

پیامد آبیاری با پساب تصفیه شده بر برخی ویژگی‌های مکانیکی خاک

فضای سبز مجتمع فولاد مبارکه

روزیتا سلطانی*، محمدرضا مصدقی، مجید افیونی، شمس‌اله ایوبی و مهران شیروانی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۶)

چکیده

کاربرد پساب برای آبیاری در درازمدت موجب افزودن برخی ترکیب‌ها و یون‌ها به خاک می‌شود که ممکن است سبب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولیکی و مکانیکی خاک شود که این در ارتباط با رشد گیاهان در خاک مهم است. در این پژوهش تأثیر کاربرد کوتاه، میان و درازمدت پساب تصفیه‌خانه فاضلاب مجتمع فولاد مبارکه اصفهان بر مقاومت فروری و مقاومت برشی خاک فضای سبز بررسی شد. مقاومت فروری و مقاومت برشی خاک به صورت صحرایی به ترتیب توسط فروسنج جیبی و دستگاه جعبه برش مزرعای اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد کاربرد پساب سبب افزایش مقاومت فروری خاک (سختی خاک) در دامنه خشک و مرطوب در کوتاه‌مدت، میان‌مدت و درازمدت شده است. تیمار ۱۹ سال آبیاری شده با پساب بیشترین مقاومت فروری خاک در حالت مرطوب را داشت ولی آب چاه تأثیری بر مقاومت فروری خاک نداشته است. سله سطحی در مکان‌هایی که آبیاری نشده‌اند، باعث افزایش مقاومت فروری خاک شده است ولی خاک‌های سله‌دار و آبیاری شده در مقادیر مقاومت فروری خشک و مرطوب تفاوتی با خاک بکر نشان ندادند. در بررسی اثر پساب و آب چاه بر مقاومت برشی خاک مشخص شد که پساب، آب چاه و سله سطحی تأثیری بر پارامتر چسبندگی (c) نداشته ولی زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) خاک را به طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک در منطقه مورد بررسی بیشتر متأثر از اجزای خاک (بافت و درصد سنگریزه) و ریزساختار خاک است و کاربرد پساب تأثیر چشمگیری بر این پارامترها نداشت.

واژه‌های کلیدی: پساب، مقاومت فروری، مقاومت برشی، فروسنج جیبی، جعبه برش مزرعای

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Rozita.soltani01@gmail.com

مقدمه

خاک نداشته و مقدار آن در هر خاک در حین بارگذاری ثابت است. ولی مقاومت اصطکاکی متناسب با تنش عمودی وارده بر سطح گسیختگی بوده و زاویه اصطکاک بین دانه‌های خاک موسوم به زاویه اصطکاک داخلی (φ) است. مقاومت اصطکاکی خاک به دلیل اصطکاک بین ذرات، حرکت غلتک مانند دانه‌های مجاور روی یکدیگر و قفل شدن دانه‌ها در یکدیگر است. بنابراین مقاومت اصطکاکی خاک بستگی به شکل دانه‌ها و درجه تراکم (چگالی ظاهری) خاک دارد (۲۸).

بر اساس نظریه موه‌ر-کولمب، در اثر ترکیب بحرانی تنش های عمودی و برشی، گسیختگی در راستای یک صفحه در درون جسم اتفاق می افتد که تنش برشی روی صفحه گسیختگی (مقاومت برشی خاک) به عنوان تابعی از تنش نرمال (σ_n) با معادله (۱) بیان می شود:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

که در این رابطه τ ، مقاومت برشی (هکتوپاسکال) و c ، چسبندگی ظاهری (هکتوپاسکال)، σ_n تنش نرمال روی سطح گسیختگی (هکتوپاسکال) و φ زاویه اصطکاک داخلی است. معادله فوق رابطه یک خط مستقیم موسوم به پوش گسیختگی (Failure envelope) در مختصات τ و σ_n را نشان می دهد که شیب آن نسبت به امتداد افقی، ضریب اصطکاک داخلی ($\tan \varphi$) و عرض از مبدأ آن چسبندگی (c) است (۹).

آبرز (۲) گزارش کرد که از نمودارهای مقاومت برشی (τ در برابر σ_n) به منظور پیش بینی رابطه بین c و φ و مقدار آب و چگالی ظاهری خاک استفاده می شود. مقاومت برشی با مقدار آب و پتانسیل آب خاک ارتباط دارد. به طور کلی مقاومت مکانیکی خاک با کاهش مقدار آب یا کاهش پتانسیل آب خاک افزایش می یابد (۹). مهم ترین ویژگی های مؤثر فیزیکی خاک بر مقاومت برشی خاک سطحی، شامل توزیع اندازه ذرات (۱۳) و (۱۸)، مقدار آب یا پتانسیل ماتریک خاک (۷، ۱۱ و ۱۷)، خاکدانه سازی (۴)، اندازه سنگریزه های موجود در خاک (۱۸)، شبکه ریشه ای گیاهان (۱۲ و ۲۷)، زمان و شیوه خاک ورزی (۱۷) است.

منابع آب در میان سایر منابع طبیعی جایگاه ویژه ای داشته، در همه نقاط کره زمین بیش از هر ماده دیگری با مقادیر مختلف موجود بوده و نقش مهمی در زندگی و محیط زیست انسان ایفا می کنند. در ۲۵ سال آخر قرن بیستم این عقیده قوت گرفته است که تصفیه فاضلاب های شهری و صنعتی باید بتواند آبی با چنان کیفیتی، تولید کند که دور ریخته نشود، بلکه مصارف مطلوبی برای آن قابل پیش بینی باشد. این الزام علاوه بر غلبه بر شرایط کم آبی و صرف هزینه های بسیار زیاد توسعه منابع جدید آبی و حفاظت محیط زیست، نیروی محرکی تازه برای مصارف مجدد فاضلاب در بسیاری از نقاط دنیا به وجود آورده است (۱۵).

مقاومت مکانیکی خاک یکی از ویژگی های فیزیکی (مکانیکی) خاک است که در ارتباط با رشد گیاهان مهم است. مقاومت مکانیکی خاک در فرم های متنوعی مانند مقاومت برشی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت فروروی تعریف می شود (۹). مقاومت برشی حاصل برهم کنش نیروهای فشاری و مماسی است. ریشه گیاهان باعث گسیختگی خاک از درون یا بین خاکدانه ها می شوند که این فرآیند به ساختمان و مقدار آب خاک بستگی دارد (۲۳). در عملیات کشاورزی مقاومت برشی خاک در برهم کنش بین چرخ ماشین های کشاورزی یا ابزارهای خاک ورزی و خاک و در گسیختگی خاک مهم است (۹).

مقاومت برشی خاک از دو مشخصه چسبندگی (c) و اصطکاک داخلی خاک (φ) به وجود می آید (۹). چسبندگی از اتصال و پیوند ذاتی بین ذرات خاک به وجود می آید و به ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند میزان و نوع رس، درصد اشباع، نوع کاتیون ها و آنیون های محلول و مقدار مواد آلی بستگی دارد. هر چه خاک رسی تر باشد، چسبندگی بیشتر است ولی با افزایش آب منفذی، مقاومت چسبندگی آن کاهش می یابد. با توجه به ماهیت مقاومت چسبندگی می توان نتیجه گرفت که این مقاومت بستگی به نیروهای خارجی وارده بر

صورتی که در تیماری که از لجن با تجزیه شدید استفاده کردند، زاویه اصطکاک داخلی به ۳۷ درجه افزایش یافت. ولی مقدار چسبندگی خاک برای همه تیمارها برابر با صفر گزارش شد. ویژگی‌های مکانیکی خاک از جمله مقاومت برشی و مقاومت فروری از اهمیت زیادی در رابطه با پایداری خاک و توسعه ریشه در خاک برخوردار هستند. یقیناً پساب به دلیل وجود افزودنی‌های آلی و معدنی به خاک سبب تغییر در ویژگی‌های مکانیکی خاک می‌شود، ولی پژوهش‌های کاربردی اندکی در این مورد در دسترس است. از این رو در این پژوهش اثر کاربرد پساب تصفیه شده فولاد مبارکه اصفهان بر ویژگی‌های مکانیکی خاک ارزیابی شد. چون مکان‌های شاهد (آبیاری با آب چاه و بدون آبیاری) نیز در منطقه وجود دارند، امکان بررسی اثر مدت زمان کاربرد پساب بر پایداری محیط رشد گیاه نیز وجود دارد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه و روش نمونه‌برداری

شهرستان مبارکه با مساحت ۱۰۱۸ کیلومتر مربع در فاصله ۶۵ کیلومتری جنوب غربی اصفهان و بین ۵۱ درجه و ۱۳ دقیقه و ۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۳ دقیقه و ۲۸ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی واقع گردیده است.

مجتمع فولاد مبارکه که در قسمت جنوب غربی شهرستان مبارکه قرار گرفته است دارای فضای سبزی به وسعت بیش از ۱۵۰۰ هکتار است. بخش عمده این مساحت را جنگل دست کاشت به خود اختصاص داده که در آن درختانی مانند کاج، سرو، افاقیا، زبان گنجشک، توت و زیتون وجود دارند.

منابع اصلی آب مورد استفاده در مجتمع فولاد مبارکه شامل آب رودخانه زاینده‌رود و آب چاه است. آبیاری فضای سبزی مجتمع در ابتدا با آب چاه بوده است، ولی به دلیل محدودیت شدید آبی که در استان اصفهان وجود دارد، به منظور پایدار نگه داشتن فضای سبزی مجتمع، جلوگیری از آلودگی شهر، استفاده بهینه از منابع آبی موجود و جلوگیری از آلودگی محیط زیست به سبب رها کردن فاضلاب خام، علاوه بر آب چاه، از پساب

زانگ و همکاران (۲۹) در مطالعه‌ای به اندازه‌گیری مقاومت برشی سطح خاک به روشی مشابه آزمایش جعبه برش مستقیم پرداختند. آنها آزمایش‌های خود را بر روی خاک‌های با چگالی ظاهری و مقدار رطوبت متفاوت انجام داده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش چگالی ظاهری و کاهش میزان رطوبت مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد.

گسیختگی در توده خاک زمانی رخ می‌دهد که خاک قادر به تحمل نیروهای وارده به آن نیست رخ می‌دهد (۹). در مزرعه اغلب نیروهایی که بر خاک وارد می‌شوند چندبعدی هستند و این موضوع تشخیص این‌که خاک تنها دچار گسیختگی برشی شده است را دشوار می‌سازد. بنابراین روش‌های صحرایی محدودی هستند که تنها نیروی برشی به خاک اعمال کنند. بیشتر روش‌ها، روش‌های آزمایشگاهی هستند که رفتار خاک را در حالتی که خاک محصور یا نیمه‌محصور است، بررسی می‌کنند. ولی انجام آزمایش‌های مقاومت خاک در مزرعه نسبت به آزمایشگاه سودمندترند. آزمایش‌های مزرعه‌ای سریع‌تر و ارزان‌تر بوده و به انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه نیاز نیست. برای انجام آزمایش‌های مقاومت خاک در مزرعه از دستگاه‌های مختلف مانند حلقه برش، جعبه برش، فروسنج مخروطی و فروسنج جیبی می‌توان استفاده کرد (۲۵).

مقاومت خاک در برابر نفوذ ریشه یا مقاومت خاک در برابر ابزار خاک‌ورزی توسط فروسنج اندازه‌گیری می‌شود (۹). مقاومت فروری تحت تأثیر برخی از ویژگی‌های خاک مانند پتانسیل آب، بافت، چگالی ظاهری، ساختمان و کانی‌شناسی کانی‌های خاک است که برهم‌کنش و ترکیب این عوامل اثر پیچیده بر مقاومت فروری می‌گذارد (۹). بین مقاومت فروری و مقدار آب خاک رابطه منفی وجود دارد (۹).

برندان و کلی (۸) تغییرات ویژگی‌های مکانیکی خاک را در اثر کاربرد لجن فاضلاب توسط روش سه‌محوری بررسی کرده و گزارش کردند که ویژگی‌های مکانیکی با میزان تجزیه لجن کاربردی در خاک تغییر می‌کند و در تیماری که از لجن با تجزیه متوسط استفاده شده بود، زاویه اصطکاک داخلی ۳۲ درجه بود، در

همچنین به دلیل تأثیر ذرات درشت بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، درصد سنگریزه نیز به روش وزنی محاسبه شد.

همچنین برای بررسی ویژگی‌های پساب تصفیه شده و آب چاه مجتمع فولاد مبارکه اصفهان، نمونه‌برداری از آب چاه شماره ۱۵ مجتمع فولاد مبارکه و پساب تصفیه شده از حوضچه‌های ذخیره پساب انجام گرفت. سپس میزان کربن آلی محلول نمونه‌ها توسط دستگاه TOC Analyser مدل SKALAR,CS22 اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ماده آلی کل نمونه‌ها از روش سوزاندن در کوره استفاده شد که برای این منظور باقی‌مانده خشک آب‌ها به مدت شش ساعت در کوره با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و با داشتن وزن نمونه‌ها پیش و پس از سوزانده شدن در کوره وزن ماده آلی و درصد آن به دست آمد (۲۴).

برای اندازه‌گیری میزان مواد جامد معلق (TSS)، نمونه‌های آب به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند و با در نظر گرفتن وزن نمونه‌ها پیش و پس از آون خشک شدن میزان TSS محاسبه شد (۲۴).

در این پژوهش مقاومت برشی خاک توسط جعبه برش مزرعه‌ای در حالت اشباع اندازه‌گیری شد (۱۳). در نقاط مورد نظر، ناحیه کوچکی از خاک سطحی پیش از اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک به آرامی (بدون ایجاد آب‌ایستی) اشباع شد. پس از آن دستگاه جعبه برش در خاک اشباع شده قرار گرفته و جعبه برش آن در خاک فرو برده شد. برای جلوگیری از اثر خاک اطراف بر نیروی افقی اندازه‌گیری شده، خاک اطراف صفحه اعمال‌کننده تنش کنار زده شد. پس از اعمال نیروی عمودی توسط وزنه‌ها بر روی دستگاه، نیروی افقی از طریق موتور جابه‌جایی اعمال شده و گسیختگی برشی در سطح خاک رخ داد. به منظور اطمینان از وقوع گسیختگی، اعمال نیروی افقی تا جابه‌جا شدن صفحه اعمال‌کننده تنش به اندازه ۱/۵ سانتی‌متر (برابر ۱۵ درصد قطر صفحه اعمال‌کننده تنش) ادامه یافت. انجام آزمایش در هر مکان، در سه نقطه با سه نیروی عمودی (سه وزنه متفاوت) انجام شد. تنش عمودی و

تصفیه شده صنعتی نیز برای آبیاری زمین‌های فضای سبز استفاده می‌شود. تصفیه‌خانه فاضلاب در شرکت فولاد مبارکه تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی است. پساب تصفیه شده تصفیه‌خانه فاضلاب صنعتی از طریق کانال‌های سرپوشیده به حوضچه‌های ته‌نشینی منتقل می‌شود. آب دریاچه‌ها به وسیله پمپ‌های قوی برداشت شده و پس از پالایش توسط مراکز فیلتراسیون از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای در فضای سبز مجتمع توزیع می‌شود.

به منظور بررسی اثر پساب و آب چاه بر ویژگی‌های مکانیکی خاک، مکان‌های مورد بررسی انتخاب شده و اندازه‌گیری و نمونه‌برداری خاک صورت گرفت. بدین صورت که سعی شد بر اساس بافت خاک، مکان‌های انتخابی نماینده کل منطقه باشند. بنابراین هفت مکان شامل مکان‌هایی با سابقه ۷، ۳ و ۱۹ سال آبیاری با پساب، مکان‌های دارای سله سطحی ناشی از مواد اولیه حاصل از معادن روباز (اکسید آهن) و آبیاری شده به مدت هفت سال با پساب، مکان‌های دارای سله سطحی بدون آبیاری، مکان‌های آبیاری شده با آب چاه و مکان‌های بدون آبیاری انتخاب شدند. تمامی تیمارهای آبیاری به روش آبیاری قطره‌ای آبیاری می‌شدند و اندازه‌گیری و نمونه‌برداری در بین دو درخت و در خاک زیر قطره‌چکان‌های سیستم آبیاری از لایه ۵-۰ سانتی‌متر انجام شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های عمومی و مکانیکی خاک

به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های عمومی خاک نمونه‌برداری از لایه ۵-۰ سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌های خاک دست‌خورده به آزمایشگاه منتقل شده و پس از هوا-خشک شدن و عبور از الک دو میلی‌متر برای تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی آماده شدند. به این ترتیب بافت خاک به روش پیپت، درصد ماده آلی خاک به روش والکی - بلاک یا اکسایش تر (۲۱)، آهک خاک به روش تیتراسیون برگشتی اسید باقی‌مانده با سود (۲۲) و چگالی ظاهری خاک با نمونه‌های دست‌نخورده درون سیلندرهای نمونه‌برداری با حجم ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شدند.

جدول ۱. تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش

شماره تیمار	زمان آبیاری (سال)	منبع آبیاری	سله سطحی
۱	۳	پساب	-
۲	۷	پساب	-
۳	۱۹	پساب	-
۴	۱۹	آب چاه	-
۵	۷	پساب	+
۶	-	بدون آبیاری	+
۷	-	بدون آبیاری	-

تنش برشی نیز به ترتیب زیر محاسبه شدند:

دستگاه فروسنج روی سطح خاک قرار داده شد و با اعمال نیرو تا خط نشان (تقریباً ۰/۵ سانتی متر) در خاک فرو برده شد. این دستگاه مقاومت برشی غیرمحصور را نیز اندازه گیری می کند (۱۹).

$$\sigma_n (\text{تنش عمودی}) = \frac{\text{نیروی عمودی}}{\text{سطح مقطع صفحه اعمال کننده تنش}} \quad (2)$$

$$\tau (\text{تنش برشی}) = \frac{\text{نیروی برشی}}{\text{سطح مقطع صفحه اعمال کننده تنش}} \quad (3)$$

که در رابطه (۲) منظور از نیروی عمودی mg بوده که m جرم وزنه و g شتاب گرانش است. نیروی برشی برابر با نیروی افقی ثبت شده توسط دیتالاگر است.

نقطه گسیختگی، حداکثر نیروی برشی (گسیختگی ترد) یا نقطه جابه جایی برشی نسبی ۱۵ درصد (گسیختگی نرم) در نظر گرفته شد و تنش برشی در آن برابر مقاومت برشی در نظر گرفته شد. برای آزمون برش خاک در هر نقطه به منظور رسم پوش گسیختگی، تنش های نرمال برابر ۲۵، ۶۲/۴ و ۱۲۴/۸ هکتوپاسکال اعمال شد. در نهایت مقادیر مقاومت برشی (τ) در برابر تنش عمودی (σ_n) رسم شده و خط رگرسیون آنها برآزش داده شد که عرض از مبدأ آن برابر چسبندگی (c) و شیب آن برابر $\tan\phi$ است (رابطه ۱).

مقاومت فروری خاک در دو حالت خشک و نزدیک اشباع (مکش دو سانتی متر) توسط فروسنج جیبی (Pocket penetrometer) اندازه گیری شد. مکش دو سانتی متر توسط دستگاه نفوذسنج مکشی (ساخت شرکت Soil Measurement System, Tucson, AZ 85704 USA) روی سطح خاک اعمال شد. روش کار بدین صورت بود که

تجزیه و تحلیل آماری

تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش به شرح جدول (۱) است. تجزیه های آماری اثر زمان و منبع آبیاری بر ویژگی های مکانیکی خاک با استفاده از طرح بلوک های کامل تصادفی توسط نرم افزار SAS 9.0 انجام گرفت. همچنین مقایسه میانگین ها با آزمون LSD در سطح معنی داری پنج درصد انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی های پساب و آب چاه

ویژگی های اندازه گیری شده پساب و آب چاه به شرح جدول (۲) هستند.

مقدار pH و رسانایی الکتریکی پساب و آب چاه بر اساس استاندارد کیفیت آب آیرس و وسکات در بازه استاندارد قرار دارد (۳). میزان ماده آلی کل و جامد در پساب بیشتر از آب چاه است ولی آب چاه، ماده آلی محلول بیشتری نسبت به پساب را داراست. جامدات معلق و محلول در پساب بیشتر از آب چاه

جدول ۲. ویژگی‌های پساب و آب چاه شماره پانزده

پارامتر	واحد	مقدار در پساب	مقدار در آب چاه
pH	-	۷/۱۴	۷/۳
رسانایی الکتریکی	dS/m	۲/۴	۲/۲
مقدار کل مواد جامد معلق	mg/L	۲۱۴	۱۶۰
مقدار کل مواد جامد محلول	mg/L	۱۵۳۶	۱۴۰۸
مواد آلی کل	mg/L	۲۱۵	۱۸۵
مواد آلی محلول	mg/L	۲۲/۴۱	۵۲/۹۲
مواد آلی جامد	mg/L	۱۹۲/۵۹	۱۳۲/۰۸
نسبت جذب سدیم (SAR)	(meq/L) ^{۰.۵}	۳/۰	۱۰/۷

کمتری نسبت به خاک بکر دارا هستند.

اثر آبیاری با پساب تصفیه شده و آب چاه بر مقاومت فروری خاک

جدول ۴ توصیف آماری مقاومت فروری خاک‌های منطقه را در دو حالت خشک و مرطوب (مکش دو سانتی‌متر) نشان می‌دهد. میانگین مقاومت فروری در حالت خشک بیشتر از مقاومت فروری در حالت مرطوب است. حضور آب در خاک باعث سست شدن و کاهش پیوند بین ذرات و کاهش اصطکاک داخلی خاک می‌شود و از این طریق مقاومت فروری اندازه‌گیری شده در حالت مرطوب کمتر از حالت خشک است. عباسپور گیلانده (۱) گزارش کرد که رطوبت خاک اثر معنی‌داری بر مقدار شاخص مخروطی مخروطی داشته و با افزایش درصد رطوبت، شاخص مخروطی خاک به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. این یافته‌ها با نتایج کارتر و همکاران نیز هم‌خوانی دارد (۹). ضریب تغییرات داده‌های شاخص مخروطی خاک با توجه به تیمارهای مختلف و شرایط مختلف مناطق آزمایشی نسبتاً زیاد است (جدول ۴).

شکل (۱) روند تغییرات مقادیر میانگین مقاومت فروری خشک و مرطوب خاک تحت تیمارهای آبیاری را نشان می‌دهد. استفاده از پساب سبب افزایش مقاومت فروری مرطوب خاک در تیمارهای ۳ سال، ۷ سال و ۱۹ سال شده است که این

است. به گزارش مرادی‌نسب، نسبت جذب سدیم (SAR) پساب مجتمع فولاد مبارکه بر اساس استاندارد آیرس و وسکات فاقد محدودیت بوده و غلظت فلزات سنگین (آهن، روی، مس، منگنز، سرب، کروم و کادمیم) کمتر از حد تشخیص دستگاه جذب اتمی بود (۳ و ۲۰).

ویژگی‌های عمومی خاک

در منطقه مورد مطالعه بافت خاک عموماً لوم (۲۰ مکان)، لوم شنی (۱۳ مکان) و لوم سیلتی (۲ مکان) است و مقدار سنگریزه نیز در تمام خاک‌ها زیاد است.

خاک‌های آبیاری شده با پساب و آب چاه مقدار ماده آلی بیشتری نسبت به خاک‌های بدون آبیاری داشته‌اند (جدول ۳)، که این تفاوت در تیمار سه و ۱۹ سال آبیاری شده با پساب و آب چاه معنی‌دار است. افزایش ماده آلی خاک به‌دلیل وجود ماده آلی در پساب و همچنین حضور درختان و پوشش گیاهی و افزودن بقایا و لاشبرگ درختان به خاک است.

نتایج مقایسه میانگین تیمارهای مختلف آبیاری با آب پساب و آب چاه بر شوری خاک نشان می‌دهد که تمامی تیمارها نسبت به خاک بکر افزایش شوری خاک داشته‌اند که این افزایش تنها در تیمار سه سال معنی‌دار نشده است. تغییرات در مقدار کربنات کلسیم خاک‌های منطقه بیشتر تحت تأثیر مواد مادری خاک است. همه تیمارهای آبیاری چگالی ظاهری

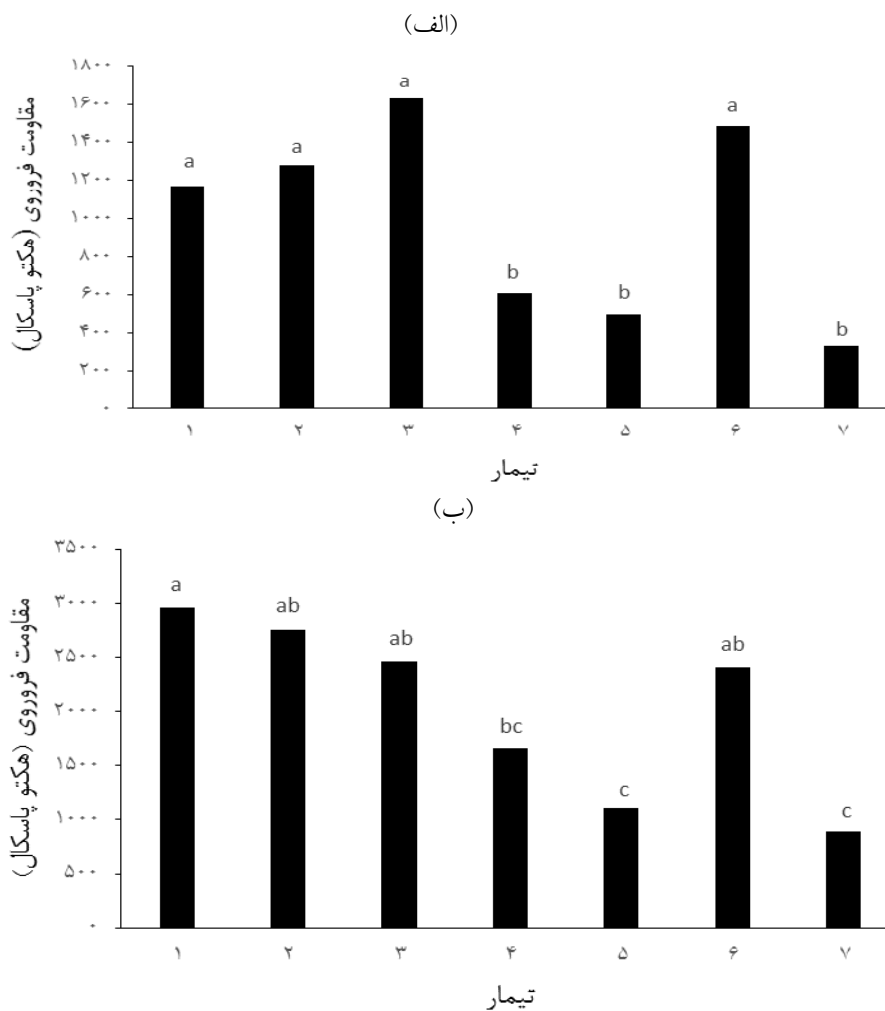
جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین اثر آبیاری با پساب بر ویژگی های شیمیایی خاک و مقایسه میانگین درصد سنگریزه و چگالی ظاهری خاک

سنگریزه (%)		ρ_b (g/cm ³)		OM (%)		CaCO ₃ (%)		EC (ds/m)		pH		زمان و منبع آب آبیاری	
تیمار	شاهد	تیمار	شاهد	تیمار	شاهد	تیمار	شاهد	تیمار	شاهد	تیمار	شاهد	تیمار	شاهد
۵/۶۰ab	۴۷/۹۶ab	۱/۳۷b	۱/۸۲a	۰/۹۲ab	۰/۳۵۴	۴۹/۶a	۴۳/۰abc	۱/۵۳dc	۰/۱۹d	۷/۶۵ab	۷/۸۳a*	سال ۳ با پساب	
۳۴/۳۱cd	۴۷/۹۶ab	۱/۴۵b	۱/۸۲a	۰/۵۳de	۰/۳۵۴	۴۵/۱abc	۴۳/۰abc	۴/۳۲ab	۰/۱۹d	۷/۴۸cd	۷/۸۳a	سال ۷ با پساب	
۵۴/۸۲a	۴۷/۹۶ab	۱/۲۶b	۱/۸۲a	۱/۰۶a	۰/۳۵۴	۴۱/۳۸bc	۴۳/۰abc	۵/۶۶a	۰/۱۹d	۷/۴۵d	۷/۸۳a	سال ۱۹ با پساب	
۴۲/۱۸b	۴۷/۹۶ab	۱/۳۳b	۱/۸۲a	۰/۸۸bc	۰/۳۵۴	۴۶/۲ab	۴۳/۰abc	۳/۱۷bc	۰/۱۹d	۷/۶۵ab	۷/۸۳a	سال ۱۹ با آب چاه	
۳۲/۴۰d	۴۱/۸۸bc	۱/۴۷b	۱/۲۹b	۰/۶۷dc	۱/۱۰a	۲۵/۹d	۳۵/۸c	۳/۶۵b	۰/۳۲d	۷/۵۸bcd	۷/۶bc	سال ۷ با پساب و خاک سله دار	

میانگین‌های دارای حروف مشترک، بدون تفاوت معنی دار در سطح آماری پنج درصد هستند.

جدول ۴. توصیف آماری مقاومت فروری خاک‌های منطقه

کشیدگی (-)	چولگی (-)	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه	واحد	ویژگی خاک
-۰/۱۰	۰/۷۵	۶۲/۴۳	۶۲۳	۹۹۸	۲۶۵۹	۲۵۰	هکتوپاسکال	مقاومت فروری در مکش ۲ سانتی‌متر
-۰/۴۲	۰/۵۵	۵۵/۲۲	۱۱۲۴	۲۰۳۶	۴۴۴۷	۳۷۸	هکتوپاسکال	مقاومت فروری در حالت خشک



شکل ۱. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده و آب چاه بر مقاومت فروری خاک (الف) در مکش دو سانتی‌متر و (ب) در حالت خشک

(میانگین‌های دارای حروف مشترک بدون تفاوت معنی‌دار در سطح آماری پنج درصد هستند)، زمین‌های آبیاری شده با:

۱- پساب (۳ سال)، ۲- پساب (۷ سال)، ۳- پساب (۱۹ سال)، ۴- آب چاه (۱۹ سال)،

۵- پساب (۷ سال و خاک سله‌دار)، ۶- خاک بکر سله‌دار و ۷- خاک بکر

نمایان‌گر اثر پساب بر مقاومت مکانیکی خاک است. بنابراین می‌توان گفت به‌طور کلی کاربرد پساب سبب سخت‌تر شدن خاک به‌ویژه در دامنه مرطوب شده‌است.

اثر آبیاری با پساب تصفیه شده و آب چاه بر مقاومت برشی خاک

در این پژوهش دو نوع منحنی تنش برشی جابه‌جایی برشی: شکننده (ترد) و نرم یا خمیری قابل مشاهده بود. در بیشتر نقاط با اعمال تنش عمودی ۲۵ هکتو پاسکال خاک رفتار ترد بروز داد، ولی با افزایش تنش‌های عمودی، رفتار خاک به سمت رفتار جسم نرم متمایل شد. به‌طور کلی خاک‌ها در هنگام اعمال تنش‌های عمودی کم، رفتاری شبیه اجسام ترد و در هنگام اعمال تنش‌های عمودی زیاد رفتاری مانند اجسام نرم و خمیری از خود نشان می‌دهند (۵). در شکل ۲ نمونه‌ای از منحنی‌های تنش برشی - جابجایی برشی مربوط به خاک با بافت لوم شنی ارائه شده است که در شکل (الف) به دلیل اعمال تنش عمودی (σ_n) کوچک، خاک رفتار ترد از خود نشان داده و گسیختگی به سرعت در قسمت‌های ابتدایی منحنی رخ داده است. در حالی که در شکل (ب) σ_n بزرگ‌تری به خاک اعمال شده و گسیختگی تدریجی رخ داده که در انتهای منحنی قابل مشاهده است؛ به این گونه رفتار خاک رفتار خمیری یا نرم گفته می‌شود.

در این پژوهش بیشتر نقاط دارای درصد شن و سنگریزه زیاد بوده و کلاس بافتی خاک در بیشتر نقاط لوم و برخی از نقاط لوم شنی بود که رفتار مکانیکی نرم را سبب شده است. همچنین بسته به نوع گسیختگی (ترد، نرم یا حالت بینابینی)، نقطه پیک یا نقطه معادل جابه‌جایی برابر ۱۵ درصد قطر صفحه اعمال‌کننده تنش، بسته به این که کدام زودتر رخ دهد، به عنوان نقطه گسیختگی در نظر گرفته شد.

استخراج پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه

اصطکاک داخلی) خاک با استفاده از پوش گسیختگی

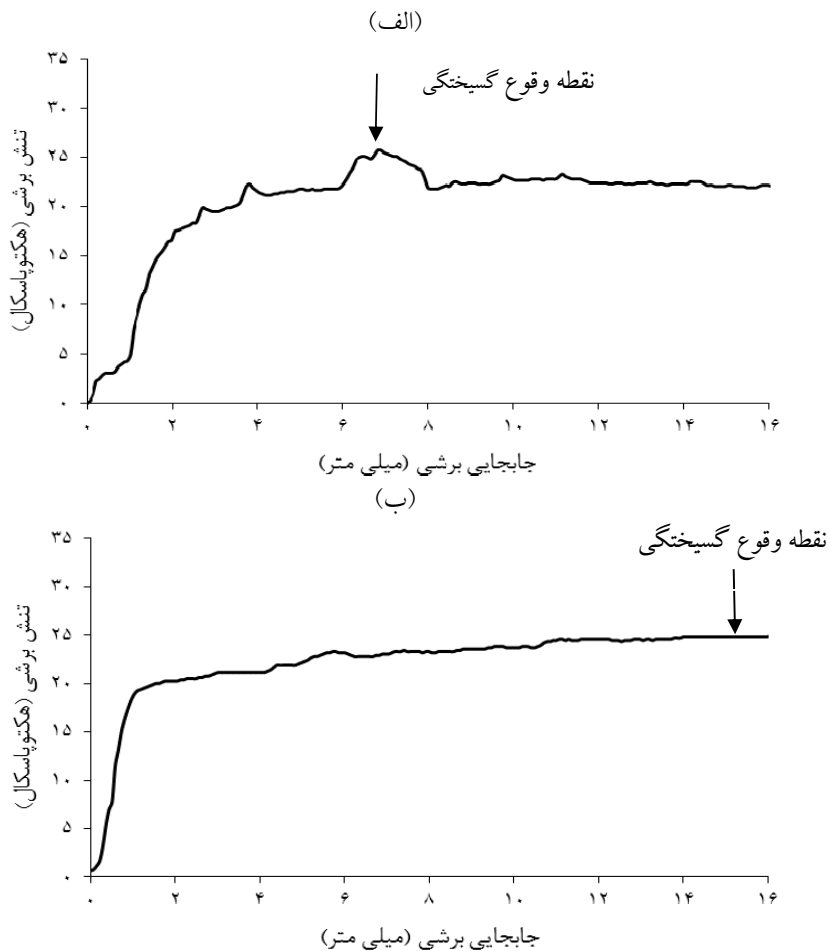
در شکل ۳ نمونه‌ای از پوش گسیختگی مشاهده می‌شود که با استفاده از منحنی‌های تنش برشی - جابه‌جایی برشی، تنش

تفاوت در هر سه تیمار در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار شد. بیشترین مقدار مقاومت فروروی مرطوب مربوط به تیمار ۱۹ سال آبیاری شده با پساب است (شکل ۱). حضور جامدات معلق موجود در پساب باعث مسدود کردن منافذ خاک شده و خاک را سخت‌تر می‌کند و از این طریق مقاومت فروروی مرطوب در این تیمارها افزایش یافته است.

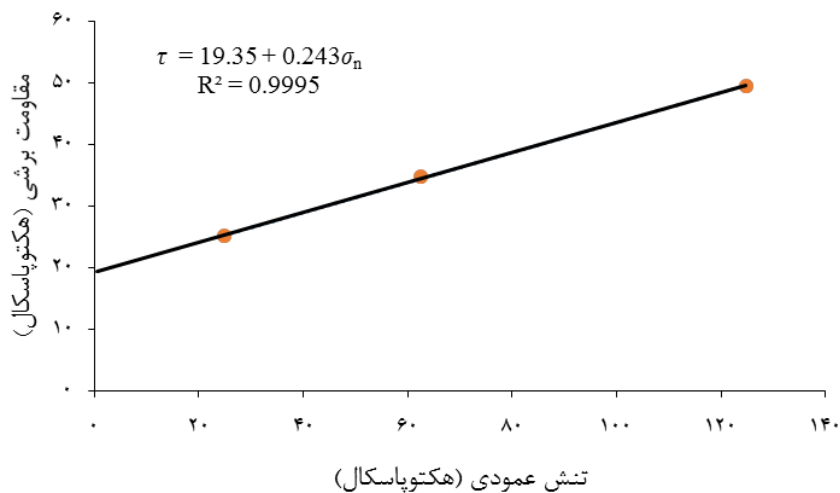
استفاده از آب چاه برای آبیاری تأثیر معنی‌داری بر مقاومت فروروی مرطوب خاک نگذاشته است. کمترین مقاومت فروروی مرطوب در خاک بکر اندازه‌گیری شد (شکل ۱). تیمار شاهد سه‌دار پس از تیمار ۱۹ سال بیشترین مقدار مقاومت فروروی را داراست که حضور سله باعث افزایش مقاومت فروروی مرطوب نسبت به تیمار شاهد بدون سله شده است. ولی تیمار ۷ سال آبیاری خاک سه‌دار، مقاومت فروروی مرطوب کمتری نسبت به تیمار شاهد سه‌دار دارد که احتمالاً به دلیل آبیاری‌های مکرر، چرخه‌های تر و خشک شدن و ایجاد درز و ترک، مواد تشکیل‌دهنده سله سطحی مقاومت خود را از دست داده و مقاومت فروروی آن کاهش یافته است.

در شکل ۱- ب مشاهده می‌شود که استفاده از پساب و آب چاه سبب افزایش معنی‌دار مقاومت فروروی خاک در حالت خشک نیز شده است و این افزایش در تیمارهای آبیاری شده با پساب معنی‌دار شد. بیشترین مقدار مقاومت فروروی خشک مربوط به تیمار سه سال آبیاری شده با پساب است که احتمالاً به دلیل شرایط بافتی (که با مرطوب شدن اثر آن کاهش یافته است) و حضور سنگریزه زیاد در این خاک (۵۰/۶ درصد) و حضور ریشه‌های سطحی گیاهان، مقاومت فروروی در این تیمار بیشتر از سایر تیمارها شده است. افزایش مقاومت فروروی خشک در تیمار آب چاه از نظر آماری معنی‌دار نشد. حضور سله سطحی باعث افزایش مقاومت فروروی خشک خاک بکر سه‌دار نسبت به خاک بکر بدون سله شده است.

با مقایسه روند تغییرات مقاومت فروروی در دو حالت خشک و مرطوب، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقادیر مقاومت فروروی در حالت مرطوب نسبت به حالت خشک بیشتر



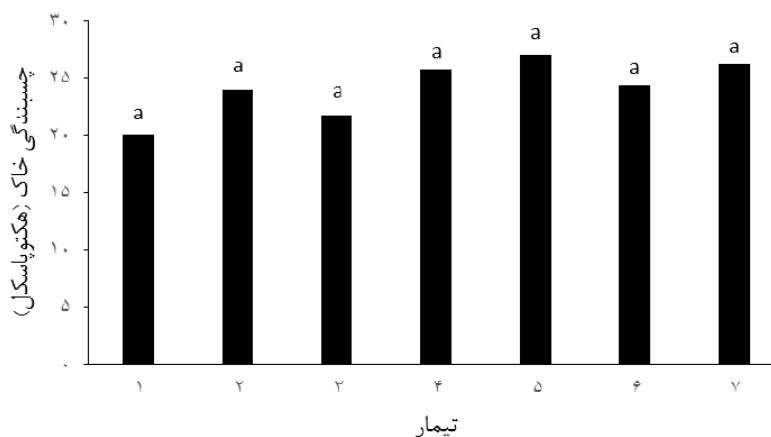
شکل ۲. منحنی تنش برشی - جابه‌جایی برشی خاک برای تنش‌های عمودی برابر (الف) ۲۵ هکتوپاسکال و (ب) ۱۲۴/۸ هکتوپاسکال



شکل ۳. نمونه‌ای از پوش گسیختگی خاک در منطقه مورد مطالعه

جدول ۵. توصيف آماری پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های منطقه

ویژگی خاک	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)	چولگی (-)	کشیدگی (-)
چسبندگی (c)	هکتوپاسکال	۸/۸۱	۳۵/۶۶	۲۴/۱۶	۶/۲۸	۲۵/۹۸	-۰/۰۷	-۰/۲۲
زاویه اصطکاک داخلی (φ)	(°)	۷/۸۶	۲۵/۲۷	۱۴/۱۴	۴/۱۸	۲۹/۵۶	۰/۹۱	۰/۹۹



شکل ۴. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده و آب چاه بر چسبندگی خاک (میانگین‌های دارای حروف مشترک بدون تفاوت معنی‌دار در سطح آماری پنج درصد هستند)، زمین‌های آبیاری شده با: ۱- پساب (۳ سال)، ۲- پساب (۷ سال)، ۳- پساب (۱۹ سال)، ۴- آب چاه (۱۹ سال)، ۵- پساب (۷ سال و خاک سله‌دار)، ۶- خاک بکر سله‌دار و ۷- خاک بکر

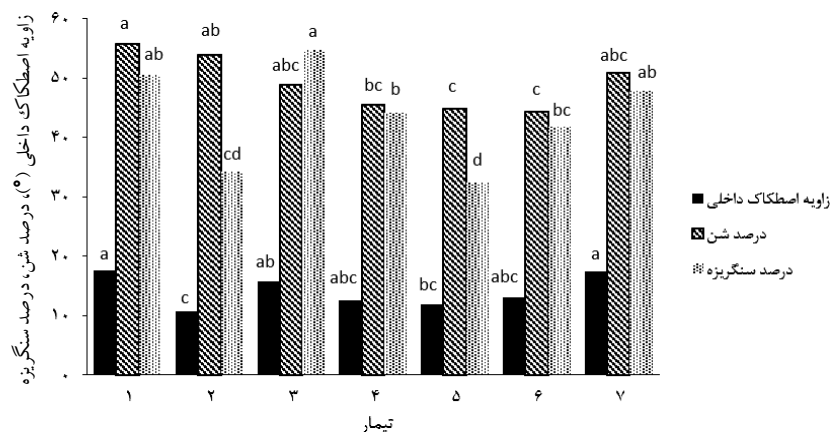
مقایسه آماری پارامترهای مقاومت برشی خاک در تیمارهای مختلف آبیاری

جدول ۵ توصیف آماری پارامترهای مقاومت برشی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) را نشان می‌دهد. پارامتر چسبندگی (c) در خاک‌های منطقه بین ۸/۸۱ تا ۳۵/۶۶ هکتوپاسکال متغیر بوده و دارای ضریب تغییرات ۲۵/۹۸ درصد و انحراف معیار برابر ۶/۲۸ هکتوپاسکال است. زاویه اصطکاک داخلی (φ) بین ۷/۸۶ و ۲۵/۲۷ درجه متغیر است و ضریب تغییرات آن ۲۹/۵۶ درصد و انحراف معیار آن ۴/۱۸ درجه بود. ضریب تغییرات این پارامترها با توجه به تفاوت‌های کلاس‌های بافتی و درصد سنگریزه خاک‌ها و تیمارهای آبیاری قابل توجه است.

شکل ۴ مقایسه میانگین مقادیر چسبندگی خاک را در تیمارهای آبیاری نشان می‌دهد. در بین تیمارها تفاوت معنی داری از نظر مقدار چسبندگی مشاهده نمی‌شود و می‌توان

برشی گسیختگی (مقاومت برشی) برای هر تنش عمودی تعیین شده و پوش گسیختگی ترسیم شد. با استفاده از برآزش رابطه کولمب در هر مکان، چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (φ) تعیین شد. در این شکل میزان چسبندگی برابر ۱۹/۳۵ هکتوپاسکال و $\tan\phi$ برابر ۰/۲۴۳ است.

شکل پوش گسیختگی بسته به میزان رس، شن و سنگریزه خاک که بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مؤثرند، متغیر است. به‌طور کلی با افزایش میزان رس در خاک‌ها، میزان چسبندگی خاک افزایش می‌یابد (۱۶). بوهن (۶) نیز بیان کرد که کانی‌های رسی به دلیل دارا بودن خاصیت کلوییدی زیاد سبب ایجاد چسبندگی در خاک می‌شوند. معمولاً با افزایش میزان شن در خاک‌ها شیب پوش گسیختگی (یا زاویه اصطکاک داخلی) بزرگ‌تر شده و عرض از مبدأ پوش گسیختگی (چسبندگی) کاهش می‌یابد (۵).



شکل ۵. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده و آب چاه بر زاویه اصطکاک داخلی خاک (میانگین‌های دارای حروف مشترک بدون تفاوت معنی‌دار در سطح آماری پنج درصد هستند). زمین‌های آبیاری شده با: ۱- پساب (۳ سال)، ۲- پساب (۷ سال)، ۳- پساب (۱۹ سال)، ۴- آب چاه (۱۹ سال)، ۵- پساب (۷ سال و خاک سله‌دار)، ۶- خاک بکر سله‌دار و ۷- خاک بکر

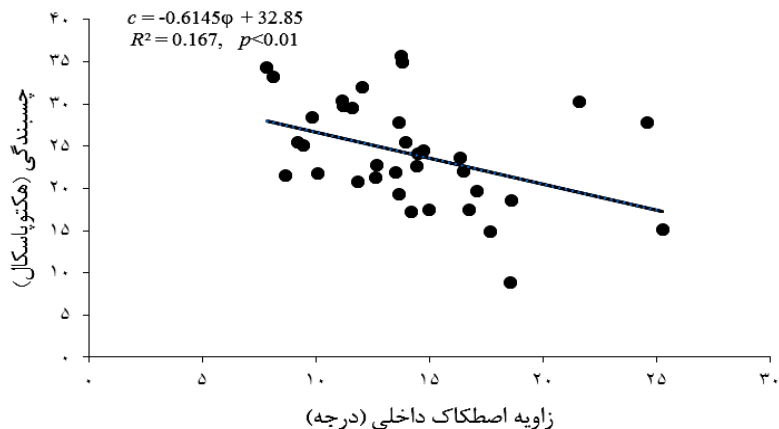
سنگریزه در بین تیمارها است، ϕ آن نیز نسبت به تیمارهای دیگر کمتر است.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که پساب بر پارامترهای مقاومت برشی خاک تأثیری معنی‌داری نداشته است و تغییر این پارامترها در منطقه مورد بررسی بیشتر متأثر از اجزای خاک (بافت و درصد سنگریزه) و ریزساختار خاک هستند.

بین مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک هم بستگی منفی و معنی‌داری ($p < 0/05$ و $r = 0/40$) وجود داشت. این هم‌بستگی به‌صورت رابطه رگرسیونی در شکل ۶ آورده شده است. هر عاملی که سبب افزایش مقاومت اصطکاکی خاک شود، چسبندگی خاک را کاهش می‌دهد و به همین دلیل این هم‌بستگی منفی به‌دست آمده است. هوایی و همکاران (۱۳) گزارش کردند که مقدار c با مقدار ϕ و مقدار ϕ با مقدار c هم‌بستگی منفی دارد که این به‌دلیل پراکنده‌سازی ذرات ریز توسط ذرات درشت و اثر کاهشی ذرات درشت بر خاکدانه‌سازی می‌تواند باشد. همت و همکاران (۱۴) اثر درازمدت کاربرد کودهای آلی را بر پارامترهای مقاومت برشی (c و ϕ) خاک‌های آهکی در ایران مرکزی را بررسی کرده و گزارش مشابهی از هم‌بستگی منفی ($p < 0/001$ و $r = 0/73$) بین c و ϕ ارائه دادند.

این‌گونه نتیجه گرفت که پساب و آب چاه تأثیر معنی‌داری بر میزان چسبندگی خاک نداشته است و عوامل مؤثر مربوط به بافت، درصد سنگریزه و ریزساختار خاک هستند. تغییرات c در بین تیمارها می‌تواند ناشی از درصد شن و سنگریزه زیاد و تفاوت آنها در خاک‌ها باشد.

شکل ۵ روند تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک را در تیمارهای آبیاری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای آبیاری و خاک بکر از نظر ϕ وجود دارد. بیشترین مقادیر ϕ مربوط به تیمارهای سه سال آبیاری و خاک بکر هستند. در تیمار خاک بکر درصد سنگریزه و شن زیاد است و در تیمار سه سال علاوه بر زیاد بودن این ویژگی‌ها، بافت ریشه‌ای متراکم نیز وجود دارد که باعث افزایش ϕ می‌شود. اسولیوان و بال (۲۳) بیان کردند که ریشه گیاهان باعث افزایش گسیختگی خاک می‌شوند که این به‌ساختمان و مقدار آب خاک نیز بستگی دارد. همچنین کومینو و همکاران (۱۰) نشان دادند که مقاومت برشی خاک در ۱۰ سانتی‌متر سطح خاک با افزایش درصد ریشه گیاهان در خاک، افزایش می‌یابد که این توجیه برای تیمار ۱۹ سال آبیاری شده با پساب صادق است. تیمار هفت سال دارای کمترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی است و از آنجایی که این تیمار دارای کمترین مقدار



شکل ۶. رابطه رگرسیونی بین چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (φ) در خاک‌های منطقه

نتیجه‌گیری

در بررسی اثر پساب و آب چاه بر مقاومت برشی خاک مشخص شد که پساب، آب چاه و سله سطحی تأثیری بر میزان چسبندگی خاک نداشته ولی بر زاویه اصطکاک داخلی خاک اثر معنی‌دار داشتند. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که تغییر پارامترهای مقاومت برشی خاک در منطقه مورد بررسی بیشتر متأثر از اجزای خاک (بافت و درصد سنگریزه) و ریزساختار خاک بوده و کاربرد پساب تأثیر چشمگیری بر این پارامترها نداشت. پیشنهاد می‌شود برای کاهش پیامدهای منفی پساب بر ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی خاک (سخت‌شدن خاک)، به‌صورت دوره‌ای خاک فضای سبز شخم سطحی (خراش) زده شود.

کاربرد پساب تصفیه‌خانه فاضلاب مجتمع فولاد مبارکه اصفهان سبب افزایش مقاومت فروروی خاک فضای سبز در دامنه خشک و مرطوب در کوتاه‌مدت (سه سال)، میان‌مدت (هفت سال) و درازمدت (۱۹ سال) شده است. به‌صورتی که تیمار ۱۹ سال آبیاری شده با پساب بیشترین مقاومت فروروی خاک در حالت مرطوب را داراست ولی آب چاه تأثیری بر مقاومت فروروی خاک نداشته است. سله سطحی در مکان‌هایی که آبیاری نشده‌اند باعث افزایش مقاومت فروروی خاک شده است ولی خاک‌های سله‌دار و آبیاری شده از نظر مقادیر مقاومت فروروی خشک و مرطوب تفاوتی با خاک بکر نشان نداشتند.

منابع مورد استفاده

1. Abbaspoor Gilandeh, M. R., R. Ebrahimi, S. Rostami and Y. Abbaspoor Gilandeh. 2014. Investigation of some factors affecting the cone index values of agricultural soils. *In: Proceeding of the Second National Congress on Organic and Conventional Agriculture, University of Mohaghegh Ardebili, Ardebil, Iran.*
2. Ayers, P. D. 1987. Utilizing the torsional shear test to determine soil strength-properties relationship. *Soil and Tillage Research* 10: 273-380.
3. Ayers, R. S. and D. W. Westcot. 1976. *Water Quality for Agriculture.* Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
4. Baumgartl, T. and R. Horn. 1991. Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil and Tillage Research* 19: 203-213.
5. Behnia, K. and A. M. Tabatabai. 1994. *Soil Mechanics.* Tehran University Press, Tehran.
6. Bohn, H. L., B. L. McNeal and G. A. O'Connor. 2001. *Soil Chemistry,* John Wiley & Sons, INC., New York.
7. Bradford, J. M. and R. B. Grossman. 1982. In-situ measurement of near-surface soil strength by the fall-cone device. *Soil Science Society of America Journal* 46: 685-688.
8. Brendan, C and O. Kelly. 2005. Mechanical properties of dewatered sewage sludge. *Waste Management Journal* 25:

- 47-52.
9. Carter, M. R. and E. G. Gregorich. 2008. Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
 10. Comino, E., P. Marengo and V. Rolli. 2010. Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results. *Soil and Tillage Research* 110: 60-68.
 11. Cruse, R. M. and W. E. Larson. 1977. Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact. *Soil Science Society of America Journal* 41: 777-781.
 12. Franti, T. G., J. M. Laflen, and D. A. Watson. 1999. Predicting soil detachment from high discharge concentrated flow. *Transactions of The American Society of Agricultural Engineers*. 42: 329-335.
 13. Havaee, S., M. R. Mosaddeghi and S. Ayoubi. 2015. In situ surface shear strength as affected by soil characteristics and land use in calcareous soils of central Iran. *Geoderma* 237-238: 137-148.
 14. Hemmat, A., N. Aghilinategh and M. Sadeghi. 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 Journal* 107: 251-261.
 15. Hosseinian, M. 2003. Refuse Treatment of Refined Sewage. Oloom Rooz Press, Tehran.
 16. Khalil Moghadam, B., M. Afyuni, A. Jalalian, K. C. Abbaspour and A. A. Dehaghani. 2011. Estimation Surface Soil Shear Strength by Pedo-Transfer Functions and Soil Spatial Prediction Functions. *Journal of Water and Soil (Agriculture Sciences and Technology)* 25: 187-195.
 17. Knapen, A., J. Poesen, G. Govers, G. Gyssels and J. Nachtergaele. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review. *Earth-Science Review Journal* 80: 75-109.
 18. Léonard, J. and G. Richard. 2004. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena* 57: 233-249.
 19. Moosavi, A. A. and S. Dehghani. 2014. Water repellency, penetration resistance and aggregate stability in calcareous soil influenced by the use of sewage sludge and perlite. *In: Proceeding of the 13th Iranian Soil Science Congress, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.*
 20. Moradinasab, V., M. Shirvani, M. Shamsaeec and M. R. Babae. 2016. Assessing some chemical and biological quality attributes of soils irrigated with groundwater and treated industrial wastewater in greenspace of mobarake steel complex. *Journal of Water and Soil Science* 19 (7): 101-111.
 21. Nelson, D. W. and L. P. Sommers. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. PP: 539-579. *In: D. R. Buxton, (Ed.) Method of Soil Analysis, Part 2. Chemical Methods. Vol. Agronomy Handbook No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
 22. Nelson, R. E. 1982. Carbonate and gypsum. PP: 181-197. *In: D. R. Buxton, (Ed.) Method of Soil Analysis, Part 2. Chemical Methods, Vol. Agronomy Handbook No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, PP. 181-197.*
 23. Osullivan, M. F. and C. Ball. 1982. A comparison of five instruments for measuring soil strength in cultivated and uncultivated cereal seedbeds. *Journal of Soil Science* 33: 597-608.
 24. Rouiguez, J., J. Bserodez and P. Levallois. 2004. Water research manual. *Water Research Journal* 38: 4367-4382.
 25. Shahidi, K. and P. Ahmadmoghadam. 2002. Soil and Machine. Azarbayegan Gharbi University Press, Azarbayegan Gharbi.
 26. Shainberg, I., J. M. Laflen, J. M. Bradford and L. D. Norton. 1994. Hydraulic flow and water quality characteristics in rill erosion. *Soil Science Society of American Journal* 58: 1007-1012.
 27. Torri, D., E. Santi, M. Marignani, M. Rossi, L. Borselli and S. Maccherini. 2013. The recurring cycles of biancana badlands: erosion, vegetation and human impact. *Catena* 106: 22-30.
 28. Vafaeian, M. 1998. Soil Engineering Properties. Arkan Danesh Press, Isfahan.
 29. Zhang, B., Q. G. Zhao, R. Horn and T. Baumgartl. 2001. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil Tillage and Research* 59: 97-106.

Impact of Wastewater Irrigation on Soil Mechanical Properties in the Green Space of Mobarakeh Steel Complex

R. Soltani*, M. R. Mosaddeghi, M. Afyuni, S. Ayoubi and M. Shirvani¹

(Received: August 6-2016 ; Accepted: December 26-2016)

Abstract

Long-term use of treated wastewaters for irrigation adds compounds and/or ions to soils which might alter the soil physical, hydraulic and mechanical properties. Soil mechanical properties are closely linked with the plant growth. This study was conducted to investigate the effect of short-, mid- and long-term applications of the treated wastewater of Mobarake Steel Company in Isfahan on the soil penetration resistance and shear strength in the company green space. Soil penetration resistance and shear strength were measured using a pocket penetrometer and in situ shear box, respectively. The results showed that soil penetration resistance (i.e. soil hardness) at both dry and wet conditions significantly was increased upon short-, mid- and long-term applications of wastewater; 19 years of the application of wastewater resulted in the highest soil penetration resistance at wet condition, but the well water did not significantly affect it. Surface crust in the non-irrigated locations increased the soil penetration resistance, but the irrigated sealed soils were not significantly different from the virgin soil in terms of dry and wet penetration resistances. For the soil shear strength parameters, wastewater, well water and surface crust did not significantly affect soil cohesion (c), they but significantly affected the angle of internal friction (ϕ). Overall, soil shear strength parameters were not greatly affected by the irrigation water treatments because of the dominant effect of the soil fractions (texture and gravel content) and the microstructure.

Keywords: Wastewater, Penetration resistance, Shear strength, Pocket penetrometer, In situ shear box

1. Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: Rozita.soltani01@gmail.com