌سازی فیزیکی گسلش برای بررسی استفاده شد. رفتار برشی خاک‌های خشک، مرطوب (با رطوبت ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) و اشباع در نه تنش قائم بین ۰/۰۱۵ تا ۱/۲۵ kgf/cm^2 با استفاده از دستگاه برش مستقیم بررسی شدند. وجود رطوبت در سربارهای کم موجب انحنای پوش گسیختگی و در نتیجه تغییر خصوصیات ژئومکانیکی خاک می‌شود. در عین ناچیز بودن چسبندگی در این حالت، افزایش زاویه اصطکاک داخلی مشاهده شده است. وجود رطوبت در تنش‌های کم، با کاهش کرنش گسیختگی خاک، رفتاری تُرد در آن ایجاد می‌کند. تغییر رفتار خاک در تنش‌های بالا نیز مورد بحث قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی فیزیکی نشان می‌دهد که رفتار گسلش در خاک‌های دارای چسبندگی ظاهری، متفاوت از خاک‌های دانه‌ای غیر چسبنده است. عرض باند برشی ایجادشده و میزان جابه‌جایی مورد نیاز گسل در سنگ بستر برای رسیدن گسلش به سطح زمین در خاک‌های مرطوب کمتر از خاک‌های خشک بوده و با درصد رطوبت ارتباط دارد. همخوانی کاملی بین مشاهدات حاصل از آزمایش‌ها مشاهده می‌شود.

واژگان کلیدی: آب‌میان‌دانه‌ای، ماسه مرطوب، چسبندگی ظاهری، آزمایش برش مستقیم، مدل‌سازی فیزیکی گسلش سطحی، کرنش گسیختگی.

۱- مقدمه

در طبیعت، به ندرت خاک‌های کاملاً خشک و یا کاملاً اشباع مشاهده می‌شود. خاک‌ها، خصوصاً اندکی پایین‌تر از لایه فوقانی‌شان، عموماً دارای حداقلی از آب میان‌دانه‌ای هستند که با توجه به مقدار آن، می‌توانند خصوصیات ژئومکانیکی آن را تغییر دهد. مکانیک خاک کلاسیک بیشتر بر روی رفتار خاک در شرایط خشک یا در شرایط اشباع تعریف شده است. فراوانی خاک‌های غیر اشباع باعث شده امروزه مکانیک خاک غیر اشباع به‌طور ویژه مورد توجه پژوهشگران حوزه ژئوتکنیک قرار بگیرد. وجود آب میان‌دانه‌ای در بین ذرات خاک می‌تواند رفتار ژئومکانیکی کاملاً متفاوتی به آنها دهد. این تغییر رفتار، خصوصاً در خاک‌های دانه‌ای، به وضوح قابل مشاهده است. رفتار مکانیکی مصالح دانه‌ای مرطوب بسیار متفاوت از رفتار آن در حالت خشک است. تحقیقات علمی بر روی مصالح دانه‌ای سابقه‌ای بسیار طولانی، خصوصاً در حوزه مهندسی دارد. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر منظور از مصالح دانه‌ای، خاک‌های دانه‌ای همچون ماسه‌های استاندارد هستند. بزرگ‌ترین تفاوت رفتار خاک‌های مرطوب نسبت به خاک‌های خشک، چسبندگی ناشی از کشش سطحی به دلیل وجود آب در حفرات خاک و نیروی موئینگی ناشی از آن است که اصطلاحاً به آن «چسبندگی ظاهری[1]» گفته می‌شود. در واقع اثر ماکروسکوپیک موئینگی در خاک‌های غیر اشباع، فشردن دانه‌های

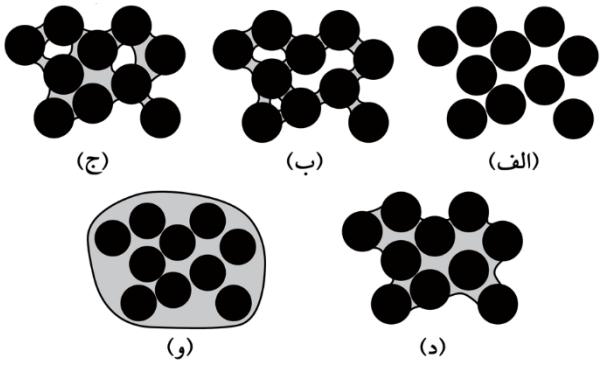
ماتریس خاک به یکدیگر است که منجر به ایجاد این چنین چسبندگی در خاک‌های دانه‌ای غیر چسبنده می‌شود [۱]. یکی از واضح‌ترین تفاوت‌های خاک‌های خشک و مرطوب را می‌توان در سواحل مشاهده نمود. ساخت قلعه‌های شنی با ماسه‌های مرطوب توسط کودکان، نمونه واضحی از تفاوت رفتار است. درصورتی که ماسه‌های خشک درشیب‌هایی حدود ۳۵ درجه و بیشتر پایدار نمی‌مانند، توده ماسه مرطوب می‌تواند حتی با زاویه ۹۰ درجه و بیشتر نیز پایدار بماند (شکل ۱)[۲]. در مهندسی ژئوتکنیک اگرچه اندازه تنش کششی اغلب کمتر از چند صد کیلو پاسکال است، با این حال همین چسبندگی ظاهری اندک، اثرات بسیار بزرگی را در ظرفیت باربری، پایداری شیروانی و دیگر مسائل ژئوتکنیکی دارد [۱]. این مسئله، به دلیل تغییر رفتار ژئومکانیکی خاک‌های مرطوب نسبت به حالت خشک است.



شکل (۱): تفاوت رفتار ماسه در حالت خشک و مرطوب [۲]

۲- مکانیک مصالح دانه‌ای مرطوب

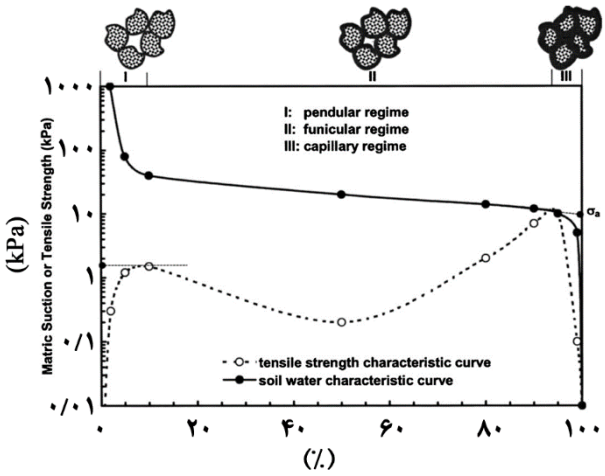
میزان چسبندگی ظاهری خاک‌های دانه‌ای به میزان درصد رطوبت آن وابسته است. به‌طورکلی سه فضای مختلف درصد رطوبتی برای خاک‌های مرطوب قابل تعریف است (شکل ۲): ۱) Pendular؛ ۲) Funicular؛ و ۳) Capillary [۲]. در حالت Pendular ذرات جامد خاک به‌اصطلاح توسط پل‌های آب (مایع)[۲] در محل نقاط اتصالشان به یکدیگر نگه داشته می‌شوند. حالت Funicular حالتی است که برخی از حفرات خاک از آب اشباع شده‌اند اما همچنان حفراتی وجود دارند که پُر از هوا باشند. در حالت Capillary (موئینگی)، تمامی حفرات بین ذرات جامد خاک از آب پر شده، با این حال سطوح هلالی وجود داشته و به سمت داخل کشیده می‌شوند. در این حالت فشار آب کمتر از فشار هوا بوده و باعث ایجاد چسبندگی ظاهری می‌شود. پس از این مرحله، حالت اشباع کامل وجود داشته که فشار مایع صفر و یا بیشتر از فشار هوا بوده، سطوح هلالی مایع از بین رفته و هیچ‌گونه چسبندگی ظاهری وجود نخواهد داشت [۲].



شکل (۲): رژیم‌های مختلف رطوبتی: ماسه الف) خشک، ب) Pendular، ج) Funicular، د) Capillary و هـ) اشباع [۲].

رفتار خاک‌های دانه‌ای در هر یک از رژیم‌های ذکر شده می‌تواند کاملاً متفاوت باشد. در خاک‌های ماسه‌ای، حالت Pendular در درجه اشباع کمتر از ۲۰٪ و حالت Capillary در درجه اشباع بالای ۹۰٪ (و حتی بیش از ۹۳٪) تعریف می‌شود. بازه بین، حالت Funicular نامیده می‌شود. لو و همکاران [۳] بیان می‌دارند که در خاک‌های ماسه‌ای ریز، حداکثر تنش کششی خاک در رژیم

Pendular و در حدود ۵ درصد رطوبت رخ می‌دهد. پس‌ازآن در رژیم Funicular این مقدار کاهش یافته (یا ثابت باقی می‌ماند) و سپس در مرز بین رژیم Capillary و Funicular مجدداً افزایش پیدا می‌کند. شکل (۳) تغییرات مقاومت کششی (منحنی نقطه‌چین) برحسب درجه اشباع را برای خاک ماسه‌ای نشان می‌دهد. مرزهای تعریف شده بین رژیم‌های مختلف تقریبی بوده و می‌تواند برای مصالح دانه‌ای گوناگون متفاوت باشد.



شکل (۳): تغییرات تنش کششی برحسب درجه اشباع برای خاک ماسه‌ای [۳].

۳- اثر رطوبت بر پدیده گسلش سطحی

تا پیش از سال ۱۹۹۹ میلادی، شواهد میدانی اندکی از وقوع گسل‌های سطحی و خسارت‌های ناشی از آن به سازه‌های روزمینی و زیرزمینی گزارش شده بود؛ اما سه زلزله قدرتمند کوجیلی و دوزچی ترکیه و همچنین چی چی تایوان در این سال، اهمیت بررسی پدیده گسلش سطحی را بر مهندسان عمران و به‌خصوص مهندسین ژئوتکنیک نمایان ساخت. موارد بسیار متعددی از وقوع گسلش‌های سطحی و وارد آمدن خسارات بسیار شدید به ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی در این زلزله‌ها گزارش شد [۴-۷]. لذا انجام تحقیقات بر روی این پدیده به‌طور ویژه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت [۸-۱۶].

پیش از وقوع این سه زلزله، تحقیقات پراکنده و اندکی در زمینه شناخت پدیده گسلش سطحی انجام پذیرفته بود که درخور توجه است [۱۷-۲۰]. نکته مهم این است که عموماً سطح زمین، از مصالح خاکی تشکیل شده و روند توسعه گسلش به سمت سطح زمین می‌تواند به‌شدت در این لایه تغییر نماید. با توجه به وجود پارامترهای متعدد و اثرگذاری هر یک از آنها بر پدیده گسلش سطحی، کاملاً منطقی است که تحقیقات اولیه بر روی ساده‌ترین حالات ممکن انجام پذیرفته شده باشد. این مسئله خود را در مدل‌سازی فیزیکی پدیده گسلش به‌صورت استفاده از ماسه خشک در غالب تحقیقات انجام شده پس از سال ۱۹۹۹ میلادی نیز نشان می‌دهد [۱۰، ۱۵-۱۶]. این در حالی است که در تحقیقات پراکنده انجام شده پیش از این سال، نمونه‌هایی از استفاده از مصالح چسبنده همچون مصالح رسی به چشم می‌خورد [۲۱-۲۴].

دلیل استفاده از خاک ماسه‌ای خشک را می‌توان به موارد زیر مرتبط نمود: ۱) سرعت بالای ساخت مدل فیزیکی در صورت بررسی بر روی ماسه خشک به دلیل استفاده از روش بارش ماسه؛ ۲) عدم نیاز به در نظر گرفتن اثر فشار آب حفره‌ای در تحلیل نتایج آزمایش‌های فیزیکی و خصوصاً تحلیل‌های عددی؛ ۳) لزوم توجه به وجود مسئله تحکیم در خاک‌های رسی پس از ساخت مدل فیزیکی. در مورد اخیر ذکر این نکته ضروری است که روش ساخت نمونه‌های با درصد بالای مصالح رسی، می‌تواند کاملاً متفاوت نسبت به ساخت نمونه‌های ماسه‌ای (چه در حالت خشک و چه در حالت مرطوب) باشد. عموماً خاک‌های رسی ابتدا با مقادیر بسیار زیاد آب مخلوط شده، به شکلی که خمیر یا دوغاب رسی را شکل دهند. سپس این خمیر یا دوغاب در داخل مخزن خاک ریخته می‌شود. بدین‌شکل می‌توان مدلی کاملاً همگن از خاک‌های رسی تهیه نمود. مشکل اساسی اینجاست که به دلیل وجود آب زیاد در نمونه خاکی، تحکیم خاک ضروری به نظر می‌رسد. بااین‌حال درصورتی‌که آزمایش بخواهد بر روی خاکی با شرایط تحکیم نشده زهکشی نشده (UU) انجام بپذیرد، نیازی به انجام عملیات تحکیم نیست

[۲۳]. عدم تحکیم نمونه می‌تواند تشابه مدل آزمایشگاهی را با مدل واقعی دچار خطاهای جدی نماید. به این دلایل تمایل به بررسی پدیده گسلش سطحی بر روی خاک‌های ماسه‌ای خشک (بدون چسبندگی) بسیار زیاد است.

در طبیعت و خصوصاً در مناطق شهری که وقوع پدیده گسلش سطحی به دلیل اندرکنش آن با سازه‌های رو زمینی و زیرزمینی دارای اهمیت بیشتری می‌باشد، خاک‌های سطحی زمین به‌ندرت دانه‌ای و خشک هستند. سؤال اینجاست که آیا روند توسعه گسلش بر روی خاک‌های غیر دانه‌ای و دارای چسبندگی و رطوبت می‌تواند با روند توسعه گسلش در خاک‌های دانه‌ای خشک یکسان باشد؟ واضح است که وجود رطوبت و چسبندگی می‌تواند رفتار مهندسی خاک‌ها را دچار تغییر اساسی نماید. شواهد میدانی از گسل‌های سطحی رخ‌داده نشان می‌دهد که رفتار گسل‌ها در خاک‌های چسبنده و دارای رطوبت می‌تواند تفاوت آشکاری با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه بر روی خاک‌های دانه‌ای خشک داشته باشد. ازجمله این تفاوت‌های اساسی، متمرکز بودن باند برشی و ایجاد گسلش تیز[۳] در سطح زمین در خاک‌های دارای رطوبت و چسبندگی است. این در حالی است که در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی با ماسه خشک، پروفیل تغییر شکل سطح زمین بسیار تدریجی و اصطلاحاً نرم است و جابه‌جایی اختلافی ناشی از گسلش در سطح زمین در بازه نسبتاً وسیع‌تری توزیع می‌شود. تفاوت بین پروفیل تغییر شکل سطح زمین در خاک‌های چسبنده و مرطوب با نتایج آزمایشگاهی انجام شده بر روی خاک دانه‌ای خشک در شکل (۴) نشان داده شده است. اهمیت این مسئله در ایجاد خرابی های محتمل به سازه‌های رو زمینی است. هر چه توزیع جابه‌جایی در محیط وسیع‌تری به وقوع بپیوندد، احتمال اینکه سازه آسیب کمتری ببیند، می‌تواند بیشتر باشد. این در حالی است که گسلش‌های به اصطلاح تیز می‌تواند برای سازه‌ها بسیار خطرآفرین و خسارت‌بار باشد.

با توجه به اهمیت شناخت رفتار خاک‌های دانه‌ای مرطوب، همچون ماسه مرطوب، در تحقیق حاضر به بررسی رفتار این خاک با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم و مدل‌سازی فیزیکی گسلش پرداخته شده است. مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم جهت بررسی رفتار ژئومکانیکی خاک های مرطوب تحت سربارهای مختلف برنامه ریزی و اجرا شد. همچنین مدل‌سازی فیزیکی گسلش بر روی خاک با درصد رطوبت مختلف انجام و برخی از نتایج حاصل از آن، همچون میزان جابه جایی مورد نیاز در سنگ بستر برای رسیدن گسلش به سطح زمین، با

شکل (۴): تفاوت گسیختگی سطح زمین در خاک‌های واقعی دارای چسبندگی و رطوبت (چپ) با آزمایش های رایج مدل سازی فیزیکی بر روی خاک دانه‌ای بدون چسبندگی (راست) در اثر پدیده گسلش سطحی.

استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم مورد واکاوی قرار گرفتند. در ابتدا مشخصات و روند انجام مدل‌سازی فیزیکی گسلش و آزمایش‌های برش مستقیم شرح داده شده و سپس بحث و بررسی پیرامون نتایج آزمایش‌ها انجام پذیرفته است.

۴- آزمایش‌های گسلش با تغییر درصد رطوبت خاک

۴-۱- مخزن گسلش

جهت مدل‌سازی گسلش در محیط 1g از مخزن گسلش پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استفاده شده است. کف این مخزن، از یک بخش ثابت و یک بخش متحرک تشکیل شده است که با حرکت بخش متحرک به سمت بالا یا پایین و در راستای زاویه تعیین شده، به‌ترتیب گسلش معکوس و عادی (نرمال) شبیه‌سازی می‌شود. در تحقیق حاضر تنها گسلش معکوس مورد بررسی قرار خواهد گرفت. طول و عرض مخزن به‌ترتیب ۱۰۰ و ۳۸ سانتی‌متر است. ارتفاع خاک در مدل حداکثر می‌تواند ۴۰ سانتی متر باشد. با این حال در تحقیق حاضر ارتفاع خاک ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. دو وجه این مخزن شفاف بوده و از پلکسی‌گلس ساخته شده است که این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان روند توسعه گسلش از کف به سطح و باندهای برشی ایجاد شده را ره‌گیری و مشاهده نمود. جهت اعمال جابه‌جایی از یک الکتروموتور با سرعت جابه‌جایی ثابت استفاده شده است. حداکثر جابه‌جایی قائم بخش متحرک به ۵ سانتی‌متر محدود شده است.

۴-۲- خاک مورد استفاده

از ماسه استاندارد فیروزکوه ۱۶۱ در تحقیق حاضر استفاده شده است. این خاک از جنبه دانه‌بندی و خصوصیات مقاومتی شباهت بسیار زیادی با ماسه‌های معروفی همچون ماسه تویورای ژاپن و نوادای آمریکا دارد به‌طوری‌که D_{50} این خاک‌ها حدود ۰/۳ است. مشخصات ماسه خشک ۱۶۱ فیروزکوه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات ژئومکانیکی ماسه خشک ۱۶۱ فیروزکوه.

G_s	e_{max}	e_{min}	D_{50} (mm)	درصد ریزدانه (٪)	φ (درجه)	C (kPa)
۲/۶۵	۰/۹۴۳	۰/۵۴۸	۰/۲۷	کمتر از ۱	۳۷	صفر

درصد تراکم خاک مورد بررسی در مدل برابر ۵۰٪ انتخاب شد. برای ساخت مدل در نمونه‌های خشک از روش بارش ماسه و در نمونه‌های مرطوب از روش کوبش مرطوب استفاده شد. مدل ساخته شده به روش کوبش مرطوب با تقریب بسیار بالایی، کاملاً همگن است. در روش تراکم مرطوب، خاک که با درصد معین و به نحو مناسب و همگنی توسط همزن‌های آزمایشگاهی مخلوط، در لایه‌های ۲/۵ سانتی‌متری ریخته و توسط کوبه‌ای مخصوص به‌صورت همگن متراکم می‌شود. تعداد کوبش هر لایه در آزمایش‌های اولیه به‌نحوی تعیین گردیدند که با در نظر گرفتن اثر انرژی کوبشی لایه‌های بالایی بر تراکم لایه پایینی، در نهایت ضخامت لایه‌های کوبیده شده پس از اتمام عملیات کوبش همان ۲/۵ سانتی‌متر بوده باشد. به این دلیل ساخت مدلی کاملاً همگن توسط این روش عملی است.

۴-۳- برنامه مدل‌سازی‌های فیزیکی گسلش

چهار آزمایش گسلش معکوس با زاویه ۴۵ درجه و ارتفاع خاک ۲۵ سانتی‌متر برنامه‌ریزی شد. پارامتر متغیر در این آزمایش‌ها میزان درصد رطوبت خاک بوده است لذا خاک خشک (درصد رطوبت صفر) و خاک‌های با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد رطوبت مورد آزمایش قرار گرفتند. امکان ساخت مدل برای خاک‌های با بیش از ۱۵ درصد رطوبت به دلیل عدم اطمینان از همگن بودن مدل ساخته شده در روش تراکم مرطوب و همچنین آب‌بند نبودن مخزن مورد استفاده، فراهم نبوده است. بااین حال علیرغم عدم ساخت مدل فیزیکی با درصد رطوبت بالاتر و خصوصاً اشباع، جهت بررسی کامل اثر آب بر رفتار خاک، در آزمایش‌های برش مستقیم، خاک ماسه‌ای اشباع نیز مورد آزمایش قرار گرفته است.

۵- آزمایش‌های برش مستقیم

از آنجایی که ماهیت پدیده گسلش، وقوع برش در خاک است، استفاده از آزمایش های برش مستقیم برای شناسایی رفتار خاک می‌تواند نزدیک‌ترین حالت به واقعیت باشد. بااین‌حال معایب و اشکالات آزمایش‌های برش مستقیم در تحلیل نتایج از ذهن دور نمانده است. نمونه ساخته شده در دستگاه برش مستقیم مورد استفاده، دایروی با قطر ۶۰ میلی‌متر بوده که ضخامتی برابر با ۲۰ میلی متر دارد. آزمایش به‌صورت کنترل کرنش انجام شده و سرعت جابه‌جایی اعمالی به نمونه برابر با ۱ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. همچنین جابه‌جایی اعمالی جهت شناسایی رفتار پس از پیک و پسماند خاک تا حداقل جابه‌جایی نرمال شده برابر با ۱۰٪ وارد گردید. آزمایش‌های برش مستقیم بر روی خاک ماسه‌ای خشک، مرطوب (با درصد رطوبت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) و اشباع (با درصد رطوبت حدود ۲۴ درصد) انجام پذیرفت. نحوه مدل‌سازی هر یک از این حالت‌ها متفاوت بوده که به صورت مفصل در مقالات دیگری شرح داده شده است [۲۵-۲۶]. درصد تراکم خاک‌های مورد آزمایش نیز مطابق با آزمایش‌های گسلش، ۵۰٪ در نظر گرفته شد.

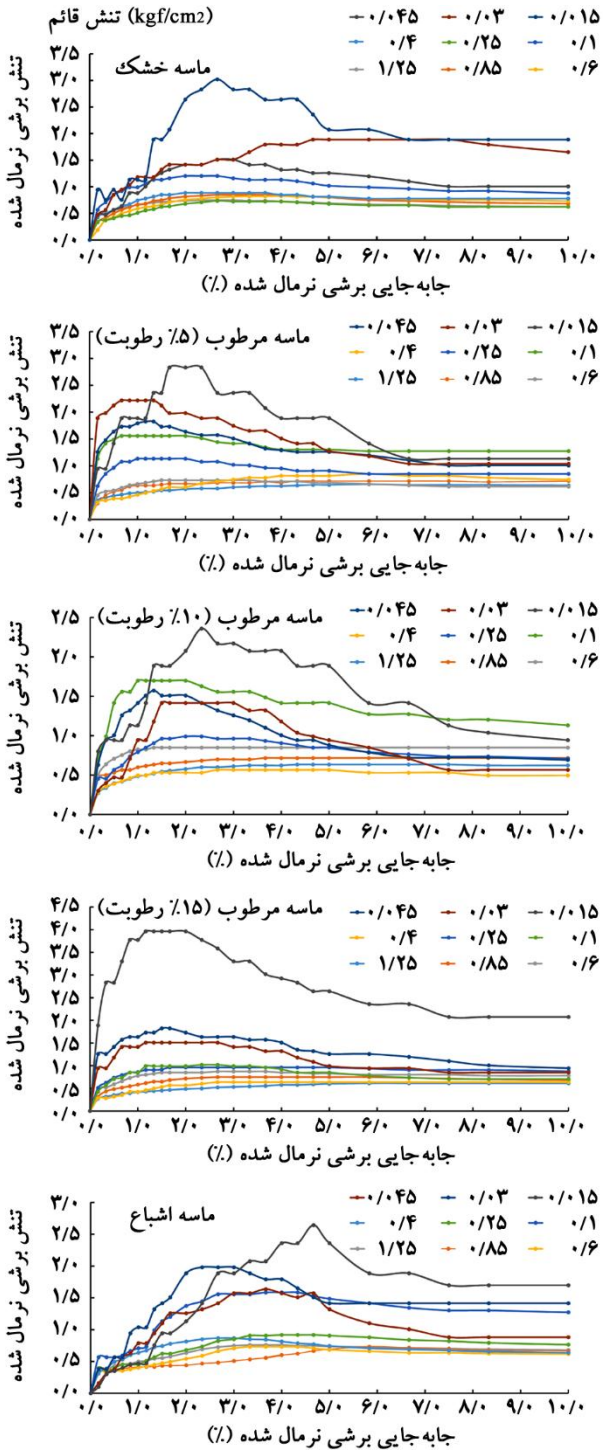
با توجه به اینکه هدف از انجام آزمایش، شناسایی رفتار خاک در سربارهای کم مطابق با تنش های موجود در اعماق مختلف آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی گسلش و استفاده از آن برای کالیبره کردن مدل عددی و همچنین مقایسه رفتار آن با رفتار خاک تحت سربارهای زیاد بوده است، خاک‌ها در دو سری تنش قائم تحت آزمایش قرار گرفتند: ۱) تنش‌های قائم کم شامل سه سربار ۰/۰۱۵، ۰/۰۳ و ۰/۰۴۵ kgf/cm^2 (معادل با تنش های ۱/۵، ۳ و ۴/۵ کیلو پاسکال)، و ۲) تنش های قائم زیاد شامل شش سربار ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸۵ و ۱/۲۵ kgf/cm^2. تنش‌های قائم کم تقریباً برابر تنش قائم در اعماق یک سوم، دو سوم و کف لایه خاکی آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی گسلش بوده است.

۶- بررسی و تفسیر نتایج

۶-۱- آزمایش‌های برش مستقیم

۶-۱-۱- منحنی‌های نرمال شده تنش- جابه‌جایی برشی

شکل (۵) منحنی‌های نرمال شده تنش- جابه‌جایی برشی را



شکل (۵): منحنی های نرمال شده تنش-جابه‌جایی برشی برای خاک‌های ماسه‌ای با درصد رطوبت‌های مختلف تحت سربارهای مختلف.

برای خاک‌های ماسه‌ای با درصد رطوبت‌های مختلف (از ماسه خشک تا ماسه اشباع) تحت سربارهای مختلف نشان می‌دهد. در این نمودارها، تنش برشی به تنش عمودی در آن آزمایش، نرمال شده است. همچنین منظور از جابه‌جایی برشی نرمال شده، جابه‌جایی برشی تقسیم بر قطر نمونه در آزمایش برش مستقیم (یعنی ۶۰ میلی‌متر) است که به‌گونه‌ای می‌تواند با کرنش برشی ایجاد شده در خاک رابطه مستقیمی داشته باشد.

چند نکته از این نمودارها قابل حصول است. در سربارهای کم و در تمامی خاک‌ها رفتار نرم‌شوندگی به وضوح قابل مشاهده است. این در حالی است که با افزایش سربار از میزان نرم‌شوندگی خاک کاسته شده و خاک‌ها در یک رطوبت به‌خصوص، رفتاری مشابه یکدیگر دارند. به‌عبارت‌دیگر رفتار خاک در سربارهای زیاد تقریباً یکسان بوده، اما در سربارهای کم رفتار کاملاً متفاوتی از آنها دیده می‌شود. همچنین نرم‌شوندگی در سربارهای زیاد در خاک‌های اشباع و خشک بیشتر دیده می‌شوند تا خاک‌های مرطوب. نکته دیگر اینکه مرز تغییر رفتار خاک در اغلب خاک‌ها و با درصدهای رطوبت مختلف، حدود تنش‌های قائم ۰/۱ تا ۰/۲۵ kgf/cm^2 است. به عبارت بهتر، همان طور که اشاره شد، خاک تحت تنش‌های قائم بیشتر از این مقادیر، رفتاری یکسان از خود نشان داده و می‌توان رفتار آنها را با یک منحنی میانگین تخمین زد.

در تنش‌های کم، کرنش گسیختگی خاک‌های مرطوب به‌مراتب کمتر از خاک‌های خشک یا اشباع است. در واقع تحت سربارهای کم، خاک مرطوب رفتاری تُردتر از خود نشان می‌دهد. این مسئله به‌طور ویژه در بخش ۶-۱-۳ مورد بحث قرار گرفته است.

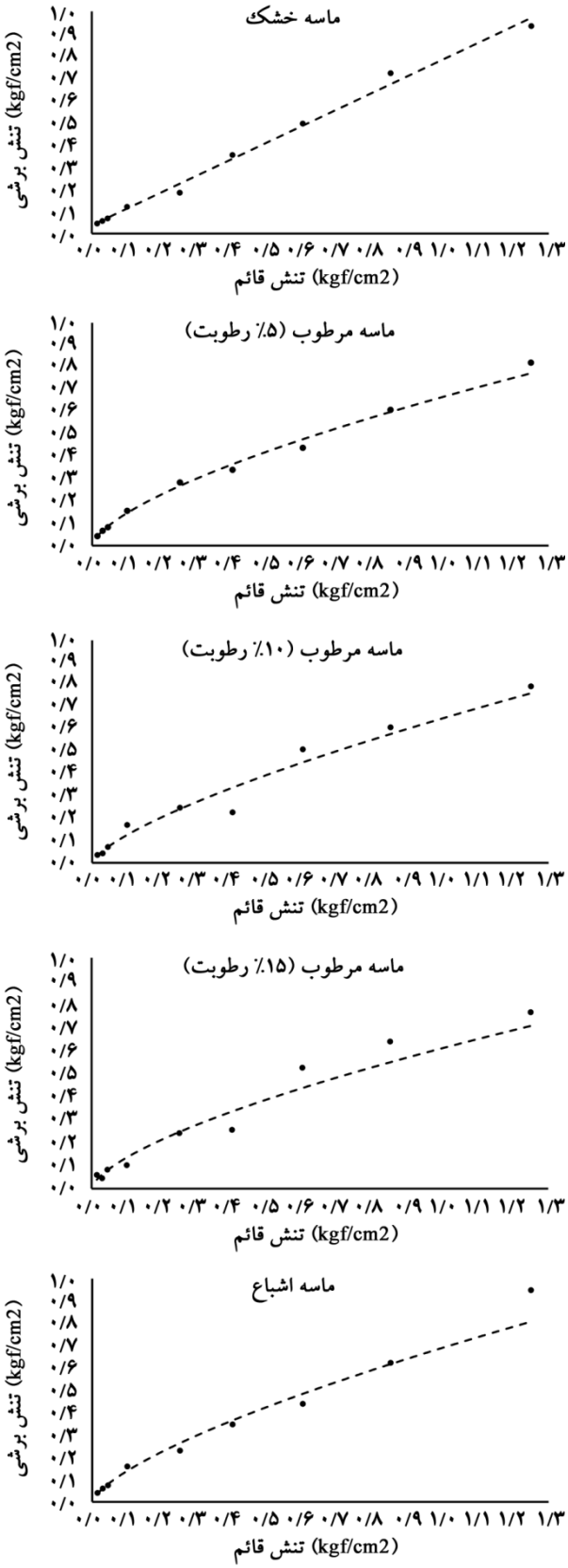
۶-۱-۲- پارامترهای مقاومت برشی خاک

در صورتی که از دیدگاه مقاومتی اثر رطوبت بر رفتار خاک دانه‌ای مورد مطالعه قرار گیرد، می‌توان از پارامترهایی همچون زاویه اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی (c) بهره جست. در این بخش تغییر این دو پارامتر تحت تنش‌ها و درصد رطوبت‌های مختلف تحت تنش حداکثر و سپس پسماند مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶-۱-۲-۱- پارامترهای مقاومت برشی خاک بر اساس تنش برشی حداکثر (پیک)

شکل (۶) رابطه بین تنش قائم به تنش برشی حداکثر برای خاک‌ها با درصد رطوبت مختلف و یا به عبارت بهتر پوش گسیختگی را نشان می‌دهد. به غیر از حالت ماسه خشک، رفتار خاک در تنش های کم و زیاد متفاوت بوده و پوش گسیختگی الزاماً خطی نیست. می‌توان مرزی را بین تنش قائم ۰/۱ تا ۰/۲۵ kgf/cm^2 یافت که پوش گسیختگی از حالت خطی به حالت منحنی تغییر پیدا می‌کند. در دیگر تحقیقات انجام‌شده نیز چنین مرزی مشاهده و تعریف شده است. به‌عنوان نمونه فوکوشیما و تاتسوکا [۲۷] دریافتند که این مرز تغییر رفتار، در حوالی تنش قائم حدود ۰/۱ kgf/cm^2 رخ می‌دهد که انطباق مناسبی با نتایج حاصل از این تحقیق دارد. این تغییر رفتار بدین‌معنی است که دیگر پارامترهای مقاومتی خاک همچون φ و c در تمامی بازه‌های تنشی ثابت نیستند. البته این تغییر رفتار تنها در سطوح تنش قائم اندک که معادل ارتفاع بسیار کمی از یک لایه خاکی (مثلاً زیر ۱ متر) است، مشاهده می‌شود و همین مسئله ممکن است کاربرد آن را در پروژه‌های عمرانی محدود نماید. با این‌حال از آنجایی که این مسئله می‌تواند در مدل‌سازی فیزیکی آزمایشگاهی که عمق لایه مورد نظر به‌ندرت به بیش از یک متر می‌رسد، فوق‌العاده دارای اهمیت خواهد بود. در صورتی که زاویه اصطکاک داخلی، شیب هر نقطه از منحنی فوق و چسبندگی، عرض از مبدأ خط مماس بر هر نقطه از منحنی تعریف شود، آنگاه می‌توان این‌گونه بیان داشت که زاویه اصطکاک داخلی در تنش‌های پایین نسبت به سربارهای زیاد افزایش‌یافته و میزان چسبندگی کاهش پیدا می‌کند.

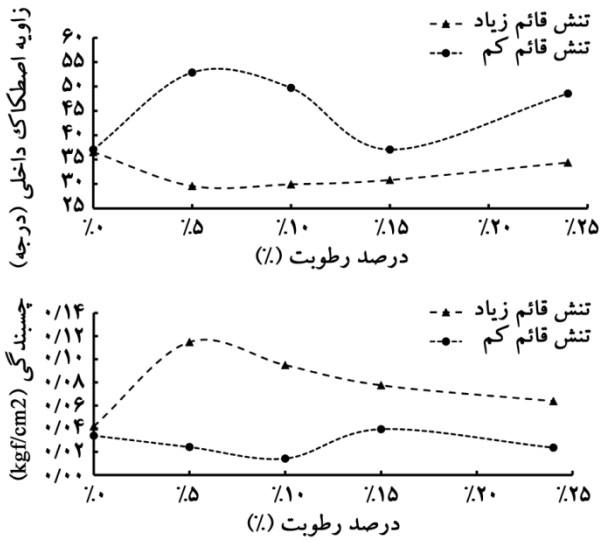
پارامترهای مقاومتی خاک را می‌توان به دو حوزه تنش قائم زیاد و تنش قائم کم طبقه بندی نموده و با فرض خطی بودن پوش گسیختگی در هر یک از این حوزه‌ها، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی متناظر هر یک از این تنش‌ها را محاسبه



شکل (۶): پوش گسیختگی خاک های ماسه‌ای با درصد رطوبت‌های مختلف (ماسه خشک، مرطوب ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ و اشباع).

کرد. بدیهی است که این فرض در حوزه تنش قائم زیاد کاملاً منطبق بر واقعیت بوده اما در حوزه تنش قائم کم از انحنای پوش گسیختگی در بازه تغییر تنش ها صرف‌نظر شده است. در تحقیق حاضر مرز بین تنش‌های قائم کم و زیاد حدود ۰/۱ kgf/cm^2 انتخاب گردید، لذا برای محاسبه φ و c در هر یک از این حوزه‌ها، از تنش‌های قائم بین ۰/۱ تا ۱/۲۵ kgf/cm^2 برای محاسبه پارامترهای مقاومتی تنش قائم زیاد و از تنش‌های قائم بین ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۴۵ kgf/cm^2 برای محاسبه پارامترهای مقاومتی تنش قائم کم استفاده شده است.

شکل (۷) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را برای دو حالت حوزه تنش قائم زیاد و کم نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که زاویه اصطکاک داخلی در تنش‌های اندک به مراتب بیشتر از تنش‌های زیاد است. البته این مسئله در زمینه خاک‌های خشک صادق نیست. نکته دیگر اینکه وجود رطوبت در خاک‌های ماسه‌ای باعث ایجاد چسبندگی ظاهری در خاک می‌شود که این چسبندگی ظاهری خود را در تنش‌های بالا به‌صورت ایجاد چسبندگی c و تحت تنش های قائم کم به صورت افزایش زاویه اصطکاک داخلی نشان می‌دهد.



شکل (۷): تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی تحت تنش های قائم زیاد و کم در حالت تنش برشی حداکثر (پیک).

روند کلی تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در تنش کم این‌گونه است که زاویه اصطکاک داخلی ابتدا با افزایش رطوبت تا حد معینی (که در این تحقیق حوالی ۵٪ است) افزایش یافته و سپس با بیشتر شدن رطوبت کاهش می یابد. این افزایش زاویه اصطکاک داخلی به‌اندازه‌ای است که زاویه اصطکاک داخلی برای خاک مرطوب با درصد رطوبت ۵٪، حدود ۵۳ درجه محاسبه شد. عکس این روند برای تغییرات زاویه اصطکاک داخلی تحت تنش‌های بالا مشاهده می‌شود.

پارامتر چسبندگی با تغییر رفتار خاک روند دیگری را از خود نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست آمده از میزان چسبندگی در تنش‌های کم بسیار ناچیز است (۲ تا ۴ کیلو پاسکال) به گونه‌ای که می توان از این مقدار چسبندگی به دلیل خطاهای احتمالی آزمایش صرف‌نظر نمود. این مسئله ازآنجا دارای اهمیت است که برای خاک خشک نیز چسبندگی حدود ۳ کیلو پاسکال محاسبه شده است که در واقع چسبندگی چنین خاکی باید نزدیک صفر باشد؛ اما چسبندگی مشاهده شده در تنش‌های زیاد قابل توجه است و نشان از وجود و تأثیر چسبندگی ظاهری در خاک‌های مرطوب دارد. در تنش‌های زیاد، خاک با رطوبت ۵٪ از خود چسبندگی حدود ۱۱ کیلو پاسکال نشان می‌دهد. روند تغییرات نیز به‌گونه‌ای است که چسبندگی محاسبه شده برای خاک مرطوب با افزایش رطوبت ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می کند و نقطه حداکثر این افزایش نیز حوالی درصد رطوبت ۵٪ است.

با فرض ناچیز بودن چسبندگی در حالت تنش های قائم کم، مقاومت برشی خاک تحت تنش‌های قائم کم ناشی از مقاومت اصطکاکی آن خواهد بود. لذا با توجه به تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک با تغییر درصد رطوبت می توان این گونه نتیجه‌گیری نمود که تحت سربارهای کم، مقاومت برشی ماسه مرطوب ابتدا تا درصد رطوبت معینی (حدود ۵٪ رطوبت) افزایش پیدا کرده و پس از آن کاهش پیدا می‌کند. به بیان بهتر خاک مرطوب تحت تنش‌های قائم کم، مقاومت برشی بیشتری نسبت به خاک خشک داشته و حداکثر مقاومت برشی آن نیز در درصد رطوبت حدود ۵٪ به وجود می‌آید. این نتیجه علاوه بر مطابقت با شواهد بصری، تطابق نسبتاً خوبی با دیگر تحقیقاتی که بر روی خاک ماسه‌ای مرطوب انجام‌شده [۳] دارد.

در تحقیق حاضر، خاک با ۵ درصد رطوبت دارای درجه اشباع حدود ۱۷٪ است که می‌توان رفتار آن را در رژیم Pendular تعریف نمود. در این رژیم با افزایش درجه اشباع تا حدود ۲۰٪، مقاومت برشی افزایش پیدا می‌کند. درصد رطوبت‌های ۱۰٪ و ۱۵٪ به‌ترتیب دارای درجه اشباع ۳۵٪ و ۵۲٪ هستند که می‌توان رفتار آنها را در رژیم Funicular طبقه‌بندی نمود. همان‌طور که در بخش ۲ ذکر شد، در این رژیم مقاومت برشی ماسه کاهش یافته و یا ثابت می‌ماند. سپس در مرز بین حالت Pendular و Capillary مجدد مقاومت برشی ماسه مرطوب با درجه اشباع حدود ۹۰٪ افزایش پیدا می کند. خاک اشباع مورد آزمایش در تحقیق حاضر درجه اشباعی نزدیک به ۹۰ درصد دارد. لذا رفتار مشاهده شده می‌تواند کاملاً منطبق بر واقعیت و نتایج سایر تحقیقات باشد.

نکته جالب اینکه زاویه اصطکاک داخلی در خاک مرطوب با رطوبت ۵٪ (درجه اشباع حدود ۵۰٪) نسبت به حالت‌های مرطوب دیگر کاهش داشته است. در شکل (۳) نیز حدود درجه اشباع ۵۰٪، کاهش مقاومت برشی گزارش شده است. تشابه بسیار مناسبی بین نتایج حاصل از تحقیق حاضر با تحقیقات دیگران مشاهده می‌شود.

تفاوت بین رفتار خاک تحت تنش‌های کم و زیاد را شاید بتوان به دلیل عملکردهای مختلف آب بین دانه‌ای دانست. آب بین دانه‌ای علاوه بر اینکه می تواند چسبندگی ظاهری ایجاد نماید، می تواند اثر روان‌کاری بین ذرات خاک را نیز داشته باشد. بر اساس نتایج حاصله از آزمایش‌ها، شاید این‌گونه بتوان بیان داشت که در تنش‌های پایین به دلیل کم بودن تنش قائم و در نتیجه تنش محصورکننده، قفل‌شدگی بین دانه‌های خاک اندک بوده و وجود آب بین‌دانه‌ای و پیوند دانه‌ها به یکدیگر باعث افزایش قفل‌شدگی

بین ذرات دانه‌ها شود. این افزایش قفل‌شدگی بین‌دانه‌ای، خود را در افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک نشان می‌دهد. به این دلیل وجود آب بین‌دانه‌ای باعث افزایش مقاومت برشی خاک از طریق افزایش قفل‌شدگی بین‌دانه‌ای و در نتیجه افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. این در حالی است که آب بین دانه‌ای در تنش‌های قائم زیاد عملکرد دیگری را از خود نشان می‌دهد. در این حالت ازآنجایی که تنش محصورکننده نسبتاً بالاست، وجود آب بین‌دانه‌ای، قفل‌شدگی بین ذرات خاک را نه‌تنها افزایش نداده بلکه کاهش می‌دهد، چراکه به دلیل تنش همه‌جانبه، ذرات با یکدیگر به‌شدت در تماس هستند. در این حالت به نظر می‌رسد، آب بین‌دانه‌ای اثر روان‌کاری را داشته و باعث می‌شود قفل‌شدگی شدید بین دانه‌ها به دلیل تنش همه‌جانبه نسبتاً زیاد، کاهش یافته و در نتیجه زاویه اصطکاک داخلی به‌دست‌آمده کم شود. در عین‌حال به علت وجود ذرات آب، چسبندگی ناشی از موئینگی در خاک همچنان وجود دارد.

برای بررسی تأثیر رطوبت بر رفتار خاک، نمایی با بزرگنمایی مناسب از دانه های خاک در حالت خشک، مرطوب (با درصد رطوبت های مختلف) و اشباع تهیه شد که در شکل (۸) نشان داده شده است. این تصاویر با بزرگنمایی ۲۵۰ برابر و با استفاده از یک ابزار بزرگنمایی ساده که به دوربین تلفن همراه متصل می‌شود، گرفته شده است.

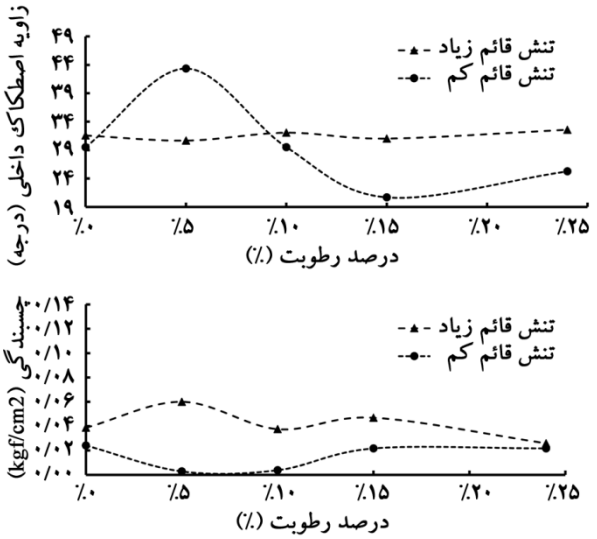
همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، ذرات ماسه خشک بدون هیچ گونه پیوندی در کنار یکدیگر قرار گرفته و با افزایش فشار همه جانبه، این قفل شدگی بین دانه ها افزایش یافته و باعث ایجاد مقاومت برشی در خاک می شود. با اضافه نمودن ۵٪ رطوبت به خاک، آب میان دانه ای تقریباً تمامی سطح ذرات را تَر کرده و در محل برخورد ذرات خاک با یکدیگر، پل های آب به وجود می آید. مشاهده می شود که وجود پل های آب باعث ایجاد قفل شدگی مصنوعی بین ذرات خاک شده و کلونی‌هایی متشکل از ذرات خاک تشکیل می‌دهد. این مسئله باعث افزایش مقاومت برشی از طریق ایجاد قفل‌شدگی (تحت تنش‌های قائم کم) بین ذرات خاک می‌شود.

شکل (۸): تصویر بزرگنمایی شده از دانه‌های خاک ماسه‌ای در حالت خشک، مرطوب (با درصد رطوبت ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪) و اشباع و مشاهده اثر رطوبت بر تغییر ساختار خاک.

خاک ماسه‌ای با ۱۰ درصد رطوبت تقریباً ظاهری شبیه به خاک ماسه‌ای مرطوب با ۵ درصد رطوبت دارد با این تفاوت که اندکی آب آزاد بین ذرات در آن مشاهده می‌شود. این آب آزاد به‌وضوح در خاک ماسه‌ای مرطوب با ۱۵٪ رطوبت مشاهده می‌گردد. وجود آب‌های آزاد باعث می‌شود برخی از حفرات از آب اشباع شده و پل‌های مایع که عامل ایجاد قفل‌شدگی و چسبندگی ظاهری هستند از بین بروند. در نهایت در حالت اشباع ذرات به‌صورت غوطه‌ور در آب قرار داشته و با یکدیگر در تماس هستند. این تصاویر به فهم بهتر روند توصیف شده در بالا و دلیل وقوع تنش برشی حداکثر در رطوبت ۵٪ تحت تنش‌های کم کمک می‌کند.

۶-۱-۲-۲- پارامترهای مقاومت برشی خاک در شرایط پسماند (پس از پیک)

با توجه به اینکه در پدیده گسلش، کرنش‌های بسیار بالا (که مقدار آن می‌تواند حتی به چند صد درصد هم برسد) رخ می‌دهد، شناخت رفتار پسماند خاک و یا به عبارتی شناخت رفتار پس از تنش گسیختگی (تنش پیک) دارای اهمیت خواهد بود. لذا پارامترهای مقاومت برشی خاک در شرایط پسماند در جابه‌جایی برشی نرمال شده ۱۰٪ محاسبه شدند که مقادیر پارامترهای مقاومت برشی (φ و c) و تغییر آن با درصد رطوبت تحت دو شرایط تنش قائم زیاد و کم در شکل (۹) نشان داده شده است. اهمیت محاسبه و به دست آوردن خصوصیات خاک در شرایط پسماند این است که در تحلیل های عددی، می توان شرایط پس از تنش برشی حداکثر (پیک) را به‌خوبی مدل نمود. این مسئله خصوصاً در تحلیل‌هایی که بر روی خاک‌های با رفتار نرم‌شوندگی پس از تنش گسیختگی انجام می‌شود، دارای اهمیت است. در پدیده گسلش سطحی، به دلیل اینکه خاک در ناحیه ایجاد باند برشی، کرنش‌های برشی بسیار بالایی را متحمل می‌شود، استفاده از مدل‌های رفتاری که بتواند نرم‌شوندگی را مدل نماید، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این زمینه کارهایی نیز انجام شده است. به‌عنوان‌مثال آناستوپلوس در برخی از تحلیل‌های عددی بر روی پدیده گسلش سطحی، از مدل رفتاری ساده شده‌ای (مدل رفتاری الاستیک- پلاستیک کامل) استفاده نمود که زاویه اصطکاک داخلی پیک و پسماند یکی از پارامترها ورودی آن بوده است [۵]. هدف وی برای استفاده از چنین مدل رفتاری ساده شده‌ای، در نظر گرفتن اثر نرم‌شوندگی و ایجاد باندهای برشی دقیق‌تر در مدل بوده است. این مسئله خود اهمیت بررسی رفتار پس از تنش برشی حداکثر را در پدیده گسلش سطحی نشان می‌دهد.



شکل (۹): تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی تحت تنش‌های قائم زیاد و کم بر اساس تنش برشی پسماند.

زاویه اصطکاک داخلی پسماند خاک در تنش‌های زیاد، برای تمامی درصدهای رطوبتی بین ۳۱ تا ۳۳ درجه محاسبه شده است و این بدان‌معناست که زاویه اصطکاک داخلی پسماند در تنش‌های بالا مستقل از درصد رطوبت خاک است. اهمیت این مسئله در این است که در تنش‌های زیاد و تحت تنش‌های برشی بالا (پس از تنش گسیختگی)، رفتار خاک تنها توسط جسم جامد خاک تعیین شده و رطوبت بین‌دانه‌ای اثری بر آن ندارد. درعین‌حال چسبندگی پسماند در تنش‌های بالا، می‌تواند تحت تأثیر رطوبت خاک باشد. به‌طوری‌که در درصد رطوبت حدود ۵٪، خاک بیشترین چسبندگی پسماند را از خود نشان می‌دهد.

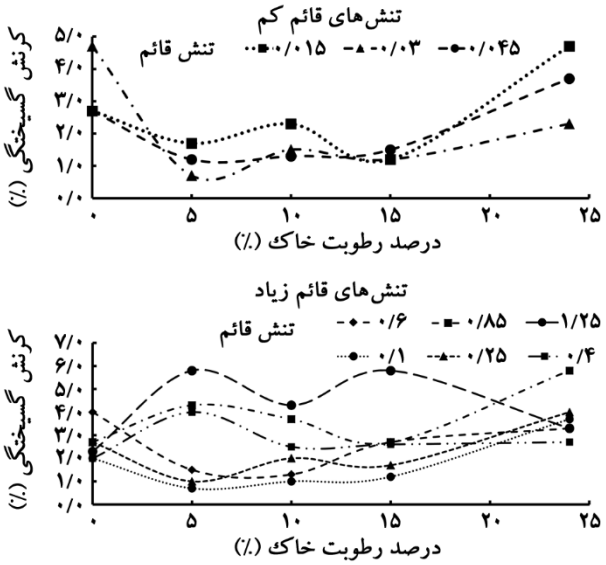
این گونه می توان نتیجه گرفت که در تنش‌های زیاد، با فرض ثابت ماندن زاویه اصطکاک داخلی پسماند خاک با تغییر درصد رطوبت آن، مقاومت برشی خاک از حالت خشک تا درصد رطوبت ۵٪ افزایش داشته و پس از آن کاهش پیدا می کند. لذا در تنش‌های بالا، رفتار خاک در حالت پسماند می‌تواند تابعی از درصد رطوبت خاک باشد که باید در تحلیل‌های عددی لحاظ شود.

اما در تنش‌های کم، مسئله به‌طورکلی متفاوت است. چسبندگی پسماند خاک بین صفر تا ۲ کیلو پاسکال تغییر می کند که با توجه به اندک بودن مقادیر چسبندگی، می توان از آن صرف‌نظر نمود. به عبارت بهتر، چسبندگی پسماند خاک به علت وجود رطوبت در تنش‌های کم وجود نخواهد داشت؛ اما رطوبت میان‌دانه‌ای اثر خود را بر زاویه اصطکاک داخلی می گذارد؛ به‌طوری که زاویه اصطکاک داخلی پسماند خاک ابتدا تا درصد رطوبت حدود ۵٪ افزایش داشته و سپس کاهش می یابد. نتیجه چنین تغییراتی در زاویه اصطکاک داخلی پسماند و چسبندگی پسماند، افزایش مقاومت برشی پسماند خاک تا درصد رطوبتی حدود ۵٪ و سپس کاهش آن است.

مهم ترین کاربرد ارزیابی تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک در حالت تنش برشی حداکثر و پسماند، در نظر گرفتن اثر رطوبت در تحلیل‌های عددی است. کاربرد این مسئله باید در تحقیقی جداگانه مورد ارزیابی و بررسی قرار گیرد.

۶-۱-۳- کرنش گسیختگی خاک

جهت بررسی اثر آب میان‌دانه‌ای بر رفتار تغییر شکلی ماسه مرطوب، کرنش گسیختگی برای ماسه مرطوب با رطوبت‌های مختلف و تحت تنش‌های کم و زیاد محاسبه شد. کرنش گسیختگی، کرنش متناظر با تنش حداکثر انتخاب گردید که پس‌ازآن تنش داخل خاک کاهش می‌یابد. باید اشاره شود که در اینجا استفاده از عبارت کرنش گسیختگی، در واقع جابه‌جایی نرمال شده به قطر نمونه در آزمایش برش مستقیم است و عبارت کرنش گسیختگی واقعی، مورد نظر نیست. شکل (۱۰) تغییرات کرنش گسیختگی را برای دو حالت تنش‌های کم و زیاد و با تغییر درصد رطوبت نشان می‌دهد. دلیل چنین تفکیکی استفاده از کرنش گسیختگی در حالت تنش‌های کم برای تفسیر نتایج حاصل از تغییر پارامتر D_0/h در آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تحت تنش‌های قائم کم، بیشترین کرنش گسیختگی در حالت خشک و اشباع رخ می‌دهد. برای خاک مرطوب این مقدار بسیار کمتر بوده به‌طوری‌که به‌صورت تقریبی کرنش گسیختگی خاک در رطوبت ۵٪، کمترین مقدار را داراست. به بیان بهتر، با افزایش درصد رطوبت کرنش گسیختگی ابتدا کاهش (از حالت خشک به حالت مرطوب) و سپس افزایش (از حالت مرطوب به حالت اشباع) می‌یابد. همان‌طور که در بخش بعدی بحث شده است، این تغییرات کاملاً با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های فیزیکی همخوانی دارد.



شکل (۱۰): تغییرات کرنش گسیختگی ماسه در دو حالت تنش‌های قائم کم و زیاد با تغییر درصد رطوبت.

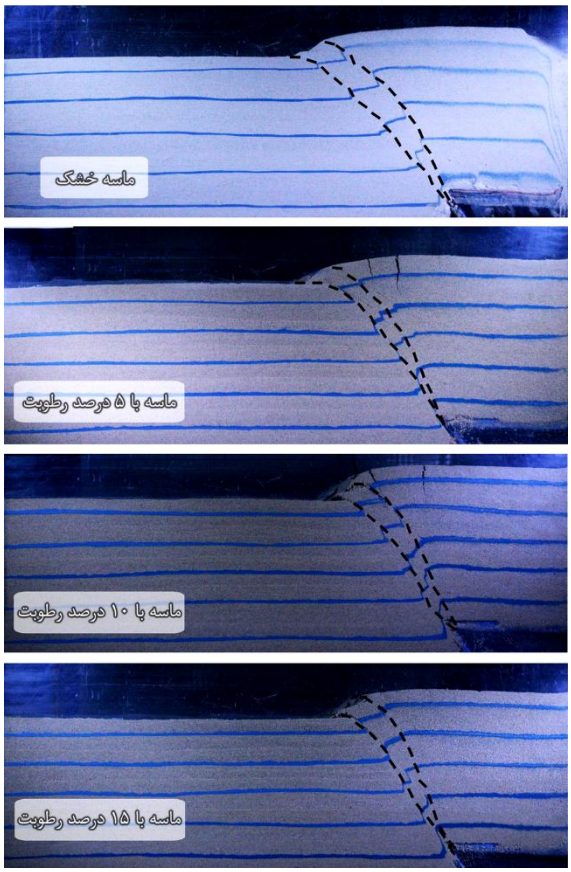
رفتار تغییر شکلی خاک اما در تنش‌های بالا تغییر پیدا می‌کند. با افزایش تنش قائم، از حدود تنش قائم ۰/۴ kgf/cm^2، اثر رطوبت بر رفتار خاک تغییر پیدا کرده و معکوس می‌شود. به‌بیان‌دیگر با اضافه نمودن رطوبت، کرنش گسیختگی خاک‌های مرطوب افزایش پیدا می‌کند. در واقع با اضافه شدن

رطوبت به خاک تحت تنش‌های زیاد، خاک رفتاری نرم‌تر از خود نشان می‌دهد. این مسئله شاید با ماهیت عملکردی رطوبت تحت تنش‌های مختلف ارتباط داشته باشد بدین‌گونه که وجود آب میان دانه‌ای در تنش‌های قائم بالا، باعث بروز رفتاری شبه ویسکوز در نمونه خاکی می‌شود، این در حالی است که تحت تنش‌های کم، همین رطوبت رفتاری سیمانته به خاک می‌دهد.

۶-۲- آزمایش‌های مدل‌سازی فیزیکی گسلش

از جنبه های مختلفی می توان اثر رطوبت (و به تعبیر بهتر چسبندگی ظاهری) را بر روند توسعه گسلش شیب لغز مورد بررسی قرار داد. در این مقاله تنها به بخشی از این جنبه‌ها که در ارتباط با شناسایی رفتار خاک‌های مرطوب است، پرداخته خواهد شد.

شکل (۱۱) نمایی از گسلش اعمالی به مدل های فیزیکی با درصد رطوبت‌های مختلف را در انتهای آزمایش نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): باند برشی ایجاد شده در اثر گسلش و تأثیر درصد رطوبت خاک بر آن.

در این شکل باندهای برشی ایجاد شده پس از اعمال گسلش معکوس با زاویه ۴۵ درجه و میزان جابه‌جایی قائم ۵ سانتی‌متر در مدل، نشان داده شده است. تفاوت رفتار خاک در حالت خشک و مرطوب به‌خوبی در این تصویر نمایان است.

عرض باند برشی ایجاد شده در خاک خشک به مراتب بیشتر از مدل های مرطوب است. این بدان معناست که با افزودن رطوبت به خاک (و به بیان بهتر ایجاد چسبندگی ظاهری در آن) باند برشی ایجاد شده متمرکزتر گشته و لذا جابه‌جایی اختلافی دو بخش گسل در ناحیه کوچک‌تری از سطح زمین به وقوع می‌پیوندد. این مسئله کاملاً با آنچه در واقعیت به وقوع می پیوندد، که نمونه‌ای از آن در شکل (۴) نشان داده شده است، تطابق دارد. همچنین به نظر می‌رسد عرض باند برشی ایجاد شده در نمونه با میزان درصد رطوبت آن نیز ارتباط دارد. به‌طوری‌که مشاهده می‌شود، کمترین عرض باند برشی متعلق به نمونه‌ای است که درصد رطوبت آن ۵٪ است و با افزایش درصد رطوبت عرض ناحیه برش اندکی افزایش می‌یابد. بااین حال در همه حالات عرض باند برشی ایجاد شده در خاک مرطوب کمتر از خاک خشک است.

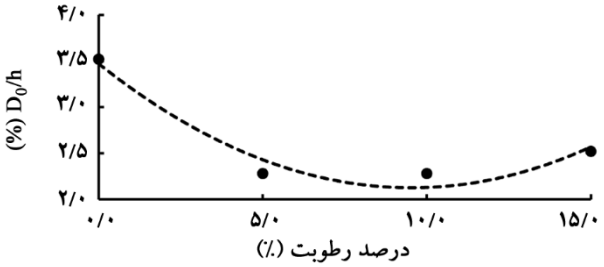
باید توجه شود که تحقیقات کمی بر روی اثر رطوبت در خاک‌های دانه‌ای و تأثیر آن بر پدیده گسلش برنامه‌ریزی و اجرا شده است. یکی از معدود تحقیقات در این حوزه توسط یوهانسون و کوناگای [۸] انجام شده است. در این تحقیق خاک ماسه‌ای خشک و اشباع تحت گسلش معکوس با زاویه ۹۰ درجه قرار گرفتند. نکته مهم این است که نتایج حاصل از این تحقیق قابلیت مقایسه با نتایج حاصل از تحقیق حاضر را ندارد، زیرا در آن خاک خشک و تقریباً اشباع (با درجه اشباع حدود ۸۰٪) با یکدیگر مقایسه شدند، این در حالی است که درجه اشباع خاک مرطوب با ۱۵٪ رطوبت در بهترین حالت زیر ۵۰٪ تخمین زده می‌شود. آنها در تحقیق خود نشان دادند که عرض ناحیه برشی، در خاک خشک به مراتب کمتر از نمونه اشباع است. با استناد به نتیجه این تحقیق می‌توان این گونه نتیجه‌گیری نمود که باند برشی

گسل در شرایط خاک غیر اشباع (خاک مرطوبی که درجه اشباع آن نزدیک حالت اشباع کامل نباشد) نسبت به حالت خشک و اشباع کمترین عرض را داراست و این بدان‌معنی است که موضعی شدن کرنش در خاک مرطوب نسبت به حالت خشک و اشباع بیشتر است. این مسئله می‌تواند برای سازه‌های روزمینی بسیار مخرّب باشد، زیرا هر چقدر گسلش سطحی در عرض بیشتری از سطح زمین توزیع گردد، خسارات احتمالی وارد به سازه می‌تواند کمتر باشد.

دلیل تفاوت نتایج تحقیق حاضر با نتایج یوهانسون و کوناگای [۸] را می‌توان به موارد زیر مرتبط دانست: ۱) تفاوت رژیم های رطوبتی (مرطوب در برابر اشباع) که می تواند منجر به ایجاد رفتارهای کاملاً متفاوت در خاک شود. ۲) گسلش اعمالی (۴۵ درجه در تحقیق حاضر در برابر ۹۰ درجه)، و ۳) وقوع رخداد اضافه فشار آب حفره‌ای در تحقیق یوهانسون و کوناگای [۸]. در تحقیق حاضر با توجه به درصد رطوبت (غیر اشباع) و نوع خاک و سرعت اعمال گسلش به خاک، امکان ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای وجود ندارد.

یکی از پارامترهای مهمی که در بررسی پدیده گسلش سطحی مورد اشاره قرار می‌گیرد، مقدار گسلش مورد نیاز در بستر (D_0) جهت رسیدن گسلش به سطح زمین است. عموماً این میزان به مقدار ارتفاع لایه خاکی (h) نرمال شده و نتیجه (D_0/h) به‌صورت درصد بیان می‌شود. هرچه مقدار پارامتر D_0/h کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی این مسئله است که با جابه‌جایی کمتری در سنگ بستر، گسلش کامل تا سطح زمین شکل گرفته و موجب ایجاد رخنمون در سطح زمین می‌شود. این پارامتر از این جهت دارای اهمیت است که میزان خرابی محتمل سازه‌های رو زمینی در معرض گسلش سطحی، به‌شدت تابعی از میزان جابه‌جایی اختلافی رسیده به سطح زمین است. در تحلیل‌های آماری، احتمال وقوع گسلش و میزان جابه‌جایی آن، عموماً در سنگ بستر و در اعماق زمین تخمین زده می‌شود. حال اگر میزان جابه‌جایی نرمال شده در سنگ بستر به نسبت لایه خاکی با احتمال بالایی کمتر از میزان D_0/h باشد، آنگاه می‌توان اثر گسلش سطحی را بر روی سازه‌های رو زمینی ناچیز دانست. این پارامتر می‌تواند در طراحی تمهیدات مهندسی جهت مقابله با گسلش سطحی بسیار به طراحان کمک نماید.

شکل (۱۲) تغییرات پارامتر D_0/h را با تغییر درصد رطوبت برای چهار آزمایش انجام شده نشان می‌دهد. مهم‌ترین نتیجه‌ای که می‌توان استنباط نمود، تفاوت معنادار این پارامتر در خاک‌های خشک نسبت به خاک‌های مرطوب است. این مقدار برای ماسه خشک حدود ۳/۵٪ و برای ماسه‌های مرطوب بین ۲/۲٪ تا ۲/۵٪ به دست آمده است. این مسئله نشان می‌دهد که در خاک‌های مرطوب گسلش سریع‌تر به سطح زمین رسیده است. در واقع خاک‌های مرطوب (یا به عبارت صحیح‌تر خاک‌های دارای چسبندگی حقیقی یا ظاهری) رفتاری تُردتر نسبت به خاک‌های خشک دارند.



شکل (۱۲): تغییرات پارامتر D_0/h با تغییر درصد رطوبت در مدل‌سازی‌های فیزیکی.

سؤال اساسی این است که چرا رفتار خاک مرطوب تا این اندازه نسبت به خاک خشک متفاوت است؟ پاسخ به این سؤال در تفاوت رفتار خاک در این دو حالت نهفته است. شاید بتوان بهترین تفسیر را بر رفتار خاک و تغییراتی که در منحنی D_0/h مشاهده می‌شود، به‌وسیله کرنش‌های گسیختگی خاک (بخش ۶-۱-۳) ارائه نمود. همان‌طور که بیان شد، در تنش‌های قائم کم، کرنش گسیختگی خاک‌های مرطوب کمتر از خاک خشک و اشباع بوده و کمترین مقدار را نیز در حدود ۵٪ رطوبت از خود نشان می‌دهد. این نتیجه با آنچه در شکل (۱۲) نشان داده شده

است، تطابق کاملی دارد. به بیان بهتر هر چه کرنش گسیختگی کمتر باشد، خاک به ازای جابه‌جایی کمتری دچار گسیختگی برشی می‌شود، لذا میزان پارامتر D_0/h نیز برای خاک‌های با کرنش گسیختگی کمتر کاهش می‌یابد. بری [۲۳] در رساله دکتری خود نیز نتیجه‌ای مشابه این مسئله را ارائه کرده است.

۷- نتیجه‌گیری

۱. وجود رطوبت در خاک‌های دانه‌ای، رفتار برشی آنها را به‌طور کامل تغییر داده و باعث ایجاد چسبندگی ظاهری در آنها می‌شود. این چسبندگی ظاهری می‌تواند خود را در تنش‌های مختلف به شکل افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک و یا افزایش پارامتر چسبندگی نشان دهد.

۲. پوش گسیختگی خاک‌های مرطوب در تنش‌های کم (کمتر از ۰/۱ kgf/cm^2) خط مستقیم نبوده و انحنا می‌یابد. این مسئله باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی چنین خاک‌هایی در تنش‌های کم نسبت به تنش‌های زیاد می‌شود. ازآنجایی که در مدل‌سازی فیزیکی 1g، تنش‌های قائم کم است، تغییر پارامترهای مکانیکی خاک در تحلیل‌ها، خصوصاً تحلیل عددی، دارای اهمیت ویژه خواهد بود.

۳. در خاک ماسه‌ای در تنش‌های کم، با افزایش درصد رطوبت از حالت خشک تا حالت اشباع، زاویه اصطکاک داخلی ابتدا افزایش یافته (تا رطوبت حدود ۵٪) و سپس کاهش می‌یابد. با توجه به ناچیز بودن چسبندگی به‌دست‌آمده، این بدان معناست که خاک ماسه‌ای با درصد رطوبت ۵٪، بیشترین مقاومت برشی را تحت سربارهای کم خواهد داشت.

۴. کرنش گسیختگی خاک با تغییر درصد رطوبت تغییر کرده و در تنش‌های قائم کم، از حالت خشک تا اشباع، ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. کرنش گسیختگی خاک‌های مرطوب در تنش‌های کم کمتر از کرنش گسیختگی خاک‌های خشک و اشباع است.

۵. کرنش گسیختگی خاک ماسه‌ای با درصد رطوبت ۵٪ در تنش‌های کم، کمینه بوده و روند تغییرات آن با درصد رطوبت همانند روند تغییرات پارامتر D_0/h است. در واقع خاک‌های مرطوب رفتاری تُردتر نسبت به خاک‌های خشک و اشباع از خود نشان می‌دهند. این مسئله توجیه‌کننده‌ی تغییر پارامتر D_0/h در خاک‌های خشک نسبت به خاک‌های مرطوب است.

۶. کرنش گسیختگی خاک در تنش‌های قائم زیاد، رفتار متفاوتی نسبت به تنش‌های زیاد در برابر اثر رطوبت از خود نشان می‌دهد.

۷. با اضافه شدن رطوبت به خاک‌های دانه‌ای، مقدار جابه‌جایی مورد نیاز در سنگ بستر برای رسیدن باند برش به سطح زمین (پارامتر D_0/h) کاهش می‌یابد. این مقدار در خاک دانه‌ای با رطوبت ۵٪ کمترین مقدار خواهد بود.

۸. عرض باند برشی ایجاد شده در اثر گسلش در خاک‌های دانه‌ای مرطوب کمتر از خاک‌های دانه‌ای خشک است. این مسئله خود را به‌صورت رخنمون‌های تیز در سطح زمین نشان می‌دهد. این در حالی است که پروفیل تغییر شکل سطح زمین در خاک‌های دانه‌ای بدون چسبندگی، به‌اصطلاح نرم است.

مراجع

1. Likos, W.J. and Lu, N. (2004) Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil. *J. Eng. Mech.*, **130**, 646-655.
2. Mitarai, N. and Nori, F. (2006) Wet granular materials. *Advances in Physics.* **55**(1-2), 1-45.
3. Lu, N., Wu, B. and Tan, C.P. (2007) Tensile strength characteristics of unsaturated sands. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **133**, 144-154.
4. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2007) Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **5**(3), 253–275.
5. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. (2007) Foundation-structure systems over a rupturing

6. Sugimura, Y., Miura S. and Konagai, K. (2001) Damage to Shihkang dam inflicted by faulting In the September 1999 ChiChi earthquake. *Seismic Fault Induced Failures*, 143-154.

7. Kelson, K.I., Kang, K.H., Page, W.D., Lee, C.T., and Cluff, L.S. (2001) Representative styles of deformation along the Chelungpu fault from the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake: Geomorphic Characteristics and Responses of Man-Made Structure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**(5), 930–952.

8. Johansson, J. and Konagai, K. (2006) Fault induced permanent ground deformations-an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **26**, 45–53. doi: 10.1016/j.soildyn.2005.08.003.

9. Lin, M., Chung, C. and Jeng, F. (2006) Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. *Eng. Geol.*, **88**(1-2), 70–89.

10. Moosavi, S.M., Jafari, M.K., Kamalian, M. and Shafiee, A. (2010) Experimental investigation of reverse fault rupture – rigid shallow foundation interaction. *Int. J. Civil Eng.*, **8**(2), 85-98.

11. Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A. and Towhata, I. (2016) Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture. *Canadian Geotech. J.*, **53**(3), 505-519.

12. Oettle, N. and Bray, J. (2013) Fault rupture propagation through previously ruptured soil. *J. Geotech. Geoenv. Eng.*, **139**(10), 1637-1647.

13. Rojhani, M., Moradi, M., Galandarzadeh, A., and Takada, S. (2012) Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to reverse faulting. *Canadian Geotech. J.*, **49**, 659-670.

14. Kiani, M., Ghalandarzadeh, A., Akhlaghi, T., and Ahmadi, M. (2016) Experimental evaluation of vulnerability for urban segmental tunnels subjected to normal surface faulting. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **89**, 28-37.

15. Fadaee, M., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Jafari, M.K. and Kamalian, M. (2013) Soil bentonite wall protects foundation from thrust faulting: analyses and experiment. *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, **12**(3), 473-486.

16. Bransby, M.F., Davies, M.C., and El Nahas, A. (2008) Centrifuge modelling of normal fault-foundation interaction. *Bull. Earthquake Eng.*, **6**, 585-605.

17. Bray, J., Seed, R., Ciuff, L., and Seed, H. (1994) Earthquake fault rupture propagation through soil. *J. Geotech. Eng.*, **120**(3), 543-561.

18. Bray, J., Seed, R., Ciuff, L., and Seed, H. (1994) Analysis of Earthquake fault rupture propagation through cohesive soil. *J. Geotech. Eng.*, **120**(3), 562-580.

19. Roth, W.H., Kalsi, G., Papastamatiou, O., and Cundall, P.A. (1982) Numerical modeling of fault propagation in soil. *Proceedings of 4th Int. Conf. on Num. Meth. Geomech.*, 487-494.

20. Lazarte, C.A. (1996) *The Response of Earth Structures to Surface Fault Rupture*. Ph.D. Dissertation. University of California, Berkeley.

21. Sandford, A.R. (1959) Analytical and experimental study of simple geologic structures. *Geolog. Society America Bull.*, **70**(1), 19-52.

22. Belousov, B.B. (1961) Experimental geology. *Scientific American*, 96-106.

23. Bray, J.D. (1990) *The Effect of Tectonic Movements on Stresses and Deformations in Earth Embankment.* Ph.D. Dissertation, University of California Berkeley.

24. Sutherland, H.B. (1988) Uplift resistance of soils. *Géotechnique*, **38**(4), 493-516.

25. Ahmadi, M., Jafari, M.K., and Moosavi, M. (2016) An investigation on the effect of water content on strength parameters of granular soil - Its application on 1-g physical modeling. 5th *Int. Conf. Geotechnical Eng. Soil Mech*., Tehran, Iran (in Persian).

26. Ahmadi, M., Moosavi, M., and Jafari, M.K. (2017) normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **5**(3), 277–301.

Water content effect on the fault rupture propagation through wet soil-Using direct shear tests. *Adv. Lab. Test Model Soils Shales (ATMSS) Springer Series Geomech. Geoeng*., 131-138.

27. Fukushima, S. and Tatsuoka, F. (1984) Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures. *Soils and Foundations*, **24**(4), 30-48.

واژه‌نامه

۱- چسبندگی ظاهری	Apparent Cohesion
۲- پل مایع	Liquid Bridge
۳- رخنمون تیز	Sharp Scarp

Intergranular Water Effects on Shear Behavior of Wet Sand: Phenomenology Based on Direct Shear Tests and Fault Rupture Physical Modeling

Mohammad Ahmadi[1*], Seyed Mojtaba Moosavi[2] and Mohammad Kazem Jafari[3]

1. Ph.D. Candidate in Civil Engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran. *Corresponding Author, e-mail: mo.ahmadi@iiees.ac.ir

2. Assistant Professor in Civil Engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

3. Professor in Civil Engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Intergranular water in granular soils, such as sands, can produce apparent cohesion in the soil that results in changing the behavior of soil while shearing. Apparent cohesion in wet granular soil arises from surface tension and capillary effects of the small water bridges between adjacent soil grains. This intergranular water exerts an attractive force between the grains and an apparent cohesion is produced. Induced cohesion in wet soil depends on the amount of intergranular water within the pores of soil.

In this investigation, the effect of water content on the sand strength parameters (such as cohesion and internal friction angle) and deformational parameter (such as failure strain) were studied. For this purpose, some series of direct shear tests were conducted in which soil water content and its vertical stress were widely changed. Samples with 0% (dry condition), 5%, 10%, 15% and 24% (saturated soil condition) were examined in nine vertical stress (that categorized into two fields: low and high vertical stress condition). The low normal stress condition contained 0.015, 0.03 and 0.045 kgf/cm2. Vertical stresses of 0.1, 0.25, 0.4, 0.6, 0.85 and 1.25 kgf/cm2 were determined as the high stress condition. The importance of low stress condition is to obtain the exact behavior of soil at low stress condition that corresponds to vertical stresses in small scale physical models.

In this research, the investigation is based on two points of view: 1) from deformational point of view, the most important result is the relationship between soil's water content and its failure strain. Adding water to sandy soil decreases its failure strain and it has its lowest value at about 5% water. It means that wet soil behaves more brittle than dry one. In this point of view, also a good similarity can be observed between the results of direct shear tests and physical models results (D0/h parameter); 2) From strength point of view, in low vertical stress tests, with an increase in water content to about 5%, internal friction angle increased and beyond this limit decreased. As in this situation, almost a constant cohesion obtained from the data, it can be concluded that by an increase in water content to about 5%, soils shear strength also increases and then decreases (in low stress condition that it corresponds to physical modeling stress level). Besides, discussions were made on the behavior of sand at high stress level and in residual condition.

Above-mentioned results have been employed to interpret the result of some fault rupture physical modeling tests on wet sand. The pure sand was used with various water content (0% (dry), 5%, 10% and 15%). One of the important results that can be achieved in physical modeling tests is the normalized required fault displacement (D0/h) at the bedrock, in which the fault rupture trace reaches the ground surface. Obtained results show that as the water content increased up to a certain value (around 5%), the D0/h parameter decreases at first and beyond this limit it increases a little. Generally, it seems that soil behaves more brittle when it is wet. Besides, it is in its most brittle behavior when the water content of soil is around 5%. The observed trend of D0/h parameter is almost similar to what observed on failure strain of the wet sand that was achieved by direct shear tests.

Keywords: Intergranular Water, Wet Sand, Apparent Cohesion, Direct Shear Test, Fault Rupture Physical Model, Failure Strain.