

## تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک درشت‌بافت در آزمایش برش مستقیم

مریم صالحیان دستجردی<sup>۱\*</sup> و عباس همت<sup>۲</sup>

### چکیده

مقاومت برشی یکی از ویژگی‌های مهم خاک است که بر روی برهم‌کنش ماشین و خاک مؤثر است. ساختمان خاک با تر و خشک شدن (در اثر آبیاری‌های غرقابی مکرر) تغییر می‌کند و پارامترهای مقاومت برشی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این‌رو، اثر این فرآیند بر پارامترهای مقاومت برشی خاک درشت‌بافت (لوم شنی) مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش، نمونه‌های بزرگ خاک تهیه شده و برخی از آنها تحت ۵ چرخه تر و خشک شدن قرار گرفته است. سپس نمونه‌ها با یا بدون فرآیند تر و خشک شدن در سه سطح بار متراکم کننده (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) و در دو سطح رطوبتی (۰/۹ و ۰/۹) حدخیمیری (PL) و (۱/۱ PL) متراکم شده‌اند. سپس سه نمونه برای انجام آزمایش برش مستقیم و یک نمونه برای اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک تهیه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش رطوبت موجب افزایش جرم مخصوص ظاهری و چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. فرآیند تر و خشک شدن نیز با افزایش تحرک ذرات رس و نمک‌های محلول در مرحله تر شدن و رسوب آن در بین ذرات درشت و بر روی باندهای آبی، موجب افزایش جرم مخصوص ظاهری و چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** آزمایش برش مستقیم، چرخه‌های تر و خشک شدن، لوم شنی، مقاومت برشی خاک.

**ارجاع:** صالحیان دستجردی م. و همت ع. ۱۴۰۰. تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک درشت‌بافت در آزمایش برش مستقیم. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۱۸: ۸-۱.

۱- دانش‌آموخته دکتری مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

\* نویسنده مسئول: [saleh273@yahoo.com](mailto:saleh273@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۱

## مقدمه

مقاومت برشی یکی از ویژگی‌های مهم خاک است که در تخمین ظرفیت کشش وسایل زمین‌گیرایی (Imhoff *et al.*, 2004)، طراحی ابزارهای خاک‌ورز و محاسبه نیروی مقاوم در برابر عبور ابزار خاک‌ورز در خاک (Sadek *et al.*, 2011) اثر دارد. از عوامل تأثیرگذار بر مقاومت برشی خاک می‌توان به نوع خاک، مقدار رطوبت خاک (Kemper & Rosenau, 1984)، استحکام خاک‌دانه‌ها (Frei *et al.*, 2003)، مواد آلی خاک و جرم مخصوص ظاهری آن (Mouazen, 2002) اشاره کرد. استحکام خاک‌دانه‌ها با تر و خشک شدن خاک تغییر می‌کند. تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر استحکام خاک‌دانه‌ها بسیار متفاوت است و به نوع خاک بستگی دارد (Al-Obaydi *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2011). مطالعات (Swanepoel *et al.*, 2013) نشان می‌دهد که تر و خشک شدن خاک‌ها می‌تواند تغییرات قابل توجهی در استحکام خاک‌دانه‌ها و ساختمان آنها ایجاد کند. تغییرات فیزیکی خاک در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن عبارتند از: تغییر شکل خاک‌دانه‌ها (Telfair *et al.*, 1975)، افزایش مقاومت کششی<sup>۱</sup> (Dexter *et al.*, 1984) و کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها<sup>۲</sup>. پایداری خاک‌دانه‌ها به نوع کانی رس خاک بستگی دارد و تحت تأثیر فرآیند تر و خشک شدن کاهش یا افزایش می‌یابد (Singer *et al.*, 1992). نتایج حاصل از پژوهش‌های (Leij *et al.*, 2002) نشان داده است که خشک کردن خاک، منافذ ساختاری (منافذ درشت) را کاهش و منافذ ریز را افزایش می‌دهد. هنگامی که خاک‌های غیراشباع تحت تنش‌های داخلی و خارجی قرار می‌گیرند، در اثر جوش خوردن خاک‌دانه‌ها و تبدیل آنها به واحدهای بزرگ‌تر، منافذ درشت خاک کاهش یافته (Ghezzehei & Or, 2000) و مقاومت آنها می‌تواند افزایش یابد (Peng & Horn, 2005).

مقاومت برشی خاک با معادله مور-کلمب بیان می‌شود و از دو بخش تشکیل شده است: ۱- چسبندگی بین دانه‌های خاک (c) که به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند مقدار و نوع کانی رس، درجه اشباع و مقدار ماده آلی بستگی دارد و ۲- مقاومت اصطکاکی که متناسب با تنش عمودی وارد بر سطح برش است و به

زاویه اصطکاک بین دانه‌های خاک (زاویه اصطکاک داخلی (φ)) بستگی دارد. رابطه‌ی بین تنش عمودی و تنش برشی در صفحه گسیختگی به صورت معادله (۱) بیان می‌شود:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

در این معادله τ تنش برشی (kPa)، σ تنش عمودی بر صفحه گسیختگی (kPa)، c چسبندگی (kPa) و φ زاویه اصطکاک داخلی (°) است (Hemmat *et al.*, 2009). روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری مشخصه‌های مقاومت برشی خاک نظیر آزمایش برش مستقیم، پره برشی، آزمایش تک‌محوری غیرمحصور و آزمایش سه محوری وجود دارد (Hoyos *et al.*, 2010)، که دو روش برش مستقیم و سه محوری متداول تر هستند. در این پژوهش تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامترهای مقاومت برشی یک نوع خاک درشت‌بافت با استفاده از آزمایش برش مستقیم ارزیابی شده است.

## مواد و روش‌ها

## ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

در این پژوهش، از یک نوع خاک سطحی (عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری) با بافت درشت (لوم شنی) از مزارع شرکت طرح توسعه نیشکر اهواز استفاده شده است. بافت خاک به روش هیدرومتری (Sheldrick & Wang, 1993) و حدود پایداری خاک، شامل حد روانی<sup>۳</sup>، حد خمیری<sup>۴</sup> و حد انقباض<sup>۵</sup> به روش استاندارد BS اندازه‌گیری شده است (McBride, 1993). درصد آهک به روش خنثی کردن با اسید و درصد مواد آلی به روش سوزاندن تر اندازه‌گیری شده است (Walkley & Black, 1934). مقدار ظرفیت زراعی<sup>۶</sup> به روش صفحات فشاری در فشار منفی ۳۰ کیلوپاسکال و با سه تکرار تعیین شده است. برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

3- Liquid Limit (LL)

4- Plastic Limit (PL)

5- Shrinkage Limit (SL)

6- Field Capacity (FC)

1- Tensile strength

2- Aggregates stability

جدول ۱- برخی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه<sup>۱</sup>

بافت	شن	سیلت	رس	حد روانی	حد خمیری	حد انقباض	گنجایش زراعی	آهک	مواد آلی
لوم شنی	۷۵	۱۵	۱۰	۲۶/۸	۱۴/۵	۳/۲	۱۹	۵۴	۰/۳۵

<sup>۱</sup> همه اعداد به صورت درصد وزنی بیان شده‌اند.

### روش تهیه نمونه‌های خاک

به منظور تهیه نمونه‌های مناسب خاک، خاک سطحی هوا-خشک از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده است. با توجه به اینکه آزمایش‌ها لازم است روی نمونه‌هایی که تحت فرآیند تر و خشک شدن قرار گرفته‌اند و همچنین بر روی نمونه‌های خاک بدون تر و خشک شدن انجام شود، نمونه‌ها به دو روش آماده شده‌اند. در روش اول که در آن خاک بدون تر و خشک شدن استفاده شده، با توجه به حجم ظرف آزمایش (قطر ۲۵/۵ و ارتفاع ۸ سانتی‌متر) و جرم مخصوص ظاهری خشک معادل با ۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و نیز دو سطح رطوبتی ۰/۹ حد خمیری (PL) و ۱/۱PL، مقدار خاک و آب مورد نیاز محاسبه شده است. سپس خاک درون سینی فلزی ریخته شده و آب به کمک آب‌فشان به آن اضافه شده و به مدت ۴۵ دقیقه ورز داده شده است. پس از آن، خاک مرطوب به سینی کوچک‌تری منتقل شده و روی سطح خاک با پارچه مرطوب و روکش پلاستیکی پوشانده شده و به مدت ۲۴ ساعت باقی مانده تا رطوبت به طور یکنواخت در آن توزیع شود. پس از گذشت ۲۴ ساعت، خاک مرطوب به صورت لایه لایه، (سه لایه ۲/۶۶ سانتی‌متر) در ظرف ریخته شده است تا فشردگی یکنواختی با عمق نمونه به دست آید. در هر لایه با ضربه‌های آهسته چکش چوبی خاک فشرده شده تا جرم مخصوص ظاهری مرطوب خاک به مقدار مورد نظر برسد. به منظور درگیری بهتر لایه‌های خاک پیش از اضافه کردن لایه جدید شیارهایی در سطح لایه قبلی ایجاد شده است. در روش دوم که نمونه‌ها با تر و خشک شدن هستند، مجدداً با توجه به حجم ظرف (قطر ۲۵/۵ و ارتفاع ۸ سانتی‌متر) و جرم مخصوص ظاهری خشک برابر با ۱/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب مقدار خاک مورد نیاز تعیین شده و پس از آن به درون ظرف ریخته شده است. با وارد کردن ضربات آهسته به بدنه ظرف ارتفاع خاک به ۸ سانتی‌متر رسیده و جرم مخصوص مورد نظر ایجاد شده است. سپس سطح خاک صاف شده و با یک روکش پلاستیکی که سوراخ‌هایی روی آن قرار داشت، پوشانده شده است.

با توجه به اینکه مقدار EC آب (Electrical Conductivity) یا هدایت الکتریکی آب، معرف قدرت یونی آب برای انتقال جریان برق است). مورد استفاده برای آبیاری نقش مهمی در میزان سخت‌شدگی خاک دارد و همچنین اینکه آب مورد استفاده برای آبیاری مزارع نیشکر دارای EC متغیر و بین ۱-۲/۵ dS/m (بر اساس مذاکره شفاهی با کارشناس آزمایشگاه خاک طرح توسعه نیشکر اهواز) است، آب چاهی با EC برابر با ۱/۶۵ dS/m تهیه شده است. مقدار آب مورد نیاز برای رسیدن خاک به رطوبت FC محاسبه شده و روی سطح پلاستیک ریخته شده است. پس از فرو رفتن کامل آب به درون خاک روکش پلاستیکی برداشته و ظرف پس از وزن شدن به درون آونی با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد (میانگین دمای فصل رشد نیشکر) منتقل شده است. پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌ها به طور پیوسته وزن شده تا زمانی که رطوبت آن به مقدار ۰/۷ ظرفیت زراعی (FC) (مقدار رطوبت خاک در موقع آبیاری) برسد. نمونه‌ها به منظور یکنواخت شدن رطوبت آن‌ها و نیز کم‌بودن مقدار آب مورد نیاز برای رسیدن نمونه‌ها به رطوبت FC نسبت به مرحله اول مرطوب کردن، آب با استفاده از آب‌فشان به نمونه‌ها اضافه شده و ظرف مجدداً درون آون قرار گرفته‌است. مراحل مرطوب و خشک کردن هر ظرف خاک تا ۵ مرتبه و در مدت ۲۰-۱۵ روز انجام شده است. در آخرین چرخه، خشک کردن نمونه‌ها تا زمانی ادامه یافته که رطوبت نمونه‌های خاک به ۰/۹PL یا ۱/۱PL برسد. سپس نمونه‌ها با پارچه مرطوب و روکش پلاستیکی پوشانده شده و به مدت ۲۴ ساعت باقی مانده تا رطوبت به طور یکنواخت در آنها توزیع شود. پس از تهیه نمونه، آزمایش‌ها به دو صورت انجام شده‌اند. در تعدادی از آزمایش‌ها پس از تهیه نمونه، سطح خاک پیش بارگذاری شده و در برخی دیگر بدون اعمال پیش بار مراحل بعدی انجام شده است. در مورد نمونه‌های بارگذاری شده یک صفحه فلزی سوراخ‌دار به قطر ۲۵ سانتی‌متر بر روی سطح خاک قرار داده شده و توسط دستگاه CBR پیش بارگذاری با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر نمونه وارد شده است. پس از رسیدن بار به مقدار

برشی در برابر تنش عمودی (۷۵، ۱۲۵ و ۲۲۵ کیلوپاسکال) و برازش یک خط به آن نقاط، پارامترهای چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) تعیین شده است.

در این پژوهش تأثیر دو سطح رطوبتی (۰/۹PL و ۱/۱PL)، سه سطح بار متراکم کننده (۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال) بر پارامترهای مقاومت برشی خاک، در شرایط با و بدون چرخه‌های تر و خشک شدن، به وسیله آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۲). در صورت معنی‌دار بودن اثر هر عامل و برهم‌کنش آن‌ها، مقادیر میانگین آن‌ها توسط آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شده است. نرم‌افزارهای SAS و Excel برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شده‌اند.

## نتایج و بحث

### جرم مخصوص ظاهری

نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از تعیین جرم مخصوص ظاهری خاک نشان می‌دهد که اثر متقابل تر و خشک شدن، رطوبت و مقدار بار متراکم کننده بر جرم مخصوص ظاهری در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است که در جدول ۲ نشان داده شده است.

موردنظر، نمونه به مدت ۳۰ دقیقه تحت بار نگه داشته شده است. سپس یک نمونه استوانه‌ای (با قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) برای اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک و سه نمونه (به ترتیب با قطر و ارتفاع ۶۳ و ۲۰ میلی‌متر) برای آزمایش برش تهیه شده است. دیواره قالب‌های مخصوص دستگاه برش با یک لایه نازک گریس پوشانده شده تا نمونه هنگام خروج و انتقال به جعبه برش راحت خارج شود و آسیب نبیند. جعبه برش از دو نیم جعبه (۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر) تشکیل شده که در طول آزمایش نیم جعبه بالایی ثابت است و نیم جعبه پایینی حرکت افقی دارد که این امر باعث ایجاد گسیختگی در نمونه می‌شود. بارهای عمودی ۱۵/۵، ۳۱/۵ و ۶۳ کیلوگرم (برابر با سه سطح تنش ۷۵، ۱۲۵ و ۲۲۵ کیلوپاسکال) انتخاب شده است. جابجایی سنج‌های افقی و عمودی در هر ۳۰ ثانیه خوانده شده و قرائت‌ها تا ۹ دقیقه ادامه یافته است. نرخ برش ۱/۰۶ میلی‌متر بر دقیقه است. با توجه به ضریب واسنجی نیروسنج مقدار نیرو محاسبه شده و از تقسیم نیرو بر سطح مقطع نمونه تنش برشی محاسبه شده است. سپس نمودار تنش-تغییر مکان برشی (افقی) در هر آزمایش رسم شده است. این آزمایش بدون زهکشی انجام شده و به دلیل اینکه گسیختگی در آزمایش‌ها از نوع فشاری بوده است، به منظور تعیین تنش برشی بیشینه، مقدار تنش در زمان ثابت شدن تنش‌ها به عنوان تنش در نقطه گسیختگی در نظر گرفته شده است. با رسم تنش

جدول ۲- خلاصه تجزیه واریانس (میانگین مربعات) و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

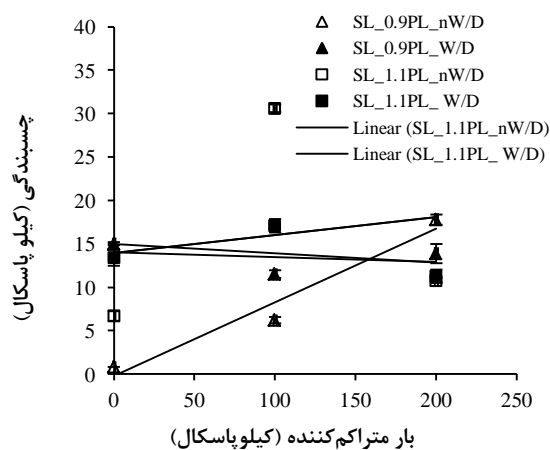
منابع تغییرات	درجه آزادی	جرم مخصوص ظاهری	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی
تر و خشک شدن (A)	۱	**۰/۰۳۶	**۱۲۳/۷	۲۵/۳**
رطوبت (B)	۱	**۰/۰۷۵	**۶۹۶/۸	۱۵۶۵/۳**
بار متراکم‌کننده (C)	۲	**۰/۲۹۹	**۳۹۱/۲	۱۱۶/۴**
A×B	۱	**۰/۰۱۵	**۲۸۵/۶	۰/۸۳ <sup>n.s</sup>
A×C	۲	**۰/۰۱۶	**۳۶۹/۲	۱۱۲/۳**
B×C	۲	**۰/۰۲۸	**۴۹۶/۲	۸۵/۳**
A×B×C	۲	**۰/۰۰۶۹	**۳۵/۰	۸/۹**

\*\* بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ است.

خشک شدن خاک جرم مخصوص ظاهری افزایش یافته است. با این حال روند مشاهده شده برای رطوبت ۰/۹PL و ۱/۱PL متفاوت است. برای رطوبت ۰/۹PL افزایش بار به ۲۰۰ کیلوپاسکال افزایش جرم مخصوص ظاهری را در پی

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در حالت بدون بار جرم مخصوص ظاهری نمونه‌های بدون تر و خشک شدن ۱/۲ تن بر مترمکعب و برای نمونه‌های تر و خشک شده تقریباً ۱/۳ تن بر مترمکعب است، در نتیجه با تر و

باشد. با افزایش رطوبت، تعداد هلال‌ها و همچنین پیوستگی غشاءهای رطوبتی در خاک بیشتر شده، که با نتایج به دست آمده توسط Hemmat *et al.* (2009, 2010) مطابقت دارد اما با نتایج McKyes *et al.* (1994) و Mouazen (2002) متفاوت است. برای نمونه‌هایی که تحت فرآیند تر و خشک شدن قرار گرفته‌اند در حالت بدون بار افزایش چسبندگی دیده شده زیرا هنگامی که خاک تحت چرخه‌های تر و خشک قرار گرفته خاکدانه‌ها در محل تماسشان بهم پیوسته (Ghezzehei & Or, 2000) و مواد پراکنده شده (عموماً رس‌ها و نمک‌های محلول) در محل تماس ته‌نشین شده است (Ghezzehei & Or, 2000; Hussein & Adey, 1995). در رطوبت ۱/۱ PL با اعمال بار ۲۰۰ کیلوپاسکال با توجه به اینکه خاک به حالت اشباع نزدیک شده و فشار آب منفذی آن افزایش یافته از تماس بیشتر ذرات خاک جلوگیری شده و چسبندگی خاک کاهش یافته است. اما در رطوبت ۰/۹ PL با اعمال بار ۲۰۰ کیلوپاسکال چسبندگی خاک افزایش یافته است. احتمالاً اعمال این بار موجب افزایش سطح تماس در نقاط بین ذرات خاک و در نتیجه افزایش چسبندگی آن شده است.

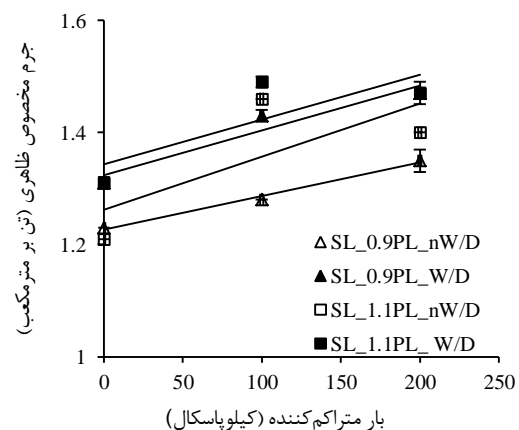


شکل ۲- اثر رطوبت، تر و خشک شدن و بار متراکم کننده بر چسبندگی. SL: خاک لوم شنی، 0.9 PL: رطوبت ۰/۹ حد خمیری، 1.1 PL: رطوبت ۱/۱ حد خمیری، W/D: با تر و خشک شدن و nW/D: بدون تر و خشک شدن

#### رابطه چسبندگی با جرم مخصوص ظاهری خاک

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است در رطوبت ۱/۱ PL با افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، افزایش بار متراکم کننده از ۰ به ۱۰۰ کیلوپاسکال، چسبندگی

داشته است. این احتمال وجود دارد که در این حالت منافذ بین ذرات کمتر شده و ذرات بیشتر در هم فرو رفته‌اند. اما برای رطوبت ۱/۱ PL با افزایش بار به ۲۰۰ کیلوپاسکال جرم مخصوص ظاهری کاهش یافته است زیرا با نزدیک شدن خاک به حالت اشباع فشار آب منفذی زیاد شده و مانع فرو رفتن ذرات خاک در یکدیگر شده است. نتایج حاصل با نتایج به دست آمده توسط Hemmat *et al.* (2009) مطابقت دارد. فرآیند تر و خشک شدن موجب کاهش پایداری خاکدانه‌ها و حساس شدن خاک به تراکم شده است.



شکل ۱- اثر رطوبت، تر و خشک شدن و بار متراکم کننده بر جرم مخصوص ظاهری. SL: خاک لوم شنی، 0.9 PL: رطوبت ۰/۹ حد خمیری، 1.1 PL: رطوبت ۱/۱ حد خمیری، W/D: با تر و خشک شدن و nW/D: بدون تر و خشک شدن

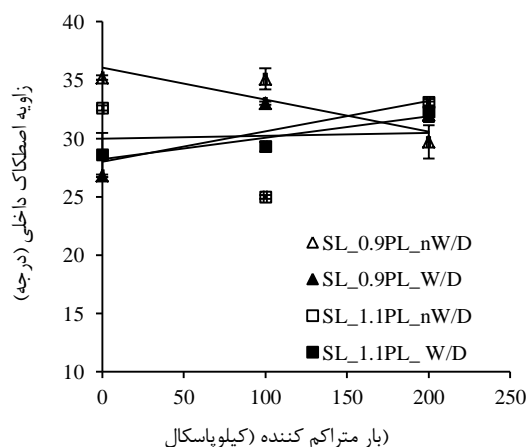
#### چسبندگی

در اثر تر و خشک شدن، رطوبت و بار متراکم کننده بر چسبندگی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است که در جدول ۲ نشان داده شده است. کمترین مقدار چسبندگی در رطوبت ۰/۹ PL و در حالت بدون تر و خشک شدن دیده شده است. در هر دو سطح رطوبت، تر و خشک شدن موجب افزایش چسبندگی خاک شده است.

#### رابطه چسبندگی با بار متراکم کننده

در بار متراکم کننده ۱۰۰ کیلوپاسکال با افزایش رطوبت از ۰/۹ PL به ۱/۱ PL چسبندگی خاک افزایش یافته است که در شکل ۲ نشان داده شده است. دلیل این امر آنست که علاوه بر مکش ماتریک، تعداد هلال‌های آبی که بین ذرات خاک تشکیل شده است می‌تواند عامل چسبندگی خاک

نتایج با نتایج به دست آمده توسط Hemmat *et al.* (2009, 2010) و Komandi (1992) و Zhang *et al.* (2001) مطابقت دارد. در رطوبت ۱/۱ PL با اعمال بار ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی کاهش و سپس افزایش یافته است. اما در رطوبت ۰/۹ PL دقیقاً عکس این روند دیده می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که رطوبت خاک نقش مهمی در زاویه اصطکاک داخلی دارد و تغییرات آن می‌تواند رفتار اصطکاک داخلی خاک را تغییر دهد.

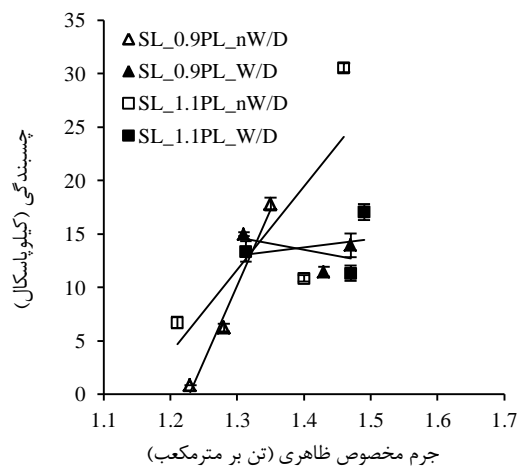


شکل ۴- اثر رطوبت، تر و خشک شدن و بار متراکم کننده بر زاویه اصطکاک داخلی. SL: خاک لوم شنی، 0.9 PL: رطوبت ۰/۹ حد خمیری، 1.1 PL: رطوبت ۱/۱ حد خمیری، W/D: با تر و خشک شدن و nW/D بدون تر و خشک شدن

#### رابطه زاویه اصطکاک داخلی با جرم مخصوص ظاهری

شکل ۵ نشان می‌دهد که در هر دو رطوبت (۰/۹ PL و ۱/۱ PL) در اثر ۵ سیکل تر و خشک شدن زاویه اصطکاک داخلی کاهش و جرم مخصوص ظاهری افزایش یافته است. به نظر می‌رسد رسوب ذرات رس در بین ذرات درشت و کاهش مقدار فرورفتگی سبب کاهش زاویه اصطکاک داخلی شده است (Hemmat *et al.*, 2009). همان‌گونه که در شکل‌های ۲ و ۴ و شکل‌های ۳ و ۵ مشاهده می‌شود رفتار چسبندگی و اصطکاک داخلی خاک عکس یکدیگر است، هر کجا چسبندگی افزایش یافته، زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است و بالعکس، که حاکی از آنست که این دو پارامتر در خاک نقش مکمل دارند. این نتایج با نتایج به دست آمده توسط Hemmat *et al.* (2009, 2010) مطابقت دارد.

افزایش یافته و در حالت بدون تر و خشک شدن این افزایش محسوس‌تر است. با رسیدن بار متراکم کننده به ۲۰۰ کیلوپاسکال چسبندگی کاهش یافته است که دلیل آن رسیدن خاک به حالت اشباع و افزایش فشار آب خاک و جلوگیری از تماس بیشتر ذرات است. برای رطوبت ۰/۹ PL و با تر و خشک شدن این روند مشاهده نشده است.



شکل ۳- اثر رطوبت، تر و خشک شدن و جرم مخصوص ظاهری بر چسبندگی. SL: خاک لوم شنی، 0.9 PL: رطوبت ۰/۹ حد خمیری، 1.1 PL: رطوبت ۱/۱ حد خمیری، W/D: با تر و خشک شدن و nW/D بدون تر و خشک شدن

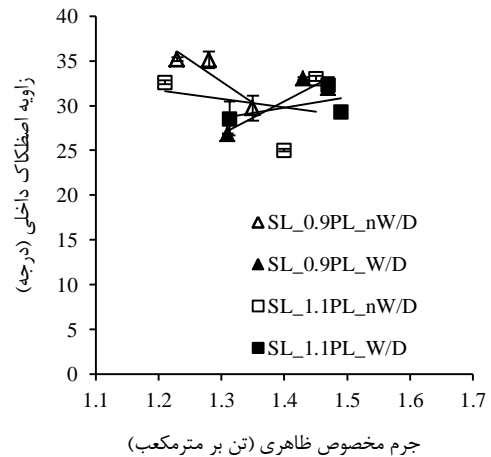
#### زاویه اصطکاک داخلی

اثر تر و خشک شدن بر زاویه اصطکاک داخلی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۲). بیشترین زاویه اصطکاک داخلی مربوط به حالت بدون تر و خشک شدن و رطوبت ۰/۹ PL است. در حالت بدون بار متراکم کننده در هر دو سطح رطوبت، تر و خشک شدن موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک شده است.

#### رابطه زاویه اصطکاک داخلی با بار متراکم کننده

تر و خشک شدن خاک (در حالت بدون بار) موجب کاهش زاویه اصطکاک داخلی شده است که در شکل ۴ دیده می‌شود. علت این کاهش احتمالاً رسوب ذرات رس در بین ذرات درشت و کاهش مقدار فرورفتگی آنها است. افزایش رطوبت از ۰/۹ PL به ۱/۱ PL زاویه اصطکاک داخلی را کاهش داده است، چرا که آب به‌عنوان روان‌کننده، فرورفتگی ذرات خاک در یکدیگر را کاهش می‌دهد. این

3. Frei, M., Boll, A., Graf F., Heinimann, HR., & Springman, S. (2003). Quantification of the influence of vegetation on soil stability. *Proceedings of the International Conference on Slope Engineering*: 8–10 December. Hong Kong, China.
4. Ghezzehei, T. A., & Or, D. (2000). Dynamics of soil aggregate coalescence governed by capillary and rheological processes. *Water Resources Research*, 36: 367-379.
5. Hemmat, A., Aghilinategh, N., & Sadeghi, M. (2010). Shear strength of repacked remoulded samples of a calcareous soil as affected by long-term incorporation of three organic manures in central Iran. *Biosystems Engineering*, 1-11.
6. Hemmat, A., Tahmasebi, M., Vafaeian, M., & Mosaddeghi, M. R. (2009). Relationship between pre-compaction stress and shear strength under confined and semi-confined loadings for a sandy loam soil. *Biosystems Engineering*, 102: 219-226.
7. Hoyos, L. R., Velosa, C. L., & Puppala, A. J. (2010). A novel suction-controlled ring shear testing apparatus for unsaturated soils. *GeoShanghai International Conference-Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils*. June 3, June 5. Geo technical Special Publication. American Society of Civil Engineers, Shanghai, China, pp. 32-39.
8. Hussein, J., & Adey, M. A. (1995). Changes in microstructure, voids and fabric of surface samples of a Vertisol caused by wet and dry cycles. *Geoderma*, 85: 63-82.
9. Imhoff, S., Da Silva, A. P. & Fallow, D. (2004). Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 17-24.
10. Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1984). Soil cohesion as affected by time and water content. *Soil Science Society American Journal*, 48: 1001-1006.
11. Komandi, G. (1992). On the mechanical properties of soil as they affect traction. *Journal of Terramechanics*, 29: 373-380.
12. Leij, F. J., Ghezzehei, T. A., & Or, D. (2002). Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. *Soil and Tillage Research*, 64: 61-78.
13. McBride, R. A. (1993). *Soil consistency limits*. In 'Soil sampling and methods of analysis'. (Ed. MR Carter), pp. 519-527.
14. McKyes, E., Nyamugafata, P., & Nyamapfene, KW. (1994). Characterization of cohesion, friction angle and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe. *Soil and Tillage Research*, 29: 357-366.



شکل ۵- اثر رطوبت، تر و خشک شدن و جرم مخصوص ظاهری بر زاویه اصطکاک داخلی. SL: خاک لوم شنی، 0.9 PL: رطوبت ۰/۹ حد خمیری، 1.1 PL: رطوبت ۱/۱ حد خمیری، W/D: با تر و خشک شدن و nW/D: بدون تر و خشک شدن

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر فرآیند تر و خشک شدن بر مقاومت برشی یک نوع خاک درشت‌بافت با استفاده از آزمایش برش مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت از ۰/۹PL به ۱/۱PL، جرم مخصوص ظاهری و چسبندگی خاک افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. تر و خشک شدن خاک با افزایش تحرک ذرات رس و نمک‌های محلول و رسوب این ذرات در بین ذرات بزرگ‌تر (سیلت و شن)، منجر به افزایش جرم مخصوص ظاهری، افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی شده است. بنابراین فرآیندهای تر و خشک شدن (در اثر آبیاری‌های غرقابی مکرر)، رفتار خاک را از یک خاک اصطکاکی پس از عملیات تهیه بستر (بدون تر و خشک شدن)، به یک خاک چسبنده- اصطکاکی در زمان برداشت (با تر و خشک شدن) تبدیل کرده است.

### منابع

1. Al-Obaydi, M. A., Al-Kiki, I. M., & Al-Zubaydi, A. H. (2010). Strength and durability of gypseous soil treated with waste lime and cement. *Journal of Al-Rafidain Engineering*, 18: 28-42.
2. Dexter, A., Kroesbergen, B., & Kuipers, H. (1984). Some mechanical properties of aggregates of top soils from the Ijsselmeer polders. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 32: 205-227.

15. Mouazen, A. M. (2002). Mechanical behaviour of the upper layers of a sandy soil under shear loading. *Journal of Terramechanics*, 39: 115-126.
16. Peng, X., & Horn, R. (2005). Modelling Soil Shrinkage Curve across a wide range of Soil Types. *Journal of Soil Science of American Society*, 69: 584-492.
17. Sadek, M. A., Chen, Y., & Liu, J. (2011). Simulating shear behavior of a sandy soil under different soil conditions. *Journal of Terramechanics*, 48: 451-458.
18. Sheldrick, B. H., & Wang, C. (1993). *Particle size distribution*. In M. R. Carter (Ed.), *Soil sampling and methods of analysis*. PP 499-511. Boca Raton, FL: Lewis Publications/CRC Press.
19. Singer, M. J., Southard, R. J., Warrington, D. N., & Janitzky, P. (1992). Stability of Synthetic Sand-Clay Aggregates after Wetting and Drying Cycles. *Soil Science Society of America Journal*. 56(6): 1843-1848.
20. Swanepoel, P., Botha, P., du Preez, C., & Snyman, H. (2013). Physical quality of a podzolic soil following 19 years of irrigated minimum-till kikuyu-ryegrass pasture. *Soil and Tillage Research*, 133: 10-15.
21. Tang, A. M., Ngoc, M., & Cui, Y. J. (2011). Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting-drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil. *Journal of Geotechnique*, 61: 421-429.
22. Telfair, D., Gardner, M. R., & Miars, D. (1957). The restoration of a structurally degenerated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 21: 131-134.
23. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the effect of the digestive method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sciences*, 37: 29-38.
24. Zhang, B., Horn, R. T., & Baumgartl, T. (2001). Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water. *Soil and Tillage Research*, 59: 97-106.